

INFLUENCIA DEL ENDORREÍSMO HIDROLÓGICO Y LA ARIDEZ CLIMÁTICA EN EL ARSÉNICO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DE LA REGIÓN LAGUNERA, MÉXICO

IMPORTANCE OF INLAND HYDROLOGY AND CLIMATIC ARIDITY ON GROUNDWATER ARSENIC OF LAGUNERA REGION, MEXICO

J. L. González-Barrios¹, G. Gonzalez -Cervantes¹, L. M. Valenzuela-Núñez,
J. A. Muñoz-Villalobos, V. Valles²

¹ INIFAP CENID-RASPA A.P. 225-3 Parque Industrial Gómez Palacio Durango 35070 México.

² Laboratoire d'hydrogéologie, Université d'Avignon, Francia. Correo-e: gonzalez.barrios@inifap.gob.mx

RESUMEN. Este trabajo presenta las condiciones de especiación geoquímica del arsénico en las aguas subterráneas de la Comarca Lagunera (estados de Durango y Coahuila, en el norte-centro de México). Con la ayuda de métodos geoquímicos (Alcalinidad residual generalizada) estadísticos (Análisis en componentes principales) y de modelación hidrogeológica (Hydrog Aqua) se pone en evidencia el comportamiento y el determinismo químico del arsénico en la región hidrológica 36; cuencas de los ríos Nazas y Aguanaval, donde existen tres factores importantes que explican su presencia: la aridez del clima, la naturaleza del sustrato geológico y el endorreísmo que da lugar a las condiciones de aireación-oxigenación de las aguas subterráneas. Los resultados muestran que el arsénico es de origen natural y se comporta como una sal soluble; sus formas pentavalentes son dominantes en las partes alta y media de la región hidrológica, mientras que las formas trivalentes son importantes en la parte baja, donde se ubica la Comarca Lagunera. Se concluye con la recomendación de implementar medidas técnicas y normativas urgentes con el fin de controlar y remediar la concentración y toxicidad del arsénico en las aguas subterráneas de consumo humano, mejorando con ello las expectativas y la calidad de vida de la población.

Palabras clave: Calidad del agua, geoquímica hidrológica, manejo de cuencas.

SUMMARY. This work shows the conditions of chemical speciation of arsenic in groundwater of the Comarca Lagunera (Northern Mexico). Geochemical methods (alkalinity residual generalized), statistics (Main Compounds Analysis) and hydro-geological models (Hydrog Aqua) were useful to study the chemical determinism and behavior of arsenic in the Nazas-Aguanaval watershed where there are three main factors explaining its presence: climate aridity, nature of geological substrates and endoreic conditions that are associated with oxygenation of groundwater. Results show that arsenic has a natural origin and it behaves like a soluble salt; their pentavalent forms are dominant in the upper and middle part of the watershed while trivalent forms are important in the bottom watershed where is located the Comarca Lagunera. This work concludes that it is urgent to react with the necessary techniques and laws in order to remediate and control this problem for the Comarca Lagunera population.

Keywords: Water quality, geochemical hydrology, watershed management.

INTRODUCCIÓN

El arsénico es un elemento traza que provoca problemas de toxicidad aguda o crónica en numerosos ecosistemas. Sus efectos están documentados en diferentes países como Estados Unidos, Chile, Madagascar, Bangladesh y Rusia (Semadi, 2002). El arsénico es un elemento ampliamente distribuido en la corteza terrestre en forma orgánica o mineral (Dolique, 1969); su presencia en aguas y en suelos provoca inquietud en la población por los riesgos que representa para el ambiente y la salud humana. Estudios recientes muestran que las diferentes formas disueltas no tienen la misma toxicidad (Semadi *et al.*, 2008).

Este trabajo aborda la problemática científica del arsénico contenido en las aguas subterráneas de la Comarca Lagunera (estados de Durango y Coahuila), región en donde existe un creciente interés por conocer el origen y concentración de este contaminante. Los grupos ecologistas no cesan de señalar al arsénico como un producto directo de la sobreexplotación del acuífero local por la actividad agrícola, sobre todo a la que tiene que ver con la próspera industria lechera actual. La problemática del arsénico en las aguas de uso urbano y agrícola es un asunto ampliamente difundido en los medios de comunicación de la Comarca Lagunera que hasta ahora ha informado más en base al sentir de "líderes de opinión" que en base a trabajos científicos.

