
Dinámica del arsénico en el Valle de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, en Chihuahua, México

V. M. Reyes-Gómez^{1*}, M. T. Alarcón-Herrera², D. Núñez-López¹ y R. Cruz-Medina³

¹ Instituto de Ecología, A.C. Centro Regional Chihuahua. Miguel de Cervantes No. 120, Complejo Industrial Chihuahua; 31109 Chihuahua, Chihuahua, México.

² Centro de Investigación en Materiales Avanzados, A.C.

³ Estudiante de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua, A.P. 1528, Ciudad Universitaria, Chihuahua, Chih., Méx., 31160

Dynamics of arsenic in the Valley of Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, Chihuahua, Mexico

Abstract

One of the current problems of health concerning the population of the valleys of Tabalaopa, Aldama and Sierra del Cuervo in Chihuahua surroundings, is contamination by arsenic in the aquifer from which provides drinking and agricultural water wells. Affine visualize the dynamics of arsenic in the Valley, identified as levels in the surface sound system and the underground liquid phase of the Tabalaopa-Aldama-Laguna de Hormigas aquifers with the aim of proposing a conceptual model of the functioning of the hydrosystem. The methodology applied was the analysis of the levels of concentration of the toxic in the aquifer, rocks, sediments and soil and its geographic location of sampling in the landscape points. The results show that geological area component consisting of rocks riolithics mountains and major scarps has higher content of arsenic; followed by the hills and minor scarps, soils and sediment and valleys surrounding the main channels. In the central areas wells water and South of the Valley, the analysis revealed nine wells with concentration levels above of 0.025 mg As l⁻¹ and nine wells between 0.021 and 0.025 mg As l⁻¹, superior or very close to the permissible by standard NOM-127-SSAI-1994, indicating a distribution linked to the flows of the aquifer, the presence of the element lithic areas, and type the landscape ryolithics sediments and hydro-thermal aquifer in the southern region behavior pattern upper limit values. The results highlight the vulnerability of people to the risk of toxicity by intake of water contaminated with wells in the region as if preventive measures are not taken.

Key words: Geography the contents of As, Hydro-geo-chemical conceptual model, geography of temperatures, preferential flows.

Resumen

Uno de los problemas actuales de salud que atañe a los pobladores de los valles de Tabalaopa, Aldama y los alrededores de la Sierra del Cuervo en Chihuahua, es la contaminación por arsénico en los pozos de agua del acuífero de donde se provee el consumo humano y el uso agrícola. Con el objetivo de visualizar la dinámica del arsénico en el valle, se propone un modelo conceptual del funcionamiento del hidrosistema determinado a partir de los niveles de As en el sistema sólido superficial y la fase líquida subterránea de los acuíferos de Tabalaopa-Aldama-Laguna de Hormigas. La metodología aplicada consistió en el análisis de los niveles de concentración de arsénico en el agua del acuífero, en rocas, sedimentos y suelo, identificando el geoposicionamiento de los puntos de muestreo en el paisaje. Los resultados muestran que el componente geológico de la zona, compuesto de rocas riolíticas de Sierras y Pies de Monte, posee el mayor contenido de arsénico; seguido de los sedimentos y suelos de los Pies de Monte y Valles circundantes a los cauces principales. En el agua de pozos de las zonas central y sur del Valle, los análisis revelaron nueve pozos con niveles de concentración por encima de 0.025 mg As l⁻¹ y nueve pozos entre 0.021 y 0.025 mg As l⁻¹, valores

*Autor de correspondencia

Email: victor.reyes@inecol.edu.mx; rey.victor@gmail.com

superiores o muy próximos al límite superior permisible por la norma NOM-127-SSAI-1994, indicando una distribución ligada al patrón de flujos del acuífero, a la presencia del elemento en las zonas líticas y sedimentos de tipo riolíticos del paisaje y al comportamiento hidro-térmico del acuífero en la zona sur de la región. Los resultados ponen en evidencia el riesgo de los habitantes a la toxicidad por ingesta del agua contaminada con As de los pozos de la región, si no se toman las medidas preventivas necesarias.

Palabras clave: Geografía de los contenidos de As, modelo conceptual hidrológico-geológico-químico, geografía de temperaturas, flujos preferenciales.

Introducción

Las consecuencias en la salud de la población por la ingesta de elevadas concentraciones de As en el agua de ríos, lagos, embalses y acuíferos, ha motivado a instituciones como la Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006), la Unión Europea (Directiva 98/83) o la Agencia de Protección Ambiental Estadounidense (USEPA) a establecer la reducción del límite del contenido de arsénico en agua de consumo de 0.050 a 0.01 mg l⁻¹. En México, la Norma NOM 127-ISSA-1994 (2000) estipula un nivel máximo de 0.025 mg As l⁻¹ en agua potable. En el estado de Chihuahua, se han detectado varias zonas donde el agua de pozos y norias de consumo humano supera esos niveles de As; por ejemplo, el estudio de Ochoa *et al.* (2009) permitió poner en evidencia los daños tóxicos severos que se presentaron en los habitantes de la comunidad La Casita (a 60 km de la ciudad de Chihuahua), a causa de la ingesta de aguas altamente contaminadas con As (7-11 mg l⁻¹), provenientes del pozo principal de consumo de la comunidad. Otros estudios en Chihuahua dieron a conocer los contenidos de As en aguas de algunos acuíferos de la región (C.N.A., 1997; Rodríguez, 2000; Handschy y Dyer, 1987; Haenggi, 2001), así como en rocas y sedimentos de los embalses principales de Chihuahua (Hernández-García *et al.*, 2007; Benavides *et al.*, 2008). En la región de Meoqui-Delicias, Espino-Valdés *et al.* (2009) propone que el As presente en el agua de consumo es de origen natural, proveniente de las arsenopiritas de las sierras circundantes. En el Valle de la Sierra del Cuervo, el estudio preliminar de Reyes-Cortés (1997), menciona que el tóxico presente en las aguas subterráneas del valle del Cuervo, seguramente proviene del aluvión constituido de láminas de arcillas. En los valles de Tabalaopa, Aldama y El Cuervo, existe información parcial (Martínez, 1982; Gutiérrez *et al.*, 2009), que sugiere

que el As de los pozos puede provenir de aportes de residuos de centros urbanos e industriales, sobre todo en la boquilla de Aldama, o de los sedimentos depositados en el cauce del río Chuiscar donde se mezclan las aguas provenientes de Aldama con las de la zona urbana de Chihuahua. A la fecha, las sugerencias sobre un modelo conceptual del funcionamiento hidrogeoquímico del Sistema han sido presentadas por Osuna, (1991) y Chavez (1993) quienes proponen un esquema hipotético para el valle de Tabalaopa y Aldama, pero enfocado a la explotación racional del acuífero para evitar abatimientos del mismo. Se carece de un modelo que incluya el funcionamiento hidrogeoquímico de los acuíferos que están interconectados y cubren todo el valle de Tabalaopa- Aldama-El Cuervo. La hipótesis de esta investigación es que el As presente en el agua de pozos para consumo humano del valle, es de origen natural, consecuencia de un funcionamiento hidrogeoquímico específico de la región, por lo que resulta evidente la necesidad de generar los conocimientos básicos de comportamiento hidrogeoquímico del sistema por contaminación de As en vías de generar recomendaciones y estrategias del uso de agua para consumo humano y propiciar recomendaciones de remediación a la presente problemática.

