GEOLYMA®

GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

Fijación química de suelos contaminados con arsénico y otros elementos potencialmente tóxicos

CONSULTORÍA
ASESORÍA TÉCNICA
PROYECTOS
AMBIENTALES
Y DE INGENIERÍA

21 de noviembre de 2025

CONTENIDO

1. Introducción

2. Metodología

3. Resultados

4. Conclusiones

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

1.INTRODUCCIÓN

El tratamiento de Fijación Química (FQ) se basa en la reducción de la movilidad y disponibilidad de los metales como resultado de la aplicación de aditivos fijadores, en consecuencia, se reducen los efectos perjudiciales de los metales pesados sobre los posibles receptores ambientales. En comparación con otras técnicas de remediación, la tecnología FQ ofrece las ventajas de ser fácil de aplicar, de costo moderado y alta eficacia en la remediación (Guo et al., 2006).

En este trabajo se evaluó el tratamiento de fijación química empleando como reactivos sulfato de hierro heptahidratado y carbonato de calcio, para reducir la movilidad y evitar la lixiviación de los elementos potencialmente tóxicos en suelos contaminados con As, Cu, Ni y Pb, representativos de un predio anteriormente destinado a la producción de cobre puro y que, actualmente, representa un pasivo ambiental que requiere la implementación de medidas de remediación.

1.1 Objetivo

El objetivo de este estudio es evaluar la eficacia de la implementación de la FQ para reducir la lixiviación de los contaminantes presentes en el suelo y asegurar su no peligrosidad, mediante el uso de sulfato de hierro heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) y carbonato de calcio (CaCO3) como reactivos estabilizadores, permitiendo así su adecuada disposición final.

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

1.2 Antecedentes

Electric Power Research Institute y Southern Company (2007)

- Adición de sulfato ferroso para suelo contaminado con As .
- Resultados señalan que se redujo el As lixiviable.
- Costo de aplicación oscila entre $26 a $52 dólares por m3.

Yang et al. (2007)

Costa del Golfo en el sureste de Estados Unidos

- Estudio de FQ in situ en suelo contaminado con As.
- Se aplicaron tres combinaciones de reactivos: (1) $FeSO_4$; (2) $FeSO_4$ y $KMnO_4$; (3) $FeSO_4$, $KMnO_4$ y $CaCO_3$.
- Los tres tratamientos dieron resultado, pero el tratamiento adicionado únicamente con $FeSO_4$ se consideró el más efectivo para reducir la lixiviación del As.

Hu et al. (2010)

- Evaluaron varios tratamientos de FQ para estabilizar el As disponible en un residuo sólido altamente contaminado.
- Se probaron el sulfato férrico (SF), el cloruro de magnesio (CM) y el hidróxido de calcio (HC) a diferentes proporciones molares de ion metálico-As (Fe:As, Mg:As, Ca:As).
- Se evaluaron tres tratamientos combinados: SF+HC, SF+CM y SF+CM+HC.
- La combinación SF+CM+HC resultó ser la más óptima.

Método usado desde 1978.

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

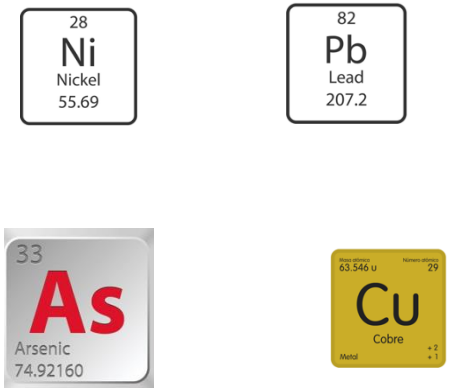
2. METODOLOGÍA

2.1 Muestreo de suelos para la realización pruebas de FQ

Se seleccionaron 4 puntos de muestreo, a distintas profundidades, previamente identificados con concentraciones de arsénico total mayores al Límite Máximo Permisible (LMP) establecido en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 (NOM-147), desde valores de 2,900 mg/kg, hasta concentraciones superiores a 46,000 mg/kg.