MATERIALES Y MÉTODOS

La zona de estudio se localiza en la cuenca baja de los ríos Nazas y Aguanaval entre los 24° 6' y los 26° 5' de latitud norte y entre los 101° 4' y los 101° 6' de longitud oeste, en la frontera de los estados de Durango y Coahuila, México (Figura 1). Corresponde a una planicie aluvial endorreica de origen sedimentario con una superficie aproximada de 48,000 km² a una altitud entre 1,000 y 1,200 metros. Su clima es de tipo árido y continental con una temperatura media anual de 20.6 °C y una pluviometría anual inferior a los 300 mm (García, 1973; Cornet, 1988). Esta zona se beneficia de una gran cantidad de escurrimientos hídricos (1.3 km³ en promedio anual) que provienen de las cuencas altas y medias de los ríos Nazas y Aguanaval. Las aguas superficiales que antes llegaban de manera natural a esta gran planicie son almacenadas y controladas por varias presas regionales de las cuales la presa Lázaro Cárdenas (El Palmito), la presa Francisco Zarco (Las

Tórtolas) y la presa Leobardo Reynoso son las más importantes (Loyer *et al.*, 1993). Ocho acuíferos almacenan las aguas subterráneas regionales a una profundidad que varía de menos de 50 metros a más de 200 metros con una condición predominante de sobreexplotación (CNA, 2008 citado por Hernández, 2009). La mayor parte de estas aguas superficiales y subterráneas sirven para abastecer a las importantes superficies de riego en la Comarca Lagunera.

Del registro regional de aguas subterráneas para uso agrícola perteneciente al INIFAP CENID-RASPA de Gómez Palacio Durango, se seleccionaron 52 muestras de agua subterránea con datos confiables respecto al contenido de elementos traza que incluye al arsénico. Las características fisicoquímicas de las 52 muestras de agua subterránea seleccionadas abarcan además los contenidos en elementos mayores (aniones y cationes solubles), el pH y la conductividad eléctrica determinados en el laboratorio con los métodos clásicos