Material y Métodos

El estudio se realizó en la parte centro-occidental del estado de Chihuahua, al norte de México. Comprende los valles de Tabalaopa, Aldama y el Cuervo, al noreste de la ciudad de Chihuahua, y al norte con la ciudad de Aldama. Cubre una extensión aproximada de 200 km² limitada por las coordenadas 28° 47' a 28° 56' de latitud norte y 105° 57' a 106° 05' de longitud oeste. Según la nomenclatura de CNA (2005), los acuíferos subyacentes en los valles son los denominados

como Tabalaopa-Aldama y Aldama-Laguna de Hormigas (Figura 1).

De acuerdo con García (1973), la zona de estudio corresponde a un clima muy seco-semicálido (subtipo), que es el más cálido de los climas secos con lluvias en verano. La temperatura media anual para la zona se estima en 19.3 °C, las medias mensuales más elevadas se presentan en junio, julio y agosto con un promedio de 27 °C; mientras que el mes más frío es enero con una media mensual cercana a 10 °C. La precipitación media anual es de 338 mm (30 años de mediciones, 1970-2000) y para esta área de estudio se ha calculado una evaporación superior a los 2400 mm. Se registran elevaciones de 750 a 1580 msnm.

El sistema geohidrológico subterráneo estudiado integra dos acuíferos considerados de tipo libre en la mayoría de sus extensiones, excepto en las zonas donde sobreyacen o se intercalan con estratos arcillosos de espesores de 100 m y grandes extensiones que le confieren propiedades de confinamiento (INEGI, 1999). Los espesores de los rellenos del acuífero Tabalaopa-Aldama son del orden de 400 m, adelgazándose hasta los 200 m en el acuífero Aldama-Laguna de Hormigas en el valle de la Laguna del Cuervo. En el valle de Tabalaopa-

Aldama, el volumen medio anual de agua extraída es de 65.6 hm³ provenientes de 148 aprovechamientos, la calidad del agua en general es dulce, con valores de 400 a 800 mg l⁻¹ de sólidos totales disueltos excepto hacia la boquilla de Aldama donde las concentraciones son de hasta 2500 mg l⁻¹. En la zona de La Laguna del Cuervo, la extracción anual es de 1.5 hm³ y la recarga media anual desconocida no ha sido calculada, los sólidos totales disueltos en este acuífero, en general varían de 500 a 2000 mg l⁻¹ indicando que la calidad del agua es de dulce a tolerable.

La geología del paisaje, se encuentra constituida por rocas sedimentarias e ígneas principalmente (Handschy y Dyer, 1987). Las rocas predominantes son las Lutitas, Calizas y Tobas riolíticas. La estratigrafía de la Sierra del Cuervo (que divide el paisaje entre los dos acuíferos) se caracteriza por la intensa deformación de las unidades y por sus afloramientos de rocas antiguas con edades de 1025 y 1037 millones de años.

Concentración de As

Se colectaron 108 muestras de rocas, sedimentos y suelo en los valles de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, en la Sierra del Cuervo y las sierras

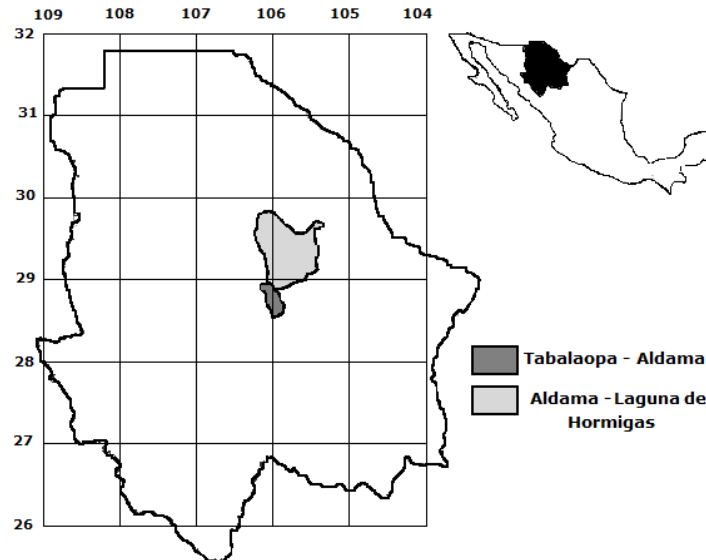


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

adyacentes al área de estudio (Figura 2). Se identificaron las especies mineralógicas del medio sólido. Para la fase líquida, se efectuó un muestreo doble de aguas en 30 pozos de uso agrícola y 14 de consumo humano, directamente de la toma de los aprovechamientos, dejando al menos 20 minutos de bombeo en aquellos casos que se encontraron apagados. Los criterios de muestreo de la fase sólida fueron la geología del paisaje, la pendiente y la red de drenaje superficial; en tanto que para los pozos fueron la distribución geográfica y su accesibilidad. La selección de la mayoría de puntos de muestreo fue al azar, previamente marcados sobre una carta: para las rocas y sedimentos se trató de cubrir zonas altas, de pie de monte, de bajadas, lechos de tributarios y zonas aledañas al cauce principal del paisaje, hubo dos transectos de muestreo que se seleccionaron in situ, dada la diversidad de sedimentos encontrados en el recorrido; para pozos se cuidó que fueran aquellos que cubrieran zonas urbanas, conurbanas y agrícolas principalmente. Se determinó el contenido de As en la fase sólida y

líquida, mediante difracción de rayos X y análisis cuantitativo aplicando espectrometría de emisión por plasma ICP-MS. Para el agua, en campo se determinaron la temperatura, pH y contenidos de bicarbonatos y carbonatos. Para identificación de dirección de flujos de agua subterránea, se realizaron mediciones de los niveles estáticos en 34 pozos. Se analizó la calidad del agua en pozos, a través de las concentraciones de As, carbonatos (CO_3), bicarbonatos (HCO_3^-), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-), calcio (Ca^{2+}), potasio (K^+), sodio (Na^+), magnesio (Mg^{2+}) y la alcalinidad total. Con un geoposicionador tipo multinavigator (Brunton), se identificaron las coordenadas de cada punto de muestreo. Mediante sistemas de información geográfica (software ArcInfo 9.2 ®), se ubicaron sobre una capa temática los sitios de muestreo (Figura 2); posteriormente, con esa información se construyeron los mapas de isotermas, isolíneas de As en rocas, suelo y sedimentos, dirección de calidad de agua y flujos de los acuíferos estudiados. Las estadísticas empleadas