Identificación de las muestras

No.	Clave
1	M (3500)
2	C3-2 (0.10-0.40 M)
3	PL430 (1.00-1.20 M)
4	PL431 (1.80-2.10 M)



Se consideró el As el contaminante objetivo ya que se detecto en mayor extensión.

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

2.2 Caracterización de las muestras

Clasificación de las muestras - Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS):

-Contenido natural de agua

-Granulometría

-Obtención de finos por lavado

-Límites de consistencia o límites de Atterberg

Determinación bajo la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004:

-pH

-Concentración total

-Concentración lixiviable

Prueba de lixiviación PECT:

-Para asegurar la no peligrosidad de las muestras después del tratamiento de FQ, se determinó bajo la NOM-052-SEMARNAT-2005

Contaminante	Límite (mg/L)	Norma de referencia
Arsénico	5.0	NOM-052-SEMARNAT-2005
Plomo	5.0	NOM-052-SEMARNAT-2005
Cobre	5.0	No fijado por la norma, pero establecido con mismo valor
Níquel	5.0	No fijado por la norma, pero establecido con mismo valor

entidad mexicana de acreditación, a.c.

PROFEPA
PROCURADURÍA FEDERAL DE PROTECCIÓN AL AMBIENTE

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

2.3 Pruebas de Fijación Química

Tratamiento y adición de insumos

Pesaje de suelo e insumo

Suelo contaminado con As, Cu, Pb, Ni

Insumos seleccionados (Agentes fijadores)

Sulfato de hierro heptahidratado ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$)

Carbonato de calcio ($CaCO_3$)

Adición de insumos y agua

Homogenización de la mezcla

Tratamiento
Periodicidad

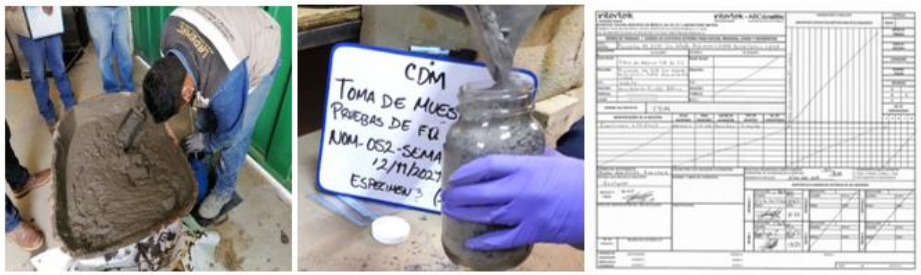
7 días | 14 días | 28 días

Preparación de las mezclas con Suelo contaminado - Sulfato ferroso heptahidratado -Carbonato de calcio

1 2 3 4

[1] Separación del suelo
[2] Pesaje del suelo
[3] Mezcla del suelo
[4] Homogenización de suelo

Toma de muestras para análisis



5 6 7

8

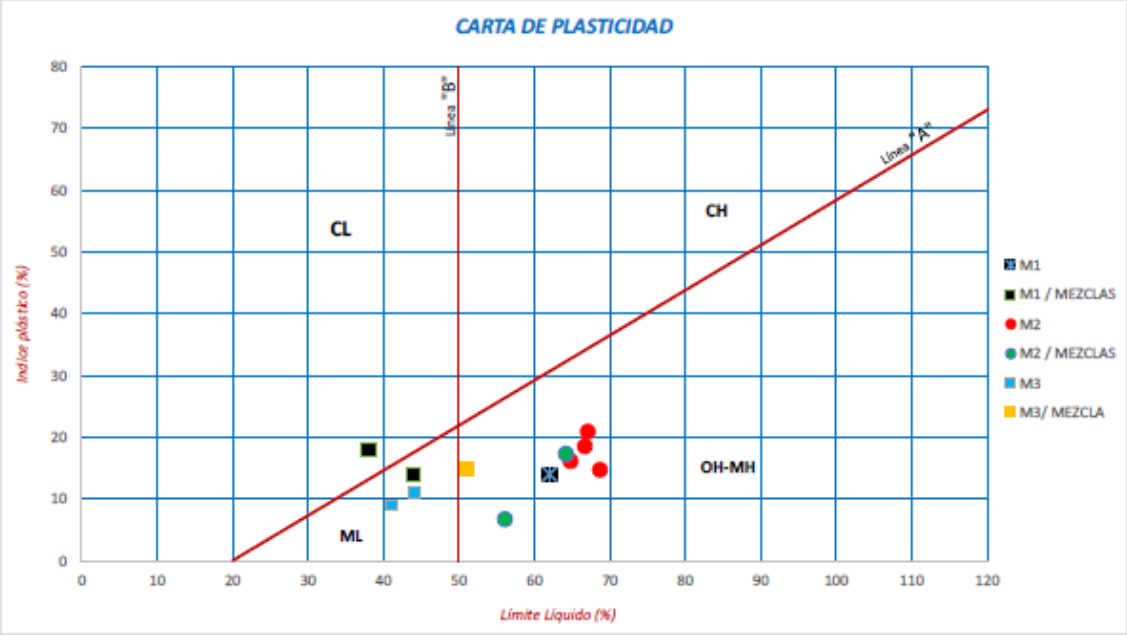
[5] Toma de muestras después del tratamiento
[6] Envaso de la muestra
[7] Elaboración de la cadena de custodia para su envío a laboratorio
[8] Equipo para la realización de las mezclas

