

Cambio de las manifestaciones de agua subterránea y características de los ecosistemas asociados en el semiárido mexicano

Change of groundwater manifestations and characteristics of associated ecosystems in the Mexican semi-arid region

Landy C. Orozco-Uribe¹*, Marcos A. Ortega-Guerrero¹, Enrique A. Cantoral-Uriza^{*2}, Miguel Á. Domínguez-Cortázar³ y Everardo Rodríguez-Gutiérrez⁴

Recibido: 10 de octubre de 2017.

Aceptado: 11 de marzo de 2021.

Publicado: abril de 2021.

RESUMEN

Antecedentes. La ciudad de San Miguel de Allende, Guanajuato, fue fundada en el semiárido de México en la que históricamente existían numerosos manantiales en la parte baja de la Cuenca Alta del Río La Laja. Su desarrollo ha llevado a una extracción excesiva de agua del acuífero para satisfacer diversas necesidades a lo largo del tiempo. **Objetivos.** Comprender el cambio de las manifestaciones de agua subterránea en el Área de Influencia Hidrológica de la ciudad de San Miguel de Allende (AIHCSMA) y en particular la permanencia de algunos manantiales para identificar propuestas de manejo hacia la conservación de la vegetación, de la biodiversidad y recuperar el funcionamiento hídrico en diferentes escalas de tiempo. **Métodos.** Se elaboró una delimitación del área de influencia con bases hidrológicas (AIH), hidrogeológicas, historia, mapeo y caracterización de los ecosistemas asociados a dichas manifestaciones. **Resultados.** El medio hidrogeológico está compuesto por rocas volcánicas en las partes altas de la sub-cuenca, así como por sedimentos poco consolidados y abanicos aluviales en las partes medias y bajas. Se localizaron y caracterizaron 23 manantiales y tres ciénagas; actualmente dos manantiales y una ciénaga se han secado completamente y dos ciénagas han disminuido su caudal histórico. En el AIH existen 504 pozos, de los cuales se extraen 61 hm³/año. Las principales vías de movimiento del agua son las rocas fracturadas y el medio granular. **Conclusiones.** La ubicación de los manantiales y ciénagas está relacionada con zonas de contacto geológico entre diferentes estructuras tectónicas, presentan diversas características que indican flujos locales y uno de tipo intermedio; la disminución o pérdida de caudal está asociada a la apertura de pozos cercanos. Se plantean propuestas de manejo hacia la conservación de la vegetación y la biodiversidad en la sub-cuenca para recuperar el funcionamiento hídrico en diferentes escalas de tiempo.

¹ Centro de Geociencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla, Boulevard Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, 76230. México

² Unidad Multidisciplinaria de Docencia e Investigación (UMDI), Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Juriquilla. Boulevard Juriquilla 3001, Juriquilla, Querétaro, 76230. México

³ Facultad de Ingeniería / Facultad de Ciencias Naturales, Universidad Autónoma de Querétaro, Campus UAQ-Aeropuerto. Carrera a Chichimequillas s/n, Ejido Bolaños, Querétaro, 76140. México

⁴ Universidad de Guanajuato, Campus Celaya-Salvatierra. Ing. Javier Barros Sierra 2011, Celaya, Guanajuato, 38140. México

*Corresponding author:

Enrique A. Cantoral-Uriza: e-mail: cantoral@ciencias.unam.mx

To quote as:

Orozco-Uribe, L. C., M. A. Ortega-Guerrero, E. A. Cantoral-Uriza, M. Á. Domínguez-Cortázar & E. Rodríguez Gutiérrez. 2021. Cambio de las manifestaciones de agua subterránea y características de los ecosistemas asociados en el semiárido mexicano. *Hidrobiológica* 31 (1): 1-15.

DOI:10.24275/uam/itz/dcbs/hidro/2021v31n1/
Orozco

ABSTRACT

Background. The city of San Miguel de Allende, Guanajuato, was founded in the semi-arid of Mexico in which historically there were numerous springs in the lower part of the La Laja Upper Basin. Its history has led to an excessive extraction of water from the aquifer to meet different needs at the time. **Goals.** Understand the evolution of the manifestations of groundwater in the Area of Hydrological Influence of the city of San Miguel de Allende (AIHCSMA, in spanish) and in particular the permanence of some springs that allow to identify proposals of management towards the conservation of the vegetation and the biodiversity, to recover the water operation in different scales of time. **Methods.** It was made a delimitation of the area of influence was elaborated with hydrological bases (AIH), hydrogeological, history, mapping and characterization of the ecosystems associated to these manifestations. **Results.** The hydrogeological environment is composed of volcanic rocks in the upper parts of the sub-basin, as well as by poorly consolidated sediments and alluvial fans in the middle and lower parts. 23 springs and three swamps were located and characterized; currently two springs and one swamp have completely dried and two marshes have diminished their historical flow. In the AIH there

are 504 wells, of which 61 hm³/year are extracted. The main water pathways are fractured rocks and the granular medium. **Conclusions.** The location of the springs and swamps is related to geological contact zones between different tectonic structures, they present diverse characteristics that indicate local flows and one of intermediate type; the decrease or loss of flow is associated with the opening of nearby wells. Management proposals are proposed towards the conservation of vegetation and biodiversity in the sub-basin to recover water performance at different time scales.

Key words. Groundwater, hydrogeology, springs, flow systems, conservation proposals, San Miguel de Allende.

