

Capacidad quelatante del quitosano sobre el arsénico soluble en dos fluvisoles de una zona árida de México

Quitating capacity of the chitosan over the soluble arsenic in two fluvisols from an arid zone of Mexico

Karla Janeth Martínez-Macías^{1,2}, Miguel Ángel Segura-Castruita³ ,
Jorge Arnaldo Orozco-Vidal³, Guillermo Hernández-Ordaz¹ y José Ernesto Frías-Ramírez¹

¹ Tecnológico Nacional de México/IT de Torreón; ² Estudiante de Maestría, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Antigua Carretera Torreón-San Pedro km 7.5, ejido Ana. 27170 Torreón, Coahuila, México.

³ Autor para correspondencia (joorvi66@hotmail.com)

³ Tecnológico Nacional de México/IT de Tlajomulco, División de Estudios de Posgrado e Investigación. Carretera a San Miguel Cuyutlán km 10. 45640 Tlajomulco de Zúñiga, Jalisco, México.

RESUMEN

El quitosano en perlas y pH ácido (Q) tiene la capacidad de adsorber arsénico (As) del agua. El Q podría adsorber el As que se encuentra en la solución del suelo. El objetivo de esta investigación fue evaluar la capacidad quelatante del Q ajustado a pH ácido y neutro para disminuir concentración de As soluble en dos Fluvisoles. Para llevar a cabo el experimento se acondicionó Q a dos pH (5 y 7) con la adición de ácido sulfúrico y se dejó Q sin tratar para usarlo como testigo. Se ensayaron cuatro tratamientos (suelos sin Q, con Q sin tratar, con Q ajustado a pH 5 y con Q ajustado a pH 7). Cada tratamiento se condujo por cuadruplicado, haciendo un total de 16 unidades experimentales para cada suelo. Cada unidad experimental consistió de 500 g de suelo empaquetado en una bolsa de plástico, a la cual se le añadió un fertilizante fosfatado (200 mg kg⁻¹) y se llevó a capacidad de campo, dejándola reposar por 48 h. Al cumplirse el tiempo de reposo, se agregaron a cada bolsa 0.063 g de Q del tratamiento correspondiente y su respectiva réplica, dejándolas en incubación durante 48 h a una temperatura de 25 °C. El diseño experimental empleado fue completamente al azar. A los suelos se les determinó el contenido de As soluble mediante una extracción con agua desionizada y lo extractado se midió por el método de espectrofotometría de absorción atómica con

generación de hidruros. Los datos se sometieron a un análisis de varianza y una prueba de medias (Tukey, $P \leq 0.05$). Los resultados demostraron que el quitosano ajustado con ácido sulfúrico a pH 5, (QpH5) adsorbió la mayor cantidad de As soluble (640%). Lo que representa una alternativa de recuperación de suelos contaminados con As.

Palabras clave: arseniatos, contaminación, metaloides.

SUMMARY

Chitosan in pearls and acidic pH (Q) has the ability to adsorb arsenic (As) from water. The Q could adsorb the As found in the soil solution. The objective of this research was to evaluate the chelating capacity of Q adjusted to acidic and neutral pH to decrease the concentration of soluble As in two Fluvisols. To carry out the experiment, Q was conditioned at two pH (5 and 7) with the addition of sulfuric acid and Q was left untreated for use as a control. Four treatments were tested (soils without Q, with untreated Q, with Q adjusted to pH 5 and with Q adjusted to pH 7). Each treatment was conducted in quadruplicate, making 16 experimental units for each soil. Each experimental unit consisted of 500 g of soil packed in a plastic bag, to which a phosphate fertilizer (200 mg kg⁻¹) was added and brought to field capacity, leaving it to stand for

Cita recomendada:

Martínez-Macías, K. J., M. Á. Segura-Castruita, J. A. Orozco-Vidal, G. Hernández-Ordaz y J. E. Frías-Ramírez. 2020. Capacidad quelatante del quitosano sobre el arsénico soluble en dos fluvisoles de una zona árida de México. *Terra Latinoamericana* 38: 267-273.
DOI: <https://doi.org/10.28940/terra.v38i2.472>

Recibido: 25 de noviembre de 2018.