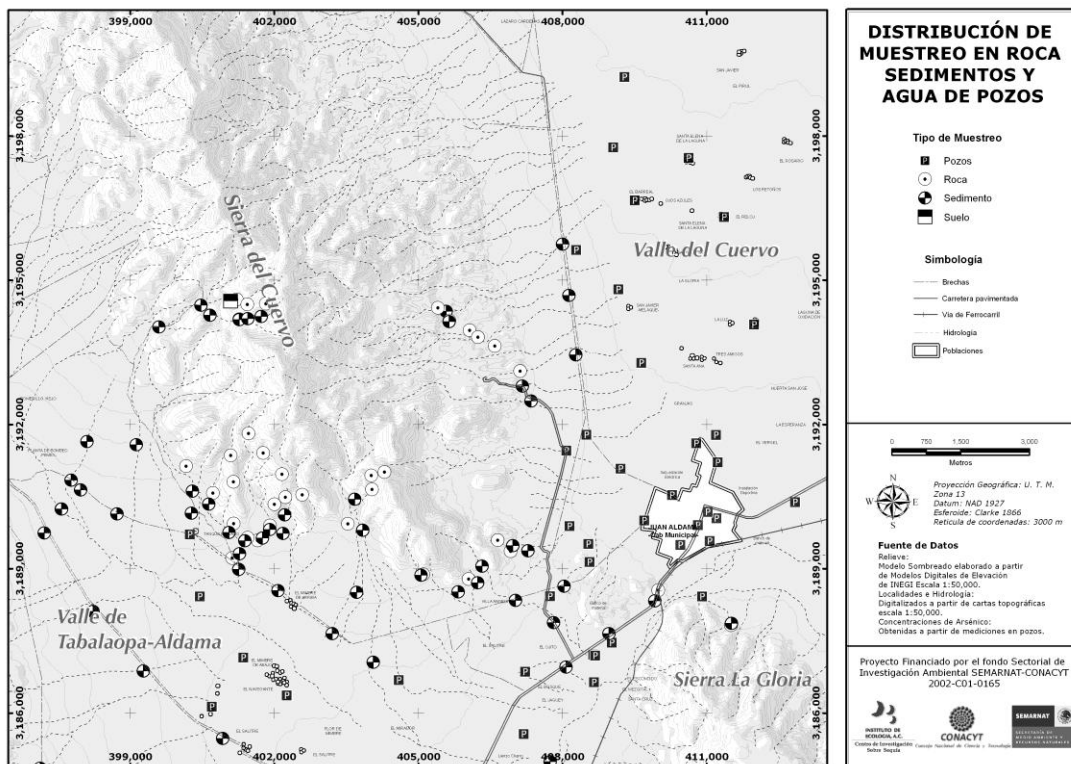


Figura 2. Localización de los puntos de muestreo en fase sólida y líquida.

en el artículo fueron la técnica de interpolación del cuadrado de la distancia entre puntos (IDW, por sus siglas en inglés), que son procesos geoestadísticos. Para el caso de análisis cuantitativo del contaminante y algunos parámetros químicos como el pH, Eh, SO_4^{3-} , se usaron estadísticas de tendencias centrales como los promedios aritméticos y algunas agrupaciones de datos como el histograma de frecuencias.

Resultados y discusión

Tipos de rocas predominantes en la zona de estudio

De las 14 muestras sometidas a petrografía y mineralogía, predominaron las que presentan un origen de tipo Igneas Extrusivas o Piroclásticas; cuyas clasificaciones resultaron tipo Riolita o Toba, una Lutita y otra de composición Félsica. Las especies de minerales dominantes fueron Cuarzo, Ortoclasa y Vidrio volcánico (> 25%), seguidas de la Senidina y la Lutita (10-25%) y en menor proporción la Bitotita, la Hematina y la Fluorapatita (0.1-10%).

Presencia de As en la fase sólida

La distribución de la concentración de As en la fase sólida varió de 540 mg kg^{-1} en las rocas ubicadas en las zonas de Pies de Monte y Bajadas del lado occidente de la Sierra del Cuervo, hasta valores de 2.3 mg kg^{-1} en las rocas de la zona oriente y zona de transición del valle de Tabalaopa - Aldama hacia el valle de Aldama-El Cuervo (Figura 3). En el caso de los sedimentos y suelos, los niveles de concentración de As generalmente fueron menores a los 131 mg kg^{-1} , alcanzando niveles mínimos de hasta 1.5 mg kg^{-1} . Se observa que la concentración de As de los suelos y sedimentos en las cercanías del lecho principal del río Chuviscar, alcanza valores entre 50 y 100 mg kg^{-1} , algo muy similar a lo encontrado en sedimentos del lecho del mismo tributario, por Gutiérrez *et al.* (2009) quienes reportaron concentraciones entre 14 y 160 mg kg^{-1} . La distribución geográfica de la concentración de As en la fase sólida del paisaje, es congruente en el valle de Tabalaopa-Aldama, si se considera el proceso de transformación del paisaje, desde el afloramiento de rocas volcánicas, la fragmentación