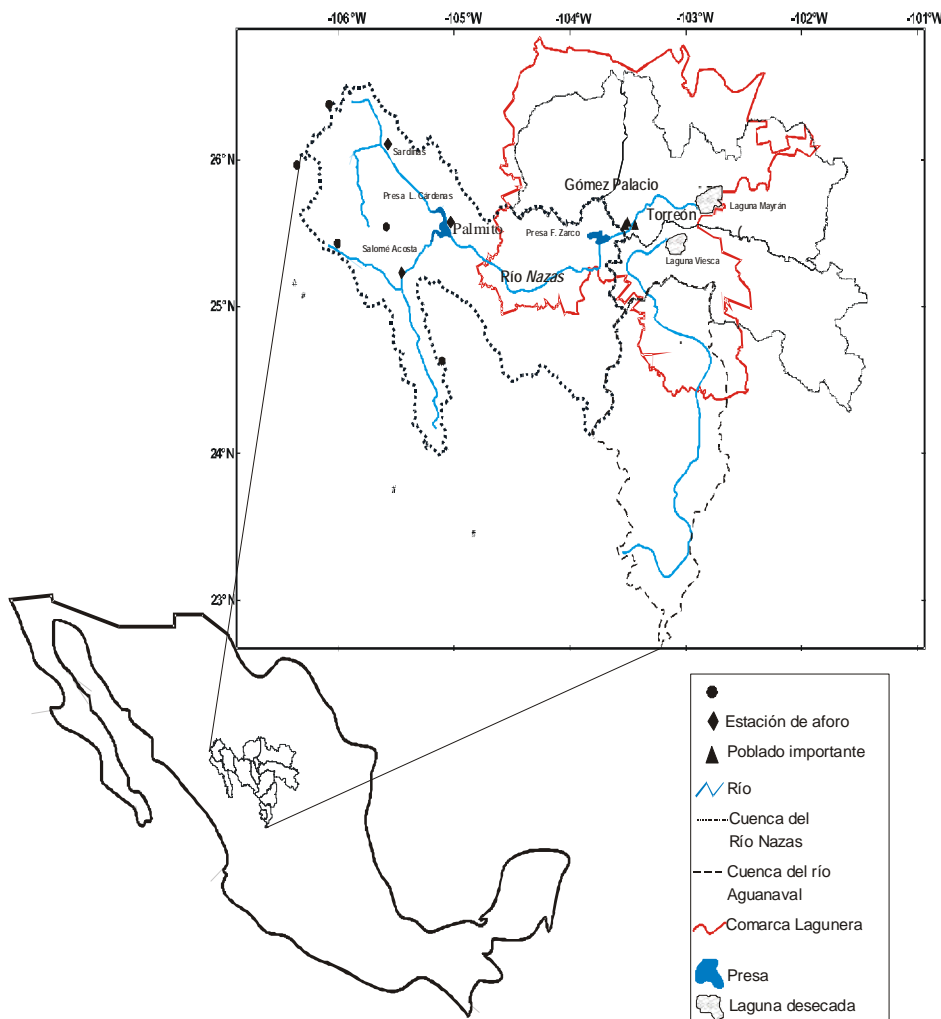


Figura 1. Localización de la zona de estudio.

pertinentes (volumetría, absorción atómica, electro-térmica, potenciométrica y conductivimétrica respectivamente).

Con los datos de los análisis completos se realizaron controles de confiabilidad y cálculos de especiación geoquímica con la ayuda del modelo Hydrog Aqua (Valles 1985; Auffan 2003), cuyos principios termodinámicos se basan en la interacción y el equilibrio químico entre el agua y minerales puros. A partir de las concentraciones totales de solutos, se estimaron las actividades de las especies geoquímicas disueltas para calcular el estado de saturación de las soluciones en relación a los minerales presentes, cuyo producto de solubilidad está registrado en tablas.

El análisis de la evolución de las soluciones se basó en el examen de los diagramas de concentración, y se adaptó a las condiciones hidrogeológicas de acuerdo a los trabajos de varios autores (Al-Droubi, 1976; Gac, 1980; Fritz, 1975; Valles, 1985 Ribolzi *et al.*, 1993). La elaboración de esos diagramas requiere la medición o la estimación del factor de concentración de las soluciones mediante un trazador de referencia (Gac, 1980; González Barrios, 1992; Barbiero, 1994).

Con el propósito de conocer si el arsénico disuelto se distribuye bajo una sola forma, se realizó una especiación de las 52 aguas subterráneas estudiadas con la ayuda del modelo de asociación iónica. Se estudiaron nueve formas principales del arsénico mineral desde aguas arriba hasta aguas abajo de la cuenca del

río Nazas. Cuando las aguas se vuelven anóxicas, se cargan en CO₂ y el potencial redox disminuye. Para los datos disponibles la presión de CO₂ (pCO₂) puede ser fácilmente estimada por la medida *in situ* del pH y los cálculos termodinámicos.

El Análisis en Componentes Principales (ACP) fue una herramienta útil para el análisis estadístico con variables múltiples, que ayudó a cuantificar y jerarquizar los diferentes mecanismos responsables de la calidad de las aguas subterráneas estudiadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las características fisicoquímicas de las 52 muestras de agua subterránea seleccionadas y sus rangos de contenidos en elementos mayores y en arsénico, son presentadas en el Cuadro I. Como se mencionó anteriormente, estas muestras pertenecen a toda la región hidrológica de acuerdo al registro regional de aguas subterráneas de uso agrícola del INIFAP CENID-RASPA. En el Cuadro I se puede observar que el contenido de arsénico en estas aguas sobrepasa de lejos las concentraciones máximas de 10 y 25 µg/l⁻¹, que corresponden a las normas internacional (OMS, 1993) y mexicana (NOM), respectivamente.

El ACP permite representar las relaciones entre variables analizadas. La Figura 2 muestra los dos primeros ejes que explican 58 por ciento de la variabilidad observada. El ejemplo número uno opone la

Cuadro 1. Características fisicoquímicas de las muestras de agua subterránea analizadas.