Aceptado: 15 de enero de 2020.

Publicado en *Terra Latinoamericana* 38: 267-273.

48 h. Upon completion of the resting time, 0.063 g of Q of the corresponding treatment and its respective replicate were added to each bag, leaving them in incubation for 48 h at a temperature of 25 °C. The experimental design used was completely random. To the soils, the soluble As content was determined by an extraction with deionized water and the extracted was measured by the method of atomic absorption spectrophotometry with hydride generation. The data was subjected to an analysis of variance and a test of means (Tukey, $P \leq 0.05$). The results showed that the chitosan adjusted with sulfuric acid at pH 5, (QpH5) adsorbed the greatest amount of soluble As (640%). Which represents an alternative for the recovery of soils contaminated with As.

Index words: *arsenates, pollution, metalloids.*

INTRODUCCIÓN

Las concentraciones anómalas de metales y metaloides en los suelos pueden deberse básicamente a causas naturales o antropogénicas y representan un riesgo para la salud del hombre y los ecosistemas debido a su toxicidad y tendencia a bioacumularse en diferentes cultivos (Martí *et al.*, 2011). La Comarca Lagunera ubicada en el centro norte de México, es una de las regiones más prósperas de México, donde se encuentran los primeros sitios de exploración de oro, plata, y materiales no ferrosos, pero también ocupa el primer lugar en la producción de leche, carne de aves y forrajes (SAGARPA, 2010). El desarrollo de las actividades agropecuarias e industriales junto con el material parental, que se caracteriza por presentar contenidos de arsénico (As) de fácil disolución y transporte, ha provocado elevadas concentraciones de As en suelo (3.69 mg kg^{-1}), agua potable (0.12 mg L^{-1}) y agua subterránea (0.718 mg L^{-1}) en esta región (Rangel *et al.*, 2015; Ríos *et al.*, 2008). En el suelo puede permanecer en dos estados de oxidación, como arsenitos (AsO_3) o como arseniatos (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. El tipo de arcilla y los óxidos e hidróxidos de hierro juegan un papel importante en la movilidad del arsénico en el suelo (Jordanova *et al.*, 2013) y por lo tanto en su disponibilidad en el sistema agua-suelo-planta. Uno de los vectores antrópicos que influyen en la presencia

de As soluble en los suelos agrícolas, es la aplicación de fósforo (P) como fertilizante, pues los iones fosfato desplazan a los arseniatos de los sitios de intercambio, convirtiendo a este metaloide en disponible cuando existe agua en los poros del suelo (Yokoyama *et al.*, 2012). Actualmente se utilizan diferentes tecnologías para la remediación de suelos contaminados con metales pesados y metaloides, las cuales se clasifican en tratamientos térmicos, físico-químicos y biológicos, dentro del cual se encuentra el uso de agentes quelatantes (Codling, 2011). Un quelato es un compuesto químico en el que una molécula orgánica rodea y se enlaza, por medio de los llamados pares de iones enlazantes que dona a un ion metálico, de manera que lo protege de cualquier acción desde el exterior evitando su hidrólisis y precipitación (Perea *et al.*, 2010). Algunos materiales quelatantes son biopolímeros, compuestos de alto peso molecular, entre los que se encuentra el quitosano, uno de los pocos polisacáridos catiónicos naturales, el cuál es soluble en medios ácidos o soluciones neutras, además de ser extensivamente estudiado por ser biodegradable, biocompatible, hidrofílico, no tóxico y anti-fúngico (Bautista-Baños *et al.*, 2005). Diferentes estudios han demostrado que el quitosano con pH neutro o ácido es capaz de adsorber As del agua (Montero *et al.*, 2010). Sin embargo, existe escasa información acerca de la efectividad del quitosano en la quelación de As en suelos. El suelo desde el punto de vista físico, se considera como un sistema trifásico, formado por sólidos, líquidos y gases, donde la parte líquida se conoce como solución del suelo. La solución del suelo es agua con una mezcla de diferentes iones y compuestos orgánicos disueltos que se ubica en los poros del suelo (Brady y Weil, 2008).