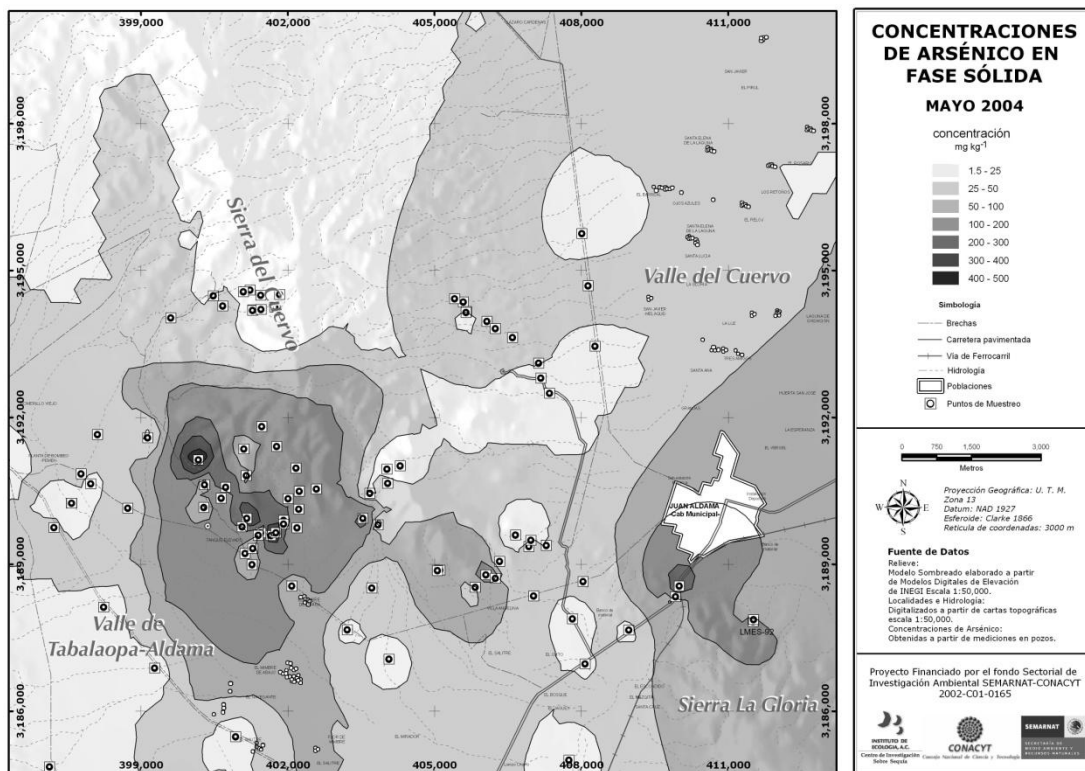


Figura 3. Distribución del contenido de As en la fase sólida.

de ellas y el transporte mecánico-meteorológico de elementos más pequeños desde las sierras, pasando por pies de Montes y bajadas hasta las partes más bajas del paisaje donde los coluviones menos gruesos y los aluviones más finos se depositan; permitiendo con ello, un gradiente de mayor a menor concentración desde las Sierras y Pies de Montes al occidente de la Sierra del Cuervo, hacia las zonas de Bajadas y Planicies cercanas a los cauces principales de ríos y arroyos del valle de Tabalaopa-Aldama. Para el Valle de Aldama-El Cuervo, el material geológico de Pies de Monte, Bajadas y Planicies presentó concentraciones de As menores a 100 mg kg^{-1} ; en la Sierra La Gloria, al sureste de la región, también se repite el gradiente de mayores concentraciones en Pies de Montes ($200 \text{ mg As kg}^{-1}$), hacia las partes bajas del paisaje bajadas y planicies, con valores menores a 3 mg kg^{-1} de As.

Presencia de As en la fase líquida

De los pozos analizados, en 9 de ellos, se rebasaron los niveles máximos de As permisibles por la Norma NOM-127-SSA1-1994 ($> 0.025 \text{ mg As l}^{-1}$); en otros 9 pozos se obtuvieron niveles entre 0.025 y $0.021 \text{ mg As l}^{-1}$, valores muy cercanos a los máximos permisibles (Figura 4). El resto de los pozos analizados mostraron concentraciones dentro de los límites marcados por la Norma; sin embargo,

no se debe obviar que dichas concentraciones son mayores a las establecidas por la organización mundial de la salud de $0.01 \text{ mg As l}^{-1}$ (OMS, 2003). Los niveles menores de $0.005 \text{ mg As l}^{-1}$, solamente se encontraron en 3 de los pozos.

Geografía del contenido de As en agua de pozos

Los pozos con mayores contenidos de As ($> 0.03 \text{ mg As l}^{-1}$) se localizan en la transición del acuífero de Tabalaopa-Aldama hacia el acuífero de Aldama-Laguna de Hormigas, entre las Sierras de La Gloria y Del Cuervo, en las proximidades de la ciudad de Aldama (Figura 5). Otras de las zonas con contenidos mayores a $0.025 \text{ mg As l}^{-1}$ fueron la zona noreste, en el valle del Cuervo y la suroeste del valle de Tabalaopa Aldama. Las especies acuosas de As que predominaron en el agua analizada en la zona de estudio fueron las del tipo HAsO_4^{2-} con pH entre 6.3 y 7.8 y con un valor promedio de 165 de Eh.

Comportamiento hidrogeoquímico del acuífero

La distribución espacial de varios factores sugieren que el movimiento del agua en la zona de estudio, es en dirección NW-SE a lo largo de los valles en dirección paralela al río Chuvíscar; la zona de recarga se da en lo alto de las sierras que circundan los valles de Tabalaopa-Aldama y Aldama-El Cuervo (Diagrama de Flujos, figura 6); así como en

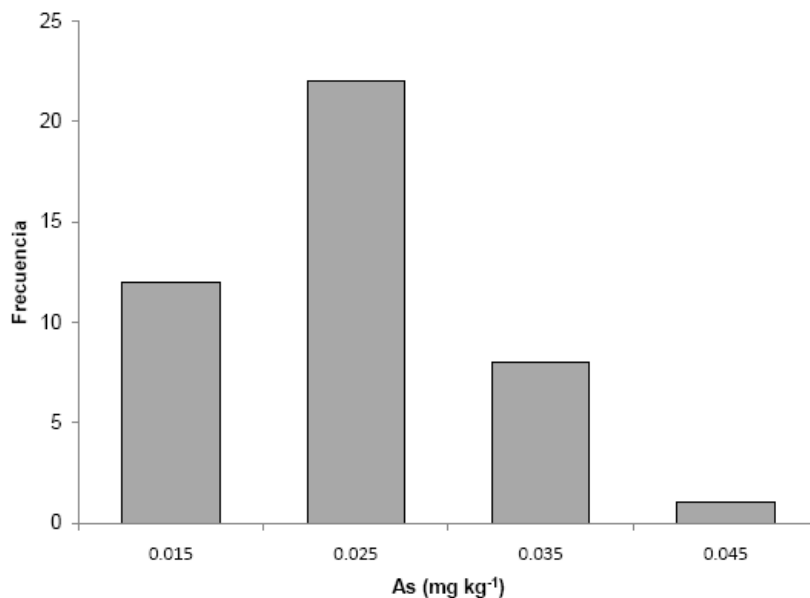


Figura 4. Histograma de niveles de arsénico en agua de pozos.