	Valor Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Desviación estándar	Unidad
Alcalinidad					
carbonatada	2.88E-03	1.30E-03	6.40E-03	1.13E-03	eq L ⁻¹
H	3.02E-05	5.01E-08	1.00E-04	2.48E-05	mg L ⁻¹
Na	1.84E+02	4.60E+01	8.14E+02	1.63E+02	mg L ⁻¹
Ca	1.11E+02	2.00E+01	5.49E+02	1.03E+02	mg L ⁻¹
Mg	2.80E+01	1.22E+00	2.15E+02	4.18E+01	mg L ⁻¹
Cl	8.15E+01	1.08E+01	2.68E+02	6.59E+01	mg L ⁻¹
SO ₄	5.24E+02	5.28E+01	2.88E+03	5.53E+02	mg L ⁻¹
Pb	2.49E-02	2.07E-04	2.30E-01	5.12E-02	mg L ⁻¹
Zn	2.16E-02	6.54E-05	6.00E-01	8.58E-02	mg L ⁻¹
Cu	5.13E-04	6.35E-05	1.70E-02	2.43E-03	mg L ⁻¹
As	9.98E-02	1.00E-02	5.50E-01	1.31E-01	mg L ⁻¹
Conductividad eléctrica	1.59E+00	3.67E-01	6.40E+00	1.20E+00	dS m ⁻¹

conductividad eléctrica junto con el calcio, los sulfatos y el arsénico, al zinc, el plomo y la alcalinidad. Este resultado indica que el arsénico forma pocos precipitados y se comporta como una sal soluble al igual que el sodio y el sulfato, que se concentran cuando el agua se evapora por la aridez del clima. Esto explica parcialmente el fuerte contenido de arsénico en las aguas de la Comarca Lagunera.

El eje dos del ACP opone el arsénico y el sulfato a la alcalinidad, lo cual denota la importancia de las mineralizaciones en la litología de origen profundo (sulfuros, arseniuros) y la abundancia del arsénico asociada a la del sulfato. La alteración de los sulfuros produce acidez que consume a la alcalinidad, lo cual la opone al sulfato y al arsénico. Los metales, el arsénico y los sulfatos tienen el mismo origen profundo ligado probablemente a las ascensiones minerales asociadas con el vulcanismo antiguo (Semadi *et al*, 2008).

El diagrama de la Figura 3 permite ver la concentración creciente de los elementos químicos disueltos. Cuando la pendiente de los puntos es igual a 1, el elemento se concentra en proporción a la reducción del volumen de la solución y sin reaccionar con las fases minerales presentes; se dice que ese elemento se comporta como un trazador químico (Valles, 1985). El sodio, el cloruro, el magnesio y el arsénico presentan ese comportamiento. Se observa que los contenidos de arsénico evolucionan principalmente por concentración, como si no hubiera fenómenos de precipitación mineral que pudieran limitar el aumento en las concentraciones ligadas a la aridez climática. Sin embargo, para el cloruro y el sodio la pendiente es ligeramente inferior a 1. A bajas concentraciones, el aumento del sodio no es tan

proporcional a la variación del factor de concentración debido probablemente a la adsorción en las arcillas. Este fenómeno es muy frecuente en los medios salinos puestos en evidencia en la Comarca Lagunera (González Barrios, 1992), y se acompaña de una adsorción y desorción del magnesio. El comportamiento del cloruro debe ser atribuido a su incorporación en los oxihidróxidos de hierro (oxidaciones verdes) en sustitución parcial de los iones hidroxilo (OH⁻) (Trolard *et al.*, 1996; Condom, 2000). Sin embargo, la intensidad de la precipitación mineral es ligera.

Para la especiación química en la modelación se asumió que las aguas de la parte baja de la cuenca Nazas son anóxicas, mientras que las de sus partes alta y media

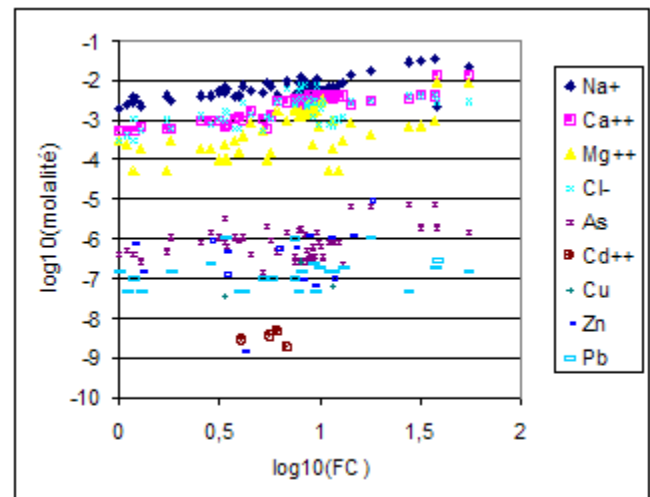


Figura 3. Diagrama de concentración de elementos en las aguas subterráneas analizadas.