Al considerar el efecto de las formas de P (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}), existentes en pH de suelos agrícolas, facilitan la desorción del As adsorbido a las partículas de tamaño arcilla del suelo, en condiciones de humedad, incrementado la concentración de arseniatos en la solución del suelo. La acción quelatante del quitosano sobre el As (arseniato) en agua, permite deducir que el quitosano podría adsorber As soluble de la solución del suelo siempre y cuando el quitosano tuviera un pH ácido, debido a las condiciones de alcalinidad de los suelos de la Comarca Lagunera. Por lo tanto, los objetivos de esta investigación fueron determinar la capacidad quelatante del quitosano en condiciones ácidas y neutras para disminuir la concentración de As disponible en dos Fluvisoles de la Comarca Lagunera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en el laboratorio del Instituto Tecnológico de Torreón, en Torreón Coahuila, México. El clima de la región es un Bw (h') hw (e), que corresponde a un seco desértico cálido con régimen de lluvias en verano y oscilación extrema (García, 2004) con rangos de temperatura que van desde los 4° hasta más de 30 °C, y precipitación media anual de 250 mm concentrada de junio a septiembre (INEGI, 2017). La flora está compuesta por matorral desértico con especies características como: mezquite, huizache, palmas y gobernadora; y la fauna por lagartijas, liebres, coyotes y víboras (Ontiveros-Arzaga, 2010). Las formaciones geológicas datan desde del Paleozoico al reciente aluvión cuaternario, y se compone tanto de depósitos sedimentarios (calizas, dolomitas, yeso, arenas arcillosas y conglomerados), como de rocas ígneas (depósitos volcánicos y granito) que contienen entre 25 y 25 mg kg⁻¹ de As (Mejía-González *et al.*, 2014). Los grupos de suelos que existen en la región son Feozems, Regosoles, Calcisoles, Fluvisoles y Vertisoles (INEGI, 2016).

El estudio se dividió en las siguientes etapas: a) selección y colecta de suelo, b) instalación y ejecución del experimento, c) análisis de laboratorio y d) análisis estadísticos.

Selección y colecta de suelo. Se seleccionaron dos sitios con suelos que de acuerdo a la literatura presentaban elevados contenidos de arsénico (Figura 1). Un Fluvisol eutri-háplico que se localiza en los 25° 46' 36.0" N y 103° 16' 48.9" O, y se ubica en el ejido Fresno del Norte, municipio de Francisco I. Madero, Coahuila (Suelo 1). Así como un Fluvisol calci-arídico (Suelo 2) del ejido la Concha (25° 38' 06.2" N 103° 22' 55.3" O), municipio de Torreón, Coahuila (Hernández *et al.*, 2013). De cada parcela seleccionada se colectaron 15 submuestras de suelo de la capa superficial (30 cm de profundidad, aproximadamente). Cada submuestra fue de aproximadamente 20 kg, las que se mezclaron homogéneamente para obtener una muestra compuesta. Para este fin se siguieron las normas NOM-021-SEMARNAT-2000 y NMX-AA-132-SCFI-2016 (SEMARNAT, 2002; NMX, 2016).