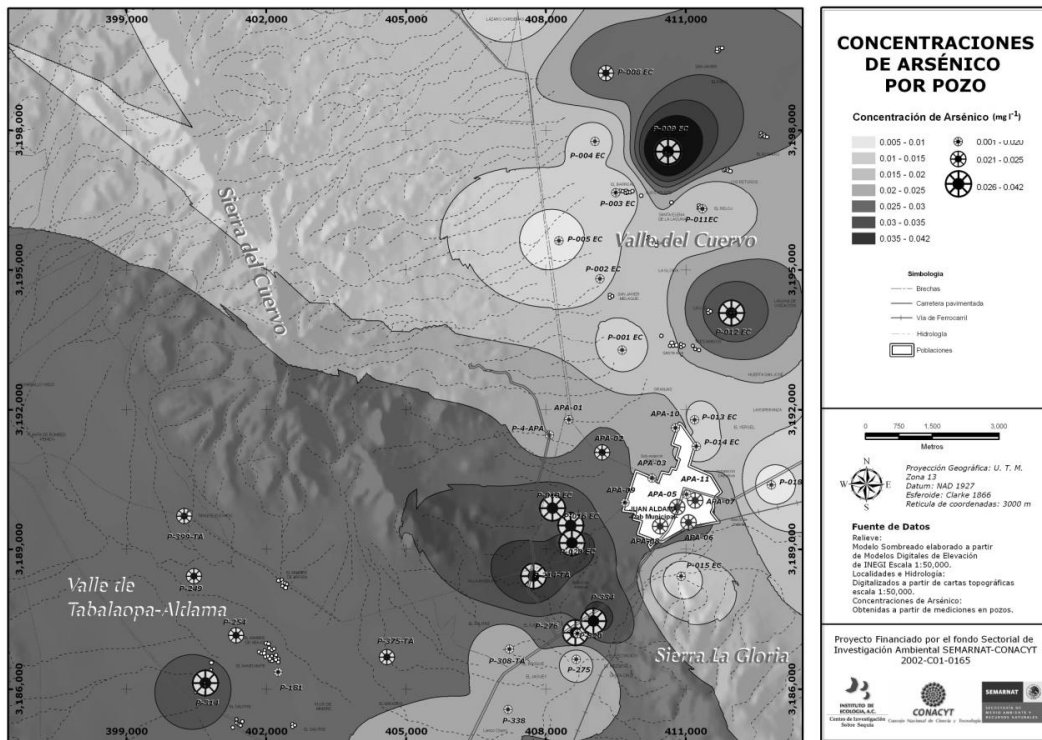


Figura 5. Distribución de la concentración de As en la fase líquida.

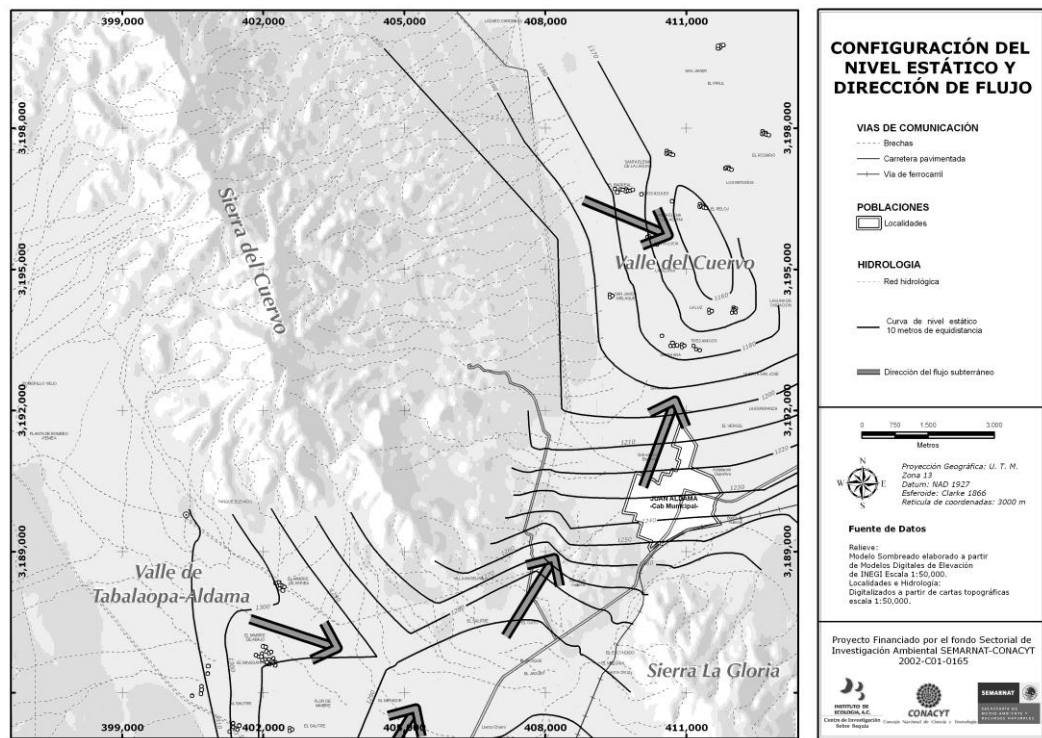


Figura 6. Distribución de la profundidad del nivel superior del acuífero y sentido del flujo.

los propios valles a través de la red de drenaje que tiene ocurrencia en las épocas de lluvias; otra fuente de recarga es el río Chuviscar, donde se reflejó una evolución de la calidad química del agua en dirección del cauce (Cruz-Medina, 2005), que puede ser considerada de buena calidad para uso potable, en abrevaderos y riego; sin embargo para consumo humano debe tenerse en cuenta que en varios pozos se presentaron altas concentraciones de sólidos totales y niveles de arsénico disueltos ($TDS > 400$, $As > 0.025 \text{ mg l}^{-1}$), este último provocado por un aumento en la temperatura del agua, tal como se puede apreciar en la figura 7, donde las mayores temperaturas coinciden con las concentraciones más altas de As en la zona de transición del valle de Tabalaopa-Aldama hacia valle El Cuervo ($> 28^\circ\text{C}$).