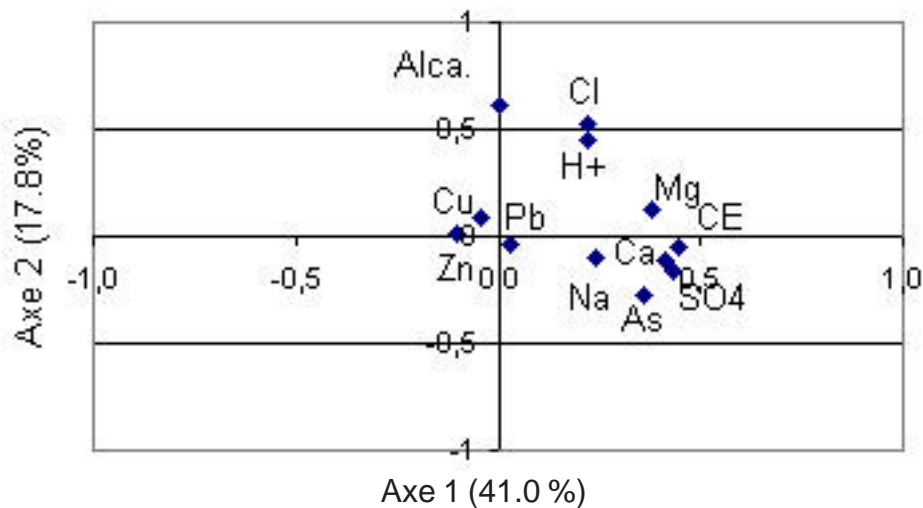


Figura 2. ACP de elementos contenidos en las aguas subterráneas: Ejes 1 y 2 (58.8 % de la variabilidad explicada). Los círculos señalan a grupos de parámetros en el eje 1 de "aridez climática".

son ricas en oxígeno, lo cual obliga a tomar en cuenta la variabilidad del potencial redox (Eh) y también del CO_2 . Ya que no fue posible medir el Eh en las aguas, su cálculo fue estimado a partir de los datos reportados en tablas: en las partes alta y media se asumieron condiciones aireadas con un valor de $\text{Eh} = +0.300$ v que disminuye en la parte baja, donde se ubican las áreas de estancamiento del agua (con un valor de $\text{Eh} = +0.05$ v) y se estableció una anoxia intermedia ($\text{Eh} = +0.100$ v). Los resultados de la modelación (Figuras 4 y 5) muestran una gran diferencia en la repartición de formas del arsénico en ambas partes. En las partes alta y media las dos formas pentavalentes (H_2AsO_4^- y HAsO_4^{2-}) son predominantes y se encuentran en concentraciones más o menos iguales. En cambio, en la parte baja las formas trivalentes (H_3AsO_3 y H_2AsO_3^-) se vuelven tan importantes como las pentavalentes. En conclusión, se nota un aumento de la concentración total de arsénico que va de la parte alta a la baja, pero también una diferenciación de las formas de arsénico predominantes. Esto plantea el problema de toxicidad producida por las diferentes formas del arsénico. La bibliografía reciente indica que la toxicidad no es idéntica para todas las formas; las trivalentes son diez veces más tóxicas que las formas pentavalentes (Semadi, 2002; Auffan, 2003; Semadi *et al.*, 2008). Sin embargo, no hay aún suficiente información reportada en la literatura internacional respecto a la toxicidad específica de cada forma del arsénico trivalente o pentavalente. Esto debe dar lugar a una línea de investigación en relación con el estado de salud de la población humana regional expuesta a dichas aguas.