A la muestra compuesta de suelo se le determinaron características físicas y químicas como análisis mecánico de partículas (método de la pipeta), clase textural, densidad aparente (Da), por el método del terrón parafinado, constantes de humedad (capacidad de campo, CC), por el método de la olla de presión, capacidad de intercambio catiónico (CIC, con el acetato de amonio pH 7), materia orgánica (MO, por el método de combustión húmeda), As soluble (por absorción atómica con generación de hidruros), pH (en agua

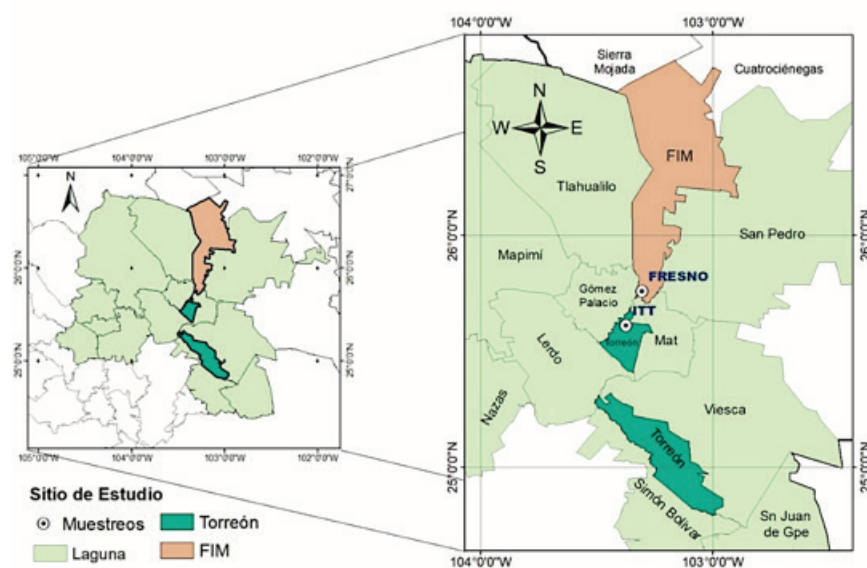


Figura 1. Localización de los sitios de muestreo.
Figure 1. Location of the sampling sites.

2:1) y conductividad eléctrica (CE, pasta saturada), de acuerdo a los procedimientos de la Norma NOM-021-SEMARNAT-2002 (SEMARNAT, 2002).

Cada suelo homogenizado se separó en 16 bolsas de plástico con 500 g de cada suelo, para tener un total de 32 bolsas. A 24 de estas bolsas con suelo se adicionaron 50 ml de una solución de fósforo con 200 mg kg⁻¹ con el fin de simular la fertilización con fósforo, a las cuales, junto con el resto de las bolsas (ocho, cuatro para cada suelo) se llevaron a CC con agua destilada, y se dejaron en incubación durante 48 h a una temperatura constante de 30 °C (Hernández *et al.*, 2013).

Instalación y ejecución del experimento. El compuesto experimental como presunto agente quelatante del As fue quitosano en perlas (Q), producto elaborado a partir del citoesqueleto de camarones, con acetilación $\geq 12.8\%$, el que se llevó a diferentes pH, de acuerdo al método propuesto por Montero *et al.* (2010). Los tratamientos ensayados fueron cuatro niveles de Q en forma de perlas (sin Q, Q sin tratar, Q ajustado con solución ácida a pH 5 y Q ajustado con solución ácida a pH 7); el ajuste del pH de Q se realizó agregando ácido sulfúrico 0.5 M. Cada tratamiento se llevó por cuadruplicado. De tal manera, que se tuvieron 16 unidades experimentales, distribuidas en un diseño experimental completamente al azar por cada suelo. Una vez que se cumplió el tiempo de incubación del suelo con fósforo, se adicionaron 0.06 g de Q en forma de perlas a los tratamientos con Q y a las réplicas correspondientes, para conocer la influencia del Q en la disminución del As en solución. Tratamientos y réplicas se sometieron nuevamente a incubación durante 48 h a una temperatura constante de 25 °C, con el fin de acelerar la cinética entre As y Q. Finalmente, los suelos de tratamientos y réplicas de cada suelo se sometieron a secado a la sombra y a temperatura ambiente.