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

3. RESULTADOS

Clasificación del suelo

De acuerdo con el análisis de las propiedades índice realizado para identificar el tipo de suelo, las muestras recuperadas corresponden a limo de alta plasticidad con arena fina.



Carta de plasticidad para clasificar suelos finos (SUCS) y la clasificación de las tres muestras recuperadas. CH = arcilla de alta plasticidad; CL= arcilla de baja plasticidad; OH-MH= limo de alta plasticidad o suelo orgánico; ML= limo de baja plasticidad

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

- Concentración total
- Concentración lixiviable
- pH

Baja lixiviación de As

Resultados de las muestras de suelo antes del tratamiento

Identificación de la muestra matriz	As total (mg/kg)	pH	As lixiviable (mg/L)	pH
M (3500)	4054.7	4.362	4.043	4.412
C3-2 (0.10-0.40 M)	22985.9	3.269	1.994	3.255
PL 430 (1.00-1.20 M)	43690.9	3.0	1.644	2.988
PL431 (1.80-2.10 M)	46050.7	3.99	2.82	3.980

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

Resultados obtenidos de pH y As lixiviable para las cuatro mezclas a 0, 7, 14 y 28

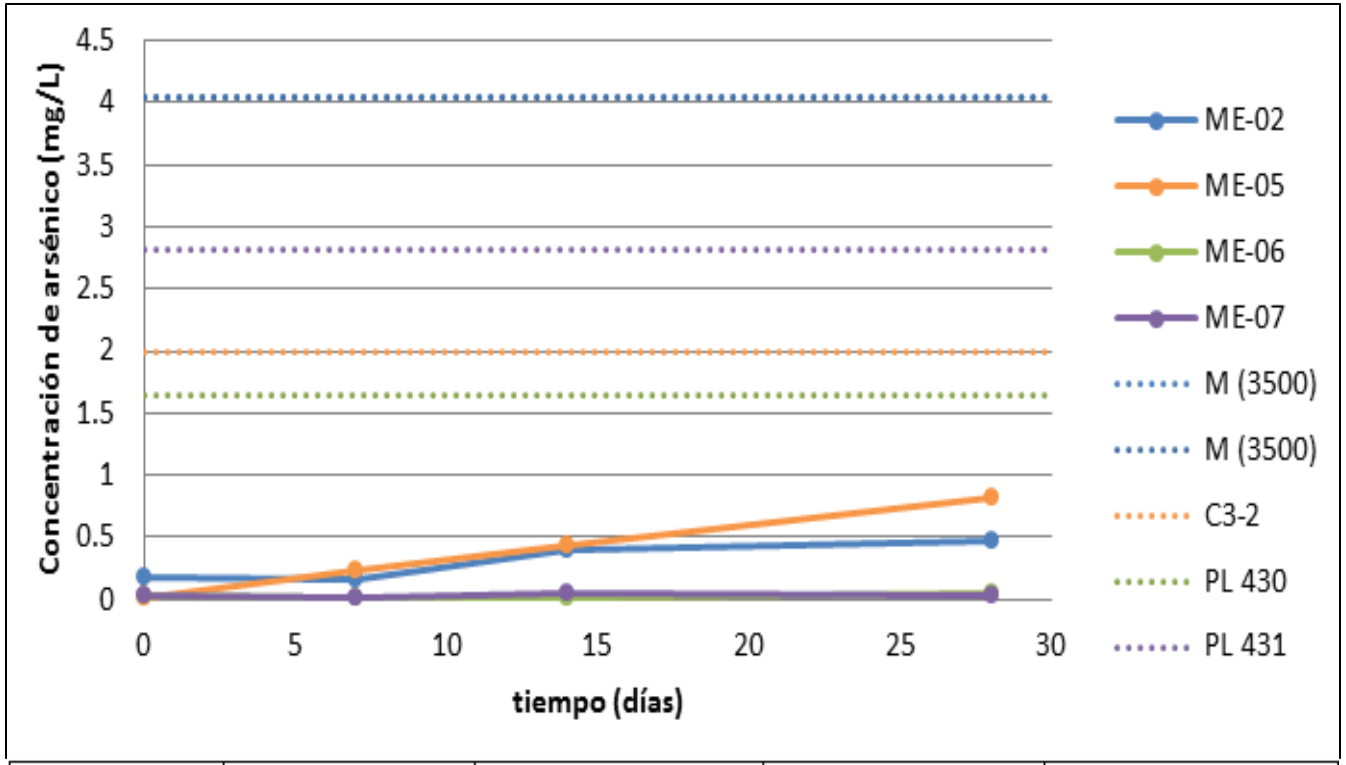
Identificación de la muestra matriz	M (3500)		C3-2 (0.10-0.40) M		PL430 (1.00-1.20 M)		PL431 (1.80-2.10 M)	
Identificación de prueba	ME-02		ME-05		ME-06		ME-07	
Tiempo de vida (días)	As lixiviable (mg/L)	pH	As lixiviable (mg/L)	pH	As lixiviable (mg/L)	pH	As lixiviable (mg/L)	pH
0	0.183	6.123	0.02	6.22	0.022	6.05	0.021	6.08