Para esclarecer otras posibles fuentes de contaminación, se requiere complementar el estudio con determinaciones de SO_4^{-3} , F, NO_3^- en agua y otros posibles fuentes como el agua de lluvia, el viento y aguas residuales provenientes de la ciudad de Chihuahua, como lo sugieren Faoqi *et al.* (2007) quienes determinaron que el As presente en acuíferos de Punjab se debía a múltiples factores naturales y antropogénicos.

Discusión

Con la misma complejidad para definir el origen del As de otros sistemas (Reyes-Cortés, 1997; Bhattacharya *et al.*, 2007; Hernández-García *et al.*, 2008; Benavides *et al.*, 2008), se generó un modelo hipotético sobre el funcionamiento hidrogeoquímico de la contaminación con As del sistema Tabalaopa-Aldama-Laguna de Hormigas, el cual se presenta en la figura 8. El modelo, desde el punto de vista hidrogeológico resume una dinámica del As en el sistema, sustentándose de la siguiente manera: 1) la fase sólida constituida principalmente de rocas Igneas y sedimentarias como la Riolita y la Lutita se puede fragmentar por razones naturales y antropogénicas (desplazamientos de masas, industria y perforación de pozos; 2) Dichos fragmentos y rocas de afloramiento pueden entrar en contacto rápidamente con el agua de lluvia, de escurrimiento, así como con la que se infiltra dentro de los horizontes superficiales del paisaje (Alaerts y Khouri, 2004); produciéndose una disolución del As presente en esas rocas de afloramiento y estratos profundos. 3) Éste As puede seguir dos vías: la

primera al ser transportado por el escurrimiento aguas abajo y sumarse a la concentración de As que se genera a partir de la disolución del As presente en los coluviones de Pie de Monte y Bajadas, como lo sugieren estudios de monitoreo a largo plazo de la presencia de As en escurrimiento superficial en zonas de Europa Central (Novak *et al.*, 2010); en la segunda ruta, el As disuelto puede ser movilizado en dirección del camino que sigue la solución de agua de infiltración hacia el manto freático. 4) En zonas de sedimentos como los abanicos aluviales del paisaje y las zonas bajas en los alrededores del cauce principal, en aguas que se dirigen hacia el lecho del acuífero, el As puede ser inmovilizado rápidamente o removido del agua de infiltración combinándose principalmente con minerales de Al y Fe y algunos con contenidos de Ca, Ba y S para formar compuestos insolubles o con solubilidades muy bajas, reduciendo así la concentración de As (Adsorción) (Battacharya *et al.*, 2007; Alaerts y Khouri, 2004; Drahota *et al.*, 2009). Por otro lado, la perforación de pozos deja en exposición ciertos minerales provenientes de rocas fragmentadas que pueden provocar una disolución de As presente en dichos materiales, o bien pueden representar “entradas” importantes de aportes de agua de escurrimiento e infiltración ya contaminada con As y otros compuestos. 5) Las escasas precipitaciones ($> 350 \text{ mm a}^{-1}$) y las condiciones climáticas prevalecientes de la zona, provocan elevadas tasas de evaporación ($> 2000 \text{ mm a}^{-1}$) y una consecuente concentración de minerales entre ellos el As. El clima de la región produce regímenes térmicos en agua (temperaturas $> 30^\circ\text{C}$) y sequías intensas que favorecen el enriquecimiento del As en el agua de los pozos ya que acentúan los procesos de transporte y concentración de los tóxicos (escurrimiento, infiltración y evaporación), esto conjugado con la variación de la salinidad y el pH, (Reyes-Gómez *et al.*, 2006; Núñez *et al.*, 2007; Armienta y Segovia, 2008; Espino-Valdés *et al.*, 2009). En este sentido, Wang *et al.*, (2009), demostró que en zonas áridas, el enriquecimiento de As en el agua subterránea se debe a múltiples factores entre los que destacan los elevados niveles de sulfatos y pHs elevados, que favorecen la desorción del As presente en sedimentos con superficies conformadas por oxihidroxidos, incrementando así la concentración del As en la fase acuosa de esos sistemas, similares a los de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo.

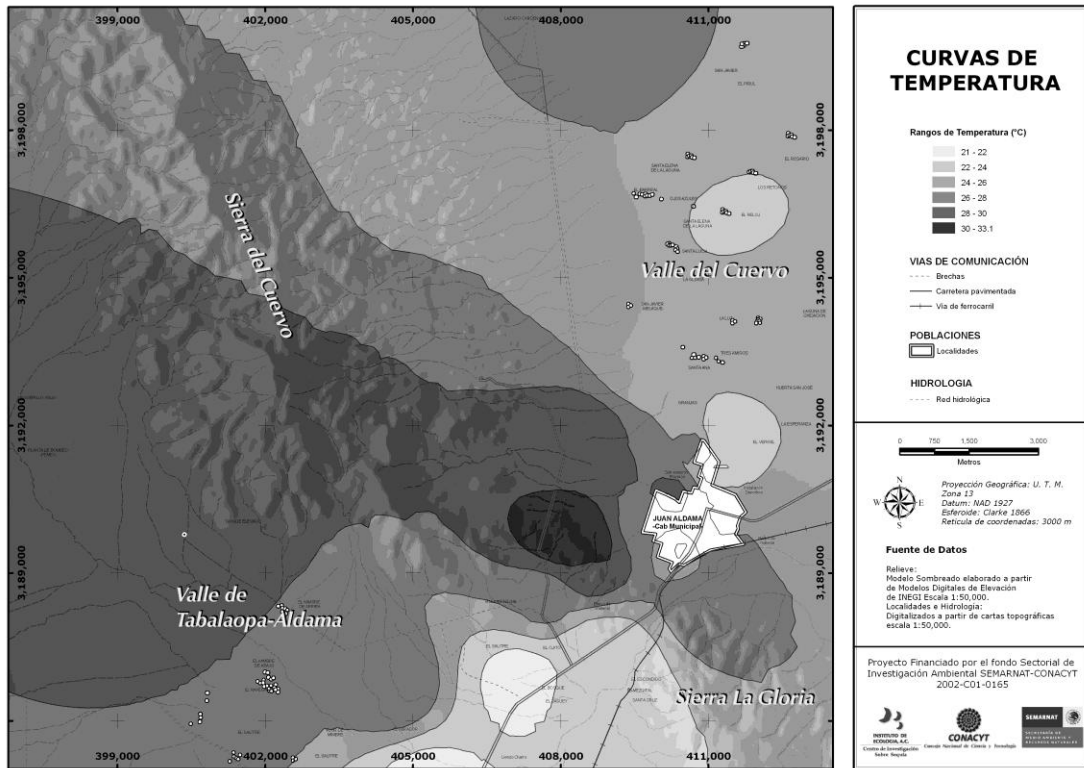


Figura 7. Isolíneas de la temperatura en agua de pozos.