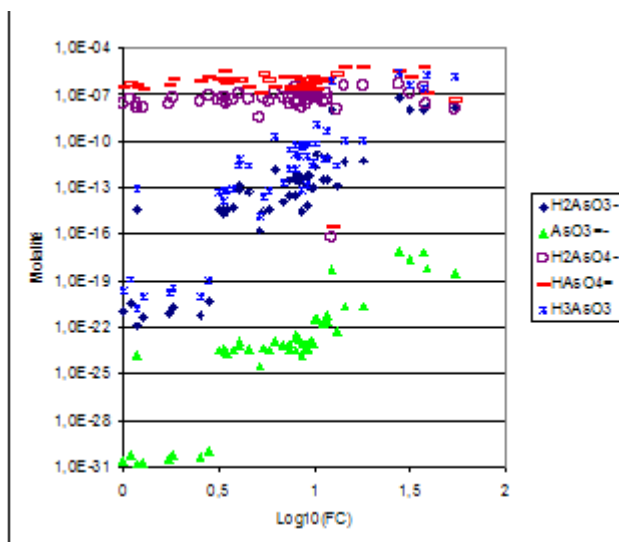


Figura 4. Distribución de formas arsenicales en las partes alta y media de la cuenca Nazas.

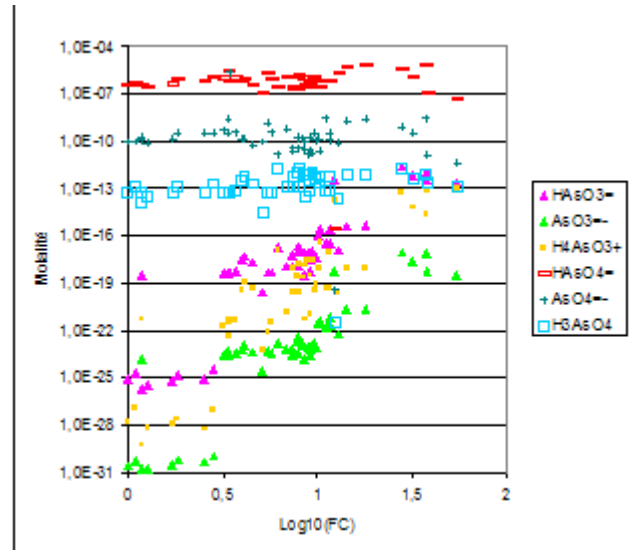


Figura 5. Distribución de formas arsenicales en la parte baja de la cuenca Nazas.

CONCLUSIONES

El origen geológico y el tipo de litología de los materiales en contacto con las aguas subterráneas, son los causantes de la presencia de arsénico en dichas aguas de la Comarca Lagunera y de gran parte del norte de México y sur de los Estados Unidos. La aridez y el endorreísmo son los principales mecanismos que explican la concentración y abundancia. El arsénico soluble en el contexto geoquímico de las cuencas Nazas-Aguanaval se comporta como una sal y como un trazador, al igual que el sulfato y el sodio. Cuando el volumen de agua se reduce por la evaporación, su concentración aumenta en proporción. La variabilidad litológica constituye una fuente de variación espacial del arsénico ligada a las litologías profundas (sulfuros, arseniuros) y relacionadas con el vulcanismo antiguo, que se traduce en concentraciones diferentes según las líneas de flujo hidrogeológico. Así los fuertes contenidos de arsénico son observados en la cuenca baja de los ríos Nazas y Aguanaval, donde se encuentra la Comarca Lagunera.

Durante su transferencia desde las partes más altas a las más bajas, el arsénico es sometido a diferentes condiciones de aireación, lo cual influye en la repartición de sus formas; las pentavalentes son predominantes en las partes altas, mientras que las formas trivalentes, más tóxicas, aparecen en cantidades igualmente importantes en las partes bajas, donde las concentraciones de arsénico son máximas, lo cual aumenta su toxicidad y el riesgo ligado a la ingesta de agua. El riesgo ambiental y de salud es serio.

Frente a este diagnóstico y ante la imperiosa necesidad de tomar medidas pertinentes para controlar y remediar el riesgo de salud pública y ambiental, es necesario proponer:

- 1) El monitoreo permanente del arsénico en las aguas subterráneas.
- 2) La adopción de la norma internacional (OMS) respecto a la concentración máxima permisible de arsénico en las aguas potables de $10 \mu\text{g/litro}^{-1}$.
- 3) La implementación de técnicas de remoción del arsénico de las aguas subterráneas mediante tratamientos eficaces (por ejemplo filtros y remediación *in situ*).
- 4) La transparencia en la información por parte de las autoridades encargadas de dar seguimiento a la calidad del agua potable disponible en la región.
- 5) La señalización clara y expedita de los pozos de agua subterránea que contengan altas concentraciones de arsénico, que sobrepasen las normas mexicana e internacional vigentes.
- 6) La investigación toxicológica respecto a las diferentes formas del arsénico presentes en las aguas subterráneas de la región.