Análisis de laboratorio. Los suelos tratados y sus respectivas réplicas se les determinó el contenido de As soluble. La extracción del As soluble se realizó con agua desionizada (Otones *et al.*, 2011), extractos que se analizaron por el método de espectrofotometría de absorción atómica con generación de hidruros (AAS-GH) en un equipo GBC modelo XplorAA (Litter *et al.*, 2009), lo anterior para verificar el contenido de As disponible en los suelos tratados con quitosana.

Análisis estadístico. Los resultados se sometieron a un análisis de varianza para determinar si la disminución del As disponible en la solución del suelo fue igual

en los tratamientos con Q, y un análisis de efectos principales de la adición de quitosano en cada suelo (Yescas *et al.*, 2015); así como una prueba de separación de medias por Tukey ($P \leq 0.05$) para cada suelo, con el software estadístico Minitab 17 (Minitab Inc., 2013).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características de los suelos muestran que la capa superficial está ligeramente compactada, lo cual se puede deber a las actividades agrícolas que se desarrollan en los diferentes lugares, así como las partículas que integran al suelo, ya que al ser francos (Cuadro 1) se provoca el endurecimiento de los suelos (Huang *et al.*, 2011).

Lo anterior está relacionado con los bajos contenidos de MO, que corresponde a suelos de regiones áridas (Montaño *et al.*, 2016) como los suelos de esta investigación. Estas características corresponden a la baja CIC que se encontró. Asimismo, la concentración de As soluble en estos suelos, cuando no se han agregado fosfatos como fertilizantes, resultó similar al reportado en la literatura (Hernández *et al.*, 2013).

El fertilizante fosfatado provocó que el As se incrementara hasta 0.37 mg kg⁻¹ para el suelo de Fresno del Norte, mientras que en el suelo de la Concha fue un incremento de 0.49 mg kg⁻¹.

Cuadro 1. Características físicas y químicas de los suelos de estudio.

Table 1. Physical and chemical characteristics of the study soils.

Característica	Fluvisol eutri-háplico	Fluvisol calci-árido
Arena (%)	19.9	66.2
Limo (%)	58.0	13.4
Acilla (%)	22.1	20.4
Clase textural	Franco limoso	Franco arenoso
Da (g cm ⁻³)	1.59	1.43
CC	22.1	18.3
MO (%)	1.28	2.00
CIC (cmol ₍₊₎ kg ⁻¹)	16.33	18.5
pH	8.4	8.14
CE (dS m ⁻¹)	0.50	2.13
As (mg kg ⁻¹)	0.30	0.34

El Q tuvo un efecto significativo (Tukey, $P \leq 0.05$) en la concentración de As, independientemente de la forma y característica química que se haya agregado, ya que se detectó una disminución en la concentración del As soluble en ambos suelos (Cuadro 2). El As soluble de los suelos en el tratamiento 4 (QpH5), tanto en el suelo del Fresno del Norte como en el suelo de la Concha, presentó la menor concentración (0.05 mg kg^{-1} y 0.10 mg kg^{-1} , respectivamente); es decir, QpH5 adsorbió un 640% y un 390% del As soluble que se presentó en los suelos después de fertilizar con fósforo y sin Q (Cuadro 2).

Estos resultados se pueden deber al pH ácido del quitosano, ya que a estos pH los grupos amino libres en el quitosano actúan como sitios de unión de coordinación para metales, lo cual es un mecanismo complejo que implica la quelación de estos iones en soluciones cercanas a la neutra, el intercambio iónico y la adsorción (Chen y Chung, 2006; Montero *et al.*, 2010). Asimismo, los metales pesados y metaloides como el As muestran gran afinidad por determinados grupos funcionales como grupos sulfhídrico, radicales amino, fosfato, carboxilo e hidroxilo (Mejía-González *et al.*, 2014).