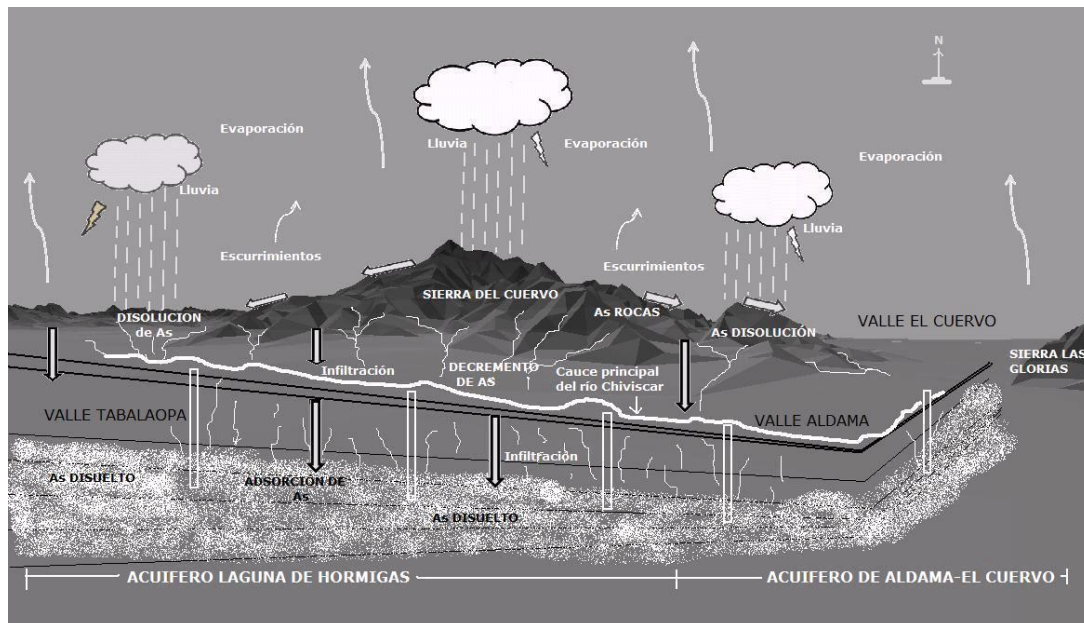


Figura 8. Modelo conceptual de la dinámica del As en el sistema Tabalaoopa-Aldama-Laguna de Hormigas (El Cuervo).

Los resultados del presente estudio coinciden con el estudio de Osuna (1991), donde se puede visualizar perfectamente que el origen del As en el extremo occidental del acuífero de Tabalaopa, es preferentemente de tipo natural y que habría que ampliar otro tipo de muestreo más puntualizado para explorar posibles fuentes de contaminación por As en zonas industriales, así como implementar un sistema monitoreo permanente de la calidad de agua de lluvias y el aporte de sólidos suspendidos en el viento, para esclarecer de una forma más precisa otros posibles orígenes del As presente en el sistema Tabalaopa-Aldama-Laguna de Hormigas. Muestréos periódicos a largo plazo (> 50 años) permitirían explicar la evolución del As en el sistema e identificar riesgos de salud y vulnerabilidad del acuífero, así como planear los diferentes usos del agua en función de las diferentes actividades de la región.

El análisis de la información generada indica que la presencia del arsénico en el agua subterránea en el área Tabalaopa-Aldama-El Cuervo está relacionada con el sistema hidrogeológico natural. Los fundamentos físicos del medio que apoyan el modelo propuesto son el desarrollo del acuífero en un medio granular de aluvión, y que la zona de recarga está formada por un medio fracturado compuesto por rocas volcánicas (Riolitas) y rocas sedimentarias (Lutitas) con altos contenidos de Arsénico. Otra práctica común que contribuye en esta aseveración es la extracción del agua en la zona de estudio a grandes profundidades (> 100 m), lo que acentúa la fragmentación de rocas riolíticas y con ello la liberación al agua subterránea de metales y metaloides, así como otros elementos químicos. Existe una zona en el área de estudio que presenta un sistema hidrotermal, en donde la temperatura del agua varía de un rango de 21 a 33 °C, favoreciendo una alta disolución de As por las altas temperaturas. Aunque aquí no se presentaron las acciones de difusión y prevención de riesgos, el estudio sirvió para alertar a los encargados de una Casa Hogar de niños (Los Lirios) ubicada en las zonas aledañas de Aldama, para que se instalará un sistema de osmosis inversa de donde se suministra agua para bebidas y alimentos de los jóvenes del albergue. De la misma manera, la información transmitida a las autoridades locales municipales de Aldama que gestionan el agua potable, los motivó a implementar sistemas de tratamiento de agua con osmosis inversa, disponibles para toda la comunidad. En las

zonas de uso agrícola y pecuario del agua, donde las concentraciones son muy altas, se les informó sobre los riesgos de salud por ingesta de agua de esos pozos y se planeó estratégicamente la apertura de futuros pozos de aprovechamientos en las zonas de menor concentración de Arsénico.

Conclusiones

El estudio permitió establecer el modelo conceptual del funcionamiento hidrogeoquímico del sistema, que explica cómo a partir del material geológico existente (rocas, sedimentos y suelos) se libera el As por fragmentación. Posteriormente la disolución del As en el agua puede ser acelerada por la temperatura predominante en el medio. El As liberado tiende a fijarse en materiales como arcillas y otros minerales o seguir su camino a través del escurrimiento e infiltración y concentrarse en el acuífero y arroyos de la zona. En estos valles, debido al clima árido se acentúan los procesos de evaporación produciendo un aumento de la concentración de arsénico, salinidad y el pH.

El presente estudio permitió informar adecuadamente a las instituciones que se encargan de la administración del agua en sobre los riesgos del consumo de agua con altas concentraciones de As. Logrando con ello la adquisición de equipos de tratamiento para minimizar la concentración de As en el agua y con ello el riesgo de salud en la población.

Agradecimientos

A SEMARNAT-CONACYT-México y al INECOL, por el apoyo financiero del proyecto (Ref: CO1-0165).