7	0.151	6.117	0.24	6.74	*ND	7.43	0.016	6.16
14	0.389	6.003	0.43	7.41	0.015	6.01	0.045	5.97
28	0.473	5.998	0.81	7.38	0.045	6.15	0.030	6.17

*ND: No Detectado, significa que el resultado del analito es un valor menor a (0.0031mg/L) Límite de Detección del Método

- El efecto debido a la adición del sulfato de hierro y el carbonato de calcio es inmediato, es decir, el contaminante presente en el suelo reacciona fácilmente con los agentes fijantes.
- Disminuye la concentración de arsénico lixiviable de manera considerable, alcanzando incluso concentraciones No Detectables (ND); es decir, menores o iguales que el Límite de Detección del Método, 0.0031 mg/L, y esto sucede desde el tiempo cero.

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

- La lixiviación de arsénico se mantiene prácticamente constante a lo largo del tiempo en las mezclas ME-06 y ME-07.
- En las mezclas ME-02 y ME-05, no se presenta un comportamiento constante, lo cual podría atribuirse a que las reacciones aún estarían ocurriendo.
- En todas las muestras se observa una disminución en la lixiviación de arsénico desde el primer día de la adición de los agentes fijadores.



Identificación de la muestra matriz	M (3500)	C3-2 (0.10-0.40) M	PL430 (1.00-1.20 M)	PL431 (1.80-2.10 M)
Identificación de prueba	ME-02	ME-05	ME-06	ME-07

Lixiviación de arsénico respecto al tiempo.

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

Resultados de As lixiviable mediante la prueba de lixiviación PECT.