Por otra parte, la capacidad de adsorción de un suelo está afectada por su textura, contenido en sesquióxidos y por la presencia de otros elementos que puedan interferir en el proceso de adsorción (Carbonell-Barrachina *et al.*, 2004). En este sentido, al considerar el pH de la solución del suelo donde se encontraban el As soluble y la presencia de un agente con pH ácido del quitosano, el As se adsorbió a este polisacárido, razón por la cual disminuyó la concentración del ion en los suelos. Este comportamiento puede explicarse

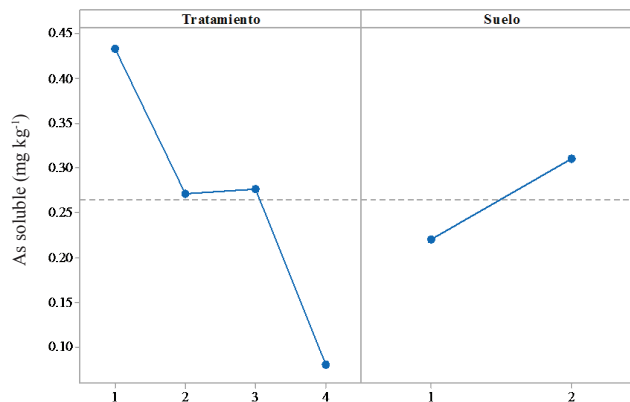


Figura 2. Efectos principales de tratamientos y los suelos en el As soluble.

Figure 2. Main effects of treatments and soils on soluble As.

porque la fracción de grupos amino protonados se incrementa a pH ácido, por lo que aumenta la afinidad por los aniones arseniatos (Dambies *et al.*, 2002), como lo reafirmó Wang *et al.* (2016) al reportar que la eficiencia del quitosano se incrementa a un pH de 5.5.

El efecto diferencial del quitosano en cada uno de los suelos se debió principalmente a las características físicas y químicas de los suelos, como lo muestra la gráfica de efectos principales, donde el suelo de la Concha presentó una concentración promedio de As soluble (0.32 mg kg^{-1}) mayor que 0.22 mg kg^{-1} del suelo del Fresno del Norte (Figura 2). Este mismo análisis resalta el efecto de los diferentes tratamientos de quitosano en los suelos, donde el As soluble en los suelos con el tratamiento cuatro, como se ha mencionado anteriormente, presentó la menor

Cuadro 2. Cambios en la concentración de arsénico soluble en los suelos tratados con quitosano.

Table 2. Changes in the concentration of soluble arsenic in the soils treated with chitosan.

Tratamiento	Característica	Fluvisol eutri-háplico		Fluvisol calci-árido	
		As soluble	Cambio en concentración	As soluble	Cambio en concentración
		mg kg^{-1}	%	mg kg^{-1}	%
T1	Sin Q	0.37 d†	-	0.49 c	-
T2	Q sin tratar	0.26 b	42.30	0.31 b	58.0
T3	QpH7	0.32 c	15.62	0.31 b	58.0
T4	QpH5	0.05 a	640.00	0.10 a	390.0

† Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$).

† Different letters in the same column indicate significant differences, according to the Tukey test ($P \leq 0.05$).

concentración de este metaloide en la solución del suelo.

Aunque es importante resaltar que la concentración de As soluble en el suelo de la Concha (0.10 mg kg^{-1}) fue mayor que el As disponible (0.05 mg kg^{-1}) de Fresno del Norte. De acuerdo con Hernández *et al.* (2013), el suelo de la concha tiene una mayor cantidad de carbonatos de calcio y concluyeron que este compuesto estaba relacionado con la presencia de As soluble en esos suelos e incluso indicaron que la concentración de As soluble se incrementó alrededor de un 600%. Si se recuerda que a los dos suelos se les agregó la misma cantidad de quitosano, es probable que al suelo de la Concha se haya tenido que agregar una mayor cantidad de este compuesto (debido a que la concentración inicial de As fue mayor en este suelo) ya que lo adicionado posiblemente no adsorbió la suficiente cantidad de este contaminante y por lo tanto no disminuyó el As soluble; es decir, se tenía que haber considerado la cantidad de As disponible después de agregar el P para hacer la estimación del quitosano a agregar.