A los encargados de pozos de agua del Valle de Tabalaopa-Adama-El Cuervo, en el Municipio de Aldama, por permitir la colecta de agua, así como a los propietarios y ejidatarios de la zona por el acceso al muestreo de rocas y sedimentos.

Bibliografía

- Alaerts, G.J. y Khouri N., 2004. Arsenic contamination of groundwater : Mitigation strategies and poliices. Hydrogeology Journal, 12: 103-114.
- Armienta M.A. y Segovia N., 2008. Arsenic and fluoride in the groundwater of Mexico. Environ Geochem Health, 30: 345-353.
- Bhattacharya P, Welch AH, Stollenwerk KN, McLaughlin MJ, Bundschuh J, Panaullah G. 2007. Arsenic in the environment: Biology and Chemistry. Sci. Total Environ 2007; 379: 109-20.

- doi:10.1016/j.scitotenv.2007.02.03
- Benavides, A., Moreno, M., Sosa, M., Puga, S., Alcalá, J. y Quintana C. 2008. Evaluación de la Calidad del Agua en las Principales Lagunas del Estado de Chihuahua. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4 (2):84-88, 2008
- Chávez A. R. 1993. Hidrogeología física y química de la porción centro-occidental del valle de Tabalaopa-Aldama Chihuahua. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Drahota P., Rohovec J., Filippi M., Mihaljevic M., Rychlovsky P., Cervený V. 2009. Mineralogical and geochemical controls of arsenic speciation and mobility under different redox conditions in soil, sediment and water at the Mokrsko-West gold deposit, Czech Republic. *Sci Total Environ*, 407:3372-3384.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2005. Informe anual hidrológico del Estado de Chihuahua.
- Comisión Nacional del Agua (CNA.). 1997. Programa hidráulico de gran visión del Estado de Chihuahua 1996-2020, Resumen, Subdirección General Técnica de Programación, Gerencia Regional Norte, Gerencia Estatal Chihuahua.
- Cruz-Medina R. 2005. Modelo hidrogeoquímico del arsénico en el acuífero de Tabalaopa-Aldama-El Cuervo, Chihuahua, México. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Espino-Valdés, M. S., Yaravi Barrera-Prieto, Y. y Herrera-Peraza, E. 2009. Presencia de arsénico en la sección norte del acuífero Meoqui-Delicias del estado de Chihuahua, México. *TECNOCENCIA Chihuahua* 3(1):8-10.
- Farooqi A., Masuda H., Firdous N. 2007. Toxic fluoride and arsenic contaminated groundwater in the Lahore and Kasur districts, Punjab, Pakistan and posible contaminant sources. *Environmental Pollution*, 145: 839-849.
- García E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). UNAM, 1973. 246 p.
- Gutiérrez M., M.T. Alarcón y Camacho, L.M., 2009. Geographical distribution of arsenic in sediments within the Rio Conchos Basin, Mexico. *Environ Geol* (2009) 57:929-935
- Haenggi W.T. 2001, Tectonic history of the Chihuahua trough, México and adjacent USA, Part I: the pre-Mesozoic setting. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Tomo LIV, p. 28-66.
- Handschy J.W. and Dyer, R. 1987. Polyphase deformation in Sierra del Cuervo, Chihuahua, Mexico: Evidence for ancestral Rocky Mountain tectonics in the Ouachita foreland of northern Mexico, *Geological Society of America Bulletin*, v. 99, p. 618-632.
- Hernández-García Y., Sosa-Cerecedo, M., Moreno, M., Alcalá J. y Puga, S. 2008. Evaluación de la contaminación por metales pesados y arsénico en sedimento en embalses del estado de Chihuahua, México. *Revista Latinoamericana de Recursos Naturales*, 4 (2): 89-94, 2008
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 1999. Estudio Hidrológico del Estado de Chihuahua.
- Martínez L.P., 1982, Relación del arsénico con el sistema hidrogeológico regional en el área de Delicias, Chihuahua. Tesis maestría. Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Novak M., Erbanova L., Fottova D., Prechova E., Veselovsky F., Krachler M., Blaha V., 2010. Increasing arsenic concentrations in runoff from 12 small forested catchments (Czech Republic, Central Europe): Patterns and controls. *Sci Total Environ*, 408: 3614-3622.
- Núñez D., Muñoz, C, Reyes-Gómez, V.M. Reyes-Gómez, I. Velasco-Velasco, Gadsden H. 2007. Characterization of drought at different time scales in Chihuahua, México. *Agrociencias*. 41 :253-261.
- Ochoa Reyes J., Vidal Lozano D., Lerma Santana A., Gómez Reza, L., Reta Sánchez A., Fernández Escajeda D., Vidal Flores, A., Trevizo Ortiz, L., González Piñeyro D.M., Ornelas Reynoso M., Fernández Luna F., Hernández García A., Del Rosal Díaz C. Chavira Renova J. y Orozco Domínguez L.R. 2009. Arsenicismo subagudo y crónico en una población rural. *Dermatol Rev Mex* 53(2): 63-69.
- Organización Mundial de la Salud (OMS). 2003. Informe de la 118ava reunión del Consejo Ejecutivo, 24 de mayo. EB 118/14.
- Osuna V. A. 1991. Construcción de un modelo digital de flujo y diseño de una política de explotación óptima del acuífero Tabalaopa-Aldama. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Reyes-Cortés I.A. 1997. Geologic Studies in the Sierra Peña Blanca, Chihuahua, Mexico, Disertación doctoral, Universidad de Texas en El Paso, El Paso Texas.
- Reyes-Gómez V.M., D. Núñez-López, C. A. Muñoz-Robles H. Gadsden J.A. Rodríguez M. A. López O. y Hinojosa R. 2006. Caractérisation de la sécheresse hydrologique dans le bassin versant Rio Conchos, Chihuahua, Mexique. *Science et Changements Planétaires - Sécheresse*. 17(4) : 475-484.
- Rodríguez J. A. 2000. A Geophysical, Geochemical and Remote Sensing Investigation of the Water Resources at the City of Chihuahua, Mexico. Tesis doctorado, Universidad de Texas, El Paso Texas.
- Secretaría de Salubridad y Asistencia. 2000. Modificación Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. *Diario Oficial de la Federación CVIII* 13, 20 oct. 2000.
- Wang Y., Shvarev S.L, Su Ch. 2009. Genesis of arsenic/fluoride-enriched soda water: A case study at Datong, northern China. *Applied Geochemistry*, 24: 641-649.