Identificación de la muestra matriz	M (3500)		C3-2 (0.10-0.40) M		PL430 (1.00-1.20 M)		PL431 (1.80-2.10 M)	
Identificación de prueba	ME-02		ME-05		ME-06		ME-07	
Tiempo de vida (días)	As lixiviable (mg/L)	pH	As lixiviable (mg/L)	pH	As lixiviable (mg/L)	pH	As lixiviable (mg/L)	pH
144	--------	-------	--------	--------	0.052	7.10	0.066	7.00
305	--------	-------	0.046	7.508	-------	-------	-------	-------
391	0.131	8.185	-------	-------	-------	-------	-------	-------

- Las muestras no presentan toxicidad al ambiente.
- Para la mezcla ME-02 se realizó el análisis a los 391 días (1 año con 26 días), obteniendo una concentración de arsénico lixiviable de 0.131 mg/L, la cual se encuentra 38 veces por debajo del LMP. Mientras que, para la mezcla ME-05 se tiene un valor de 0.046 mg/L (108 veces por debajo del LMP) de arsénico a 305 días.
- Las mezclas ME-06 y ME-07 se analizaron a los 144 días, obteniendo valores de 0.052 mg/L (96 veces debajo del LMP) y 0.066 mg/L (75 veces debajo menor que el LMP), respectivamente.

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

- Se observa que la lixiviación del contaminante es independiente de su concentración total inicial.

- La concentración lixiviable de plomo en las mezclas oscila entre 69 y 208 veces por debajo del LMP (5 mg/L). Si consideráramos un límite permisible igual para el níquel y el cobre, el valor máximo de concentración lixiviable se encontraría 22 veces por debajo a lo permitido para el níquel y 51 veces en el caso del cobre.

Comparativa entre la concentración total y lixiviable de los principales metales de interés (arsénico, cobre, níquel y plomo)

ID Muestra	ME-02 (391 DÍAS)	ME-05 (305 DÍAS)	ME-06 (144 DÍAS)	ME-07 (144 DÍAS)	Concentración mayor a la "CRT" (mg/Kg)	Concentración mayor al "LMP" (mg/L)
Fecha Muestreo	28/2/2023	13/3/2023	14/2/2023	14/2/2023		
Arsénico total (mg/Kg)	9,164.3	18,672.8	45,462.9	46,404.7	260	
Arsénico lixiviable (mg/L)	0.131	0.046	0.052	0.066		5
Cobre total (mg/Kg)	1,442.68	1,042.58	1,112.47	1,039.93		
Cobre lixiviable (mg/L)	0.097	0.016	0.039	0.034		
Níquel total (mg/Kg)	86.7	21.6	27	20.7	20000	
Níquel lixiviable (mg/L)	0.218	0.021	0.084	0.079		
Plomo total (mg/Kg)	10.3	43.9	23.6	15	800	
Plomo lixiviable (mg/L)	0.034	0.024	0.072	0.041		5

CRT: Concentración de Referencia Total establecida en la Norma Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004

LMP: Límite Máximo Permisible de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

Interpretación

- El $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ juega un papel importante en la retención del arsénico, debido a su alta capacidad para fijarlo e inmovilizarlo. Los oxihidróxidos de Fe se pueden formar por precipitación directa a partir de soluciones de sales de Fe (III) o por oxidación seguida de hidrólisis de soluciones de sales de Fe (II). Los compuestos formados poseen una elevada superficie especifica que facilita la retención del arsénico, especialmente en condiciones oxidantes, como las que se presentan en el sitio de estudio (Miretzky y Cirelli, 2010).

- La FQ es bien conocida como técnica de remediación para suelos contaminados con diversos metales como cobre, cadmio, níquel, plomo, zinc, entre otros; ya que reduce la movilidad del o los contaminantes por el redireccionamiento de la especiación química en favor de fases menos solubles o lábiles. El uso de $CaCO_3$ favorece el incremento del pH fuertemente ácido que presenta el suelo contaminado. Al neutralizar los residuos ácidos; incrementa la formación de especies menos móviles de cobre, níquel y plomo. En tanto que, en suelos con alto pH los carbonatos pueden jugar un papel importante en la retención de arseniato (Zhang y Selim, 2008).

- Sumado al comportamiento que el arsénico, cobre, níquel y plomo muestran ante el $CaCO_3$, se conocen diversos procesos fisicoquímicos en presencia de compuestos de hierro y materiales arcillosos (suelos predominantes en el área de interés).