CONCLUSIONES

El quitosano ajustado a pH 5 (ácido) que se adicionó a un Fluvisol eutri-háplico y a un Fluvisol calci-árido en una región árida de Coahuila, cultivados y fertilizados con fósforo, redujo la concentración de arsénico (As) soluble de la solución del suelo en estas subunidades. Por lo tanto, el quitosano con pH ácido representa una alternativa para la recuperación de suelos contaminados con As. No obstante, su eficacia estará en función de la concentración del As soluble después de agregar fósforo como fertilizante. Lo anterior lleva a concluir que se requiere de mayor investigación para comprobar la efectividad de este material en la recuperación de otros suelos de regiones áridas, comprobar la cantidad adecuada de quitosano a adicionar, comparar otras combinaciones o tratamientos con quitosano; asimismo, determinar la estabilidad de la quelación Q-As ante la degradación natural de éste, y que no represente un contaminante potencial para los suelos recuperados.

AGRADECIMIENTOS

Al Tecnológico Nacional de México por el financiamiento del Proyecto No. 65968.18-P. A la Dra. Keiko Shirai Matsumoto y laboratorio de biopolímeros

de la Universidad Autónoma Metropolitana por las facilidades prestadas para la obtención del quitosano.

LITERATURA CITADA

- Bautista-Baños, S., A. N. Hernández-Lauzardo, M. G. Velázquez del Valle, E. Bosquez-Molina y D. Sánchez-Domínguez. 2005. Quitosano: Una alternativa natural para reducir microorganismos postcosecha y mantener la vida de anaquel de productos hortofrutícolas. *Rev. Iberoam. Tecnol. Postcos.* 7: 1-6.
- Brady, N. C. and R. R. Weil. 2008. *The nature and properties of soils.* Pearson Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ, USA.
- Carbonell-Barrachina, A. A., F. M. Burló-Carbonell y J. J. Mataix-Beneyto. 1995. *Arsénico en el sistema suelo-planta.* Espagrafic. Alicante. España. ISBN: 84-7908-192-9.
- Chen, C. C. and Y. C. Chung. 2006. Arsenic removal using a biopolymer chitosan sorbent. *J. Environ. Sci. Health A* 41: 645-658. doi: <https://doi.org/10.1080/10934520600575044>.
- Codling, E. 2011. Environmental impact and remediation of residual lead and arsenic pesticides in soil. pp. 169-180. *In:* M. Stoycheva (ed.). *Pesticides in the modern world-risk and benefits.* ISBN: 978-953-307-458-0.
- Dambies, L., T. Vincent, and E. Guibal. 2002. Treatment of arsenic containing solutions using chitosan derivatives: uptake mechanism and sorption performances. *Water Res.* 36: 3699-3710. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00108-2](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00108-2).
- García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen.* Instituto de Geografía, UNAM. México, D. F., México.
- Hernández O., G., M. A. Segura C., L. C. Álvarez G., R. A. Aldaco N., M. Fortis H. y G. González C. 2013. Comportamiento del arsénico en suelos de la región Lagunera de Coahuila, México. *Terra Latinoamericana* 31: 295-303.
- Huang, P. M., Y. Li, and M. E. Sumner. 2011. *Handbook of soil sciences: resource management and environmental impacts.* CRC Press. Boca Raton, FL, USA. ISBN-10: 1439803072.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2016. Sistema de descarga de productos digitales. <<http://www.beta.inegi.org.mx/temas/mapas/edafologia/>> (Consulta: mayo 30, 2018).
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2017. Cuéntame... Información por entidad. Coahuila. México. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/coah/territorio/clima.aspx?tema=me&e=05> (Consulta: abril 25, 2017).
- Litter, M. I., M. A. Armenta y S. S. Farías. 2009. *IBEROARSEN Metodologías analíticas para la determinación y especiación de arsénico en aguas y suelos.* CYTED. Buenos Aires, Argentina. ISBN: 978-84-96023-71-0.
- Martí, L., M. F. Filippini, C. Salcedo, A. Drovandi, S. Troilo y A. Valdés. 2011. Evaluación de metales pesados en suelos de los oasis irrigados de la Provincia de Mendoza: I. Concentraciones totales de Zn, Pb, Cd y Cu. *Rev. FCA UNCUIYO* 43: 203-221.
- Mejía G., M. Á., L. González H., R. Briones G., A. Cardona B. y P. Soto N. 2014. Mecanismos que liberan arsénico al agua subterránea de la Comarca Lagunera, estados de Coahuila y Durango, México. *Tecnol. Cienc. Agua* 5: 71-82.
- Minitab Inc®. 2013. Minitab Inc.: State Collage, Minitab Inc.