LITERATURA CITADA

- Al-Droubi, A. 1976. Géochimie des sels et des solutions concentrées par évaporation. Modèle thermodynamique de simulation application aux sols salés du Tchad. Thèse doctorale Université de Strasbourg, France 177pp
- Auffan, M. 2003. Modelisation des transferts d'arsenic dans une nappe sous climat aride. Mém de Recherche Université d'Aix-Marseille III, France. 40pp
- Barbiero, L. 1994. Les sols alcalinisés sur socles dans la Vallée du fleuve Niger. Origines de l'alcalinisation et évolution des sols sous irrigation. Thèse Doctorat Université de Rennes, France. 209pp
- Condom, N. 2000. Etude et modélisation des transferts d'eaux et des solutés dans les sols sodiques et les nappes de l'Office du Niger au Mali. Thèse ENSAM, Montpellier 180pp
- Cornet, A. 1988. Principales caractéristiques climatiques. In : Montana C. (Ed) Estudio integrado de los recursos vegetación suelo y agua en la Reserva de la Biosfera de Mapimí. I Ambiente natural y humano. Publicaciones del Instituto de Ecología A.C. México 45-76
- Dolique, R. 1968. L'arsenic et ses composés. Editions Presses Universitaires de France. Paris, France. 123pp
- Fritz, B. 1975. Etude thermodynamique et simulation des réactions entre minéraux et solutions. Applications a la géochimie des altérations et des eaux continentales. Thèse Doct. Ing. Université de Strasbourg. Sci Géol. Mém 41. 152 pp.
- Gac, J.Y. 1980. Géochimie du bassin du lac Tchad. Documents et travaux de l'ORSTOM. Paris. 251pp
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Koppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. Publicaciones UNAM, México 246 pp.
- Gonzalez Barrios, J.L. 1992. Eaux d'irrigation et salinité des sols en zone aride mexicaine ; exemple dans la Comarca Lagunera. Tesis de doctorado Université de Montpellier II, Francia 316 pp.
- Hernández, H. 2009. Dimensión política y social de los problemas regionales del agua. En: González, J.L., I. Sánchez (Ed) Manejo comparado de cuencas hidrológicas. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Torreón, Coahuila, México 177-197
- Loyer, J-Y., J. Estrada, R. Jasso, L. Moreno (Ed). 1993. Estudio de los factores que influyen los escurrimientos y el uso del agua en la región hidrológica 36. INIFAP ORSTOM Gómez Palacio, Durango, México. 369 pp.
- OMS. 1993. Guidelines for drinking water quality. Recommendations. Vol.I World Health Organization Ribolzi, O. V. Valles et L. Barbiero (ed). Contrôle géochimique des eaux par la formation de calcite en milieu méditerranéen et en milieu tropical. Arguments d'équilibre et arguments de bilan. Science du Sol Vol. 31 77-95
- Ribolzi, O., V. Valles and T. Bariac. 1996. Comparison of hydrograph deconvolutions using residual alkalinity. Chloride and oxygen 18 ases hydrochemical tracers. Resour Toilets LMBO, 32, 4. 1051-1059
- Semadi F., 2002. Toxicité et origine de l'arsenic dans les eaux de nappe de la Comarca Lagunera. DEA Méthodes de recherches environnement et santé. Université d'Aix-Marseille I, France 41pp
- Semadi F., V. Valles, and J.L. Gonzalez Barrios. 2008. Toxicity of arsenic in ground water of Comarca-Lagunera (Mexico). European Journal of Scientific Research. Vol. 20 No. 4. 871-881
- Trolard, F., M. Abdelmoula, G. Bourrié, B. Humbert, J.M. Génin. 1996. Mise en évidence d'un constituant de type « Rouilles vertes » dans les sols hydromorphes. Proposition de l'existence d'un nouveau minéral : la « fougerite ». C.R. Acad. Science. Paris. Vol.323, 1015-1022
- Valles, V. 1985. Etude de la modélisation des transferts d'eau et des sels dans un sol argileux. Application au calcul des doses d'irrigation. Thèse doctorat Institut National Polytechnique de Toulouse, France. 172pp