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

4. CONCLUSIONES

- El tratamiento por FQ permite la disminución de la lixiviación de los contaminantes. Las pruebas realizadas de fijación química de los suelos contaminados con arsénico, permitieron evaluar la factibilidad técnica del uso de sulfato de hierro heptahidratado y carbonato de calcio como agentes inmovilizadores, asegurando la no toxicidad al ambiente al obtener concentraciones lixiviables de los metales normados (arsénico y plomo) inferiores al límite máximo permisible establecido en la NOM-052-SEMARNAT-2005.
- El uso de $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ y $CaCO_3$ como agentes inmovilizadores del arsénico, cobre, níquel y plomo en el suelo presentan ventajas económicas frente a otras técnicas como la Solidificación/Estabilización al reducir el uso de insumos, tales como, el cemento; lo que conlleva a que esta técnica sea más viable económicamente.
- Es importante destacar que, al encontrarse principalmente suelos arcillosos en el área de interés, se cuenta con la ventaja de su gran capacidad para adsorber y formar complejos de arsénico, cobre, níquel y plomo, lo cual funciona o actúa a modo de “sumideros”, es decir, fungen como enormes almacenes, en los cuales los contaminantes quedan confinados de forma prácticamente irreversible.
- Se debe considerar que la efectividad de la fijación química se debe a que la estabilización de los contaminantes no está contralada por una única reacción, sino que, se presentan diversos mecanismos de adsorción, absorción, complejación y precipitación sobre superficies minerales.

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

REFERENCIAS

- Adnan, M., Xiao, B., Ali, M. U., Xiao, P., Zhao, P., Wang, H. y Bibi, S. 2024. Heavy metals pollution from smelting activities: A threat to soil and groundwater. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 274, 116189.
- Caporale, A. G. y Violante, A. 2016. Chemical processes affecting the mobility of heavy metals and metalloids in soil environments. *Current Pollution Reports*, 2, 15-27.
- Electric Power Research Institute y Southern Company Generation. 2007. In Situ Chemical Fixation of Arsenic-Contaminated Soil: Literature Review and Laboratory Treatability Study. EPRI, Palo Alto, CA and Southern Company Generation, Birmingham, AL: 2007. 1014056.
- Gómez-Puentes, F. J., Reyes-López, J. A. y Amado-Moreno, M. G. 2020. Fraccionamiento de metales pesados en un suelo contaminado del Valle de Mexicali. Revista Tecnología en Marcha, 33(4), 103-113.
- Guo, G., Zhou, Q. y Ma, L. Q. 2006. Availability and assessment of fixing additives for the in-situ remediation of heavy metal contaminated soils: a review. *Environmental monitoring and assessment*, 116, 513-528.
- Hu, L. F., Feng, H. J., Wu, Y. Y., Long, Y. Y., Wang, J. y Shen, D. S. 2010. A comparative study on stabilization of available As in highly contaminated hazardous solid waste. *Journal of hazardous materials*, 174(1-3), 194-201.
- Miretzky, P. y Cirelli, A. F. 2010. Remediation of arsenic-contaminated soils by iron amendments: a review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, *40*(2), 93-115.
- Reyes, Y., Vergara, I., Torres, O., Lagos, M. D. y Jimenez, E. E. G. 2016. Contaminación por metales pesados: Implicaciones en salud, ambiente y seguridad alimentaria. *Ingeniería Investigación y Desarrollo*: I2+ D, 16(2), 66-77.
- Xie, Z. M. y Naidu, R. 2006. *Factors influencing bioavailability of arsenic to crops* (Doctoral dissertation, CSIRO Publishing).
- Yang, L., Donahoe, R. J. y Redwine, J. C. 2007. In situ chemical fixation of arsenic-contaminated soils: An experimental study. *Science of the Total environment*, 387(1-3), 28-41.
- Zhang, H. y Selim, H. M. (2008). Reaction and transport of arsenic in soils: equilibrium and kinetic modeling. Advances in Agronomy, 98, 45-115.

GEOLYMA
GEOLOGÍA Y MEDIO AMBIENTE, S.A. DE C.V.

GRACIAS

www.geolyma.com.mx