- Montaño, N. M., F. Ayala, S. H. Bullock, O. Briones, F. García O., R. García S., Y. Maya, Y. Perroni, C. Siebe, Y. Tapia T., E. Troyo y E. Yépez. 2016. Almacenes y flujos de carbono en ecosistemas áridos y semiáridos de México, Síntesis y perspectivas. *Terra Latinoamericana* 34: 39-59.
- Montero Á., J., M. Paredes B. y M. Rivera M. 2010. Utilización de quitosana para la remoción de arsénico (As) en agua. *Superf. Vacío* 23: 136-139.
- NMX (Norma Mexicana). 2016. NMX-AA-132-SCFI-2016 Muestreo de suelos para la identificación y la cuantificación de metales y metaloides, y manejo de la muestra (Cancelará a la NMX-AA132-SCFI-2006). México, D. F.
- Ontiveros-Arzaga, M. E. 2010. Programa elaboración de casos de éxito de innovación en el sector agroalimentario. Maíz forrajero: Patronato de investigación agropecuaria de la Laguna A.C. Fundación Produce Coahuila. <https://www.redinnovagro.in/casosexito/14coahuilaforraje.pdf> (Consulta: mayo 30, 2018).
- Otones, V., E. Álvarez-Ayuso, A. García-Sánchez, I. Santa-Regina, and A. Murciego. 2011. Arsenic distribution in soils and plants of an arsenic impacted former mining area. *Environ. Pollut.* 159: 2637-2647. doi: <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.05.027>.
- Perea, E., D. Ojeda, A. Hernández, T. Ruíz y J. Martínez. 2010. Utilización de quelatos en la agricultura. *Rev. Synthesis* 53: 1-5.
- Rangel M., E. A., L. Montañez H., M. P. Luévanos E. y N. Balagurusamy. 2015. Impacto del arsénico en el ambiente y su transformación por microorganismos. *Terra Latinoamericana* 33: 103-118.
- Ríos F., J. L., M. Torres M., S. Flores A., J. Cantú B., M. Hernández M. y E. Valdéz M. 2008. Producción, productividad y rentabilidad de maíz forrajero (*Zea mays*) en la Laguna de 1990 a 2006. *Rev. Chapingo Ser. Zonas Áridas* 1: 139-144.
- SAGARPA (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación). 2010. El suelo y la producción agropecuaria. INCA, SIAP, SAGARPA. México, D. F.
- SEMARNAT (Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales). 2002. NOM-021-RECNAT-2000 Norma Oficial Mexicana. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. SEMARNAT. México, D. F.
- Wang, X., Y. Liu, and J. Zheng. 2016. Removal of As (III) and As (V) from water by chitosan and chitosan derivatives: A review. *Environ. Sci. Pollut. Res.* 23: 13789-13801. doi: <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6602-8>.
- Yescas, C., P., M. A. Segura-Castruita, V. P. Álvarez R., J. A. Montemayor T., J. A. Orozco V. y J. E. Frías R. 2015. Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. *Phyton* 84: 272-279.
- Yokoyama, Y., K. Tanaka, and Y. Takahashi. 2012. Differences in the immobilization of arsenite and arsenate by calcite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 91: 202-219. doi: <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.05.022>.