INTRODUCCIÓN

La ciudad de San Miguel de Allende se encuentra ubicada en el semíárido de México, donde la precipitación anual y la presencia de agua superficial son mínimas, actualmente esta última se encuentra con altos niveles de contaminación. Para satisfacer las necesidades de los sectores doméstico, turístico, pecuario y agroindustrial, históricamente se ha recurrido a la extracción de agua subterránea que últimamente ha sido excesiva, lo que ha llevado a una crisis local de agua a la que se le ha dado poca atención (Ortega, 2000; Ortega-Guerrero *et al.*, 2002; INEGI, 2005; García-García, 2006; Ortega-Guerrero, 2009; Ortega-Guerrero, 2013).

La Villa de San Miguel el Grande y el Santuario de Jesús Nazareno de Atotonilco están considerados como sitios del patrimonio mundial, cultural y natural por la UNESCO. El resto del patrimonio cultural del municipio está constituido por corredores de sitios arqueológicos y paleontológicos, caminos reales, corredores de capillas familiares o de indios y arquitectura hidráulica tradicional (H. Ayuntamiento de San Miguel de Allende, 2012).

La fundación de la ciudad de San Miguel de Allende (SMA), se dio en el contexto de las luchas territoriales de los indígenas chichimecas y otomíes por la construcción del Camino Real de la Plata, que comunicaba Zacatecas con la Ciudad de México durante la colonia española. El rasgo importante a destacar para este estudio, es la ubicación de parte de la ciudad en la zona media de las colinas, entre los manantiales de El Chorro, también conocidos como Izcuinapan y los manantiales del Batán (El Charco del Ingenio), en dirección poniente de otros manantiales conocidos siglos después como la Ciénega de Pineda (Landeta, 2010).

En el análisis del ciclo hidrológico, encontramos una interacción entre el componente superficial y el subterráneo. La entrada de agua se compone por la infiltración, dada por un flujo descendente, que al alcanzar el nivel freático, provoca su elevación y la recarga de un acuífero. Posteriormente, el movimiento del agua tiende a ser horizontal, asociado a las condiciones geológicas que determinan la conductividad hidráulica del medio por donde se mueve.

La topografía tiene un efecto importante en la formación de los sistemas de flujo de agua subterránea; Tóth (2000, 2009) los diferencia entre sistemas de flujo local, intermedio y regional. En cuencas alargadas y relativamente planas, con niveles freáticos uniformes, se produce un solo sistema de flujo, por lo regular de tipo regional; en áreas montañosas, se producen numerosos subsistemas dentro de un sistema de flujo mayor, siendo en su mayoría de tipo local (Freeze & Cherry, 1979; Tóth, 2000) (Fig. 1). En las salidas, el agua subterránea puede comu-

nícarse con escurrimientos superficiales -arroyos y ríos- o a través de movimientos ascendentes verticales, que pueden formar manantiales o estar relacionados a cuerpos de agua mayores.

El contexto hidrogeológico determina en gran medida la forma del movimiento del agua subterránea y se manifiesta posteriormente en la superficie. Las características del medio como la heterogeneidad, anisotropía, textura y porosidad, y la presencia de estructuras tectónicas, determinan el movimiento del agua y el volumen que se presentará en los puntos de salida, lo que se manifestará en igual diversidad de salidas superficiales como manantiales, norias y ciénagas.

Así, los manantiales son considerados como zonas de descarga de agua subterránea de cualquiera de los tres tipos de flujo mencionados, donde el nivel freático alcanza la superficie del terreno (Sada & Pohlmann, 2006; Brown *et al.*, 2007). Los flujos se han clasificado a partir de diversos criterios como: caudal (Meinzer, 1923), presión (Botosaneanu, 1998), estructura geológica (Bryan, 1919), calidad del agua y temperatura (Meinzer, 1923), características ambientales y bióticas (Pérez-Munguía, 2004; Spitale *et al.*, 2012), entre otros. Otros indicadores de zonas de descarga suelen ser sitios con presencia de plantas freatofitas, zonas de precipitación de minerales en el suelo por evaporación y la presencia de cuerpos de agua permanente (Freeze & Cherry, 1979; Tóth, 2000).

El agua subterránea es la principal fuente para las actividades humanas, su extracción excesiva lleva a disminuciones en los niveles freáticos que a su vez provocan la reducción de los caudales base de los ríos, subsidencia del terreno, intrusión salina, salinización de terrenos, pérdida de manantiales y ecosistemas con afinidades freáticas (Durazo & Farvolden, 1989). La extracción de agua subterránea se da principalmente a través de la perforación de pozos; en el caso de la Cuenca de la Independencia donde se encuentra SMA, dicha perforación ha aumentado históricamente de manera exponencial, existiendo actualmente cerca de 3,000 (Ortega-Guerrero, 2013).

El presente escrito muestra el cambio de las manifestaciones de agua subterránea en el Área de Influencia Hidrológica de la ciudad de San Miguel de Allende (AIHCSMA). Se describe su contexto hidrogeológico, histórico y las características del caudal, presencia de flora y fauna específica, su historia y usos; así como una serie de propuestas ambientales a nivel de zonas funcionales de la sub-cuenca para apoyar su conservación y contribuir al entendimiento de su funcionamiento.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El AIHCSMA abarca una superficie de 470.88 km², que representa el 30.24% del área municipal. Presenta un rango altitudinal que va de los 1,840 msnm en la cortina de la Presa Allende, hasta los 2,810 msnm en la parte alta del volcán Palo Huérano o Los Picachos.

Se ubica en la parte baja de la Cuenca Alta del Río La Laja con un área de 7,000 km² (Palacios-Vélez & López-López, 2007). Es también conocida como Cuenca de la Independencia (Ortega-Guerrero *et al.*, 2002), que es de tipo exorreico y el río La Laja representa su cauce principal, cuya salida es controlada por la cortina de la Presa de Allende al sureste de la ciudad de SMA.

El clima es semiseco con lluvias en verano, la temperatura media anual es de 16.6 ± 2.5°C, la precipitación anual es de 477.6 ± 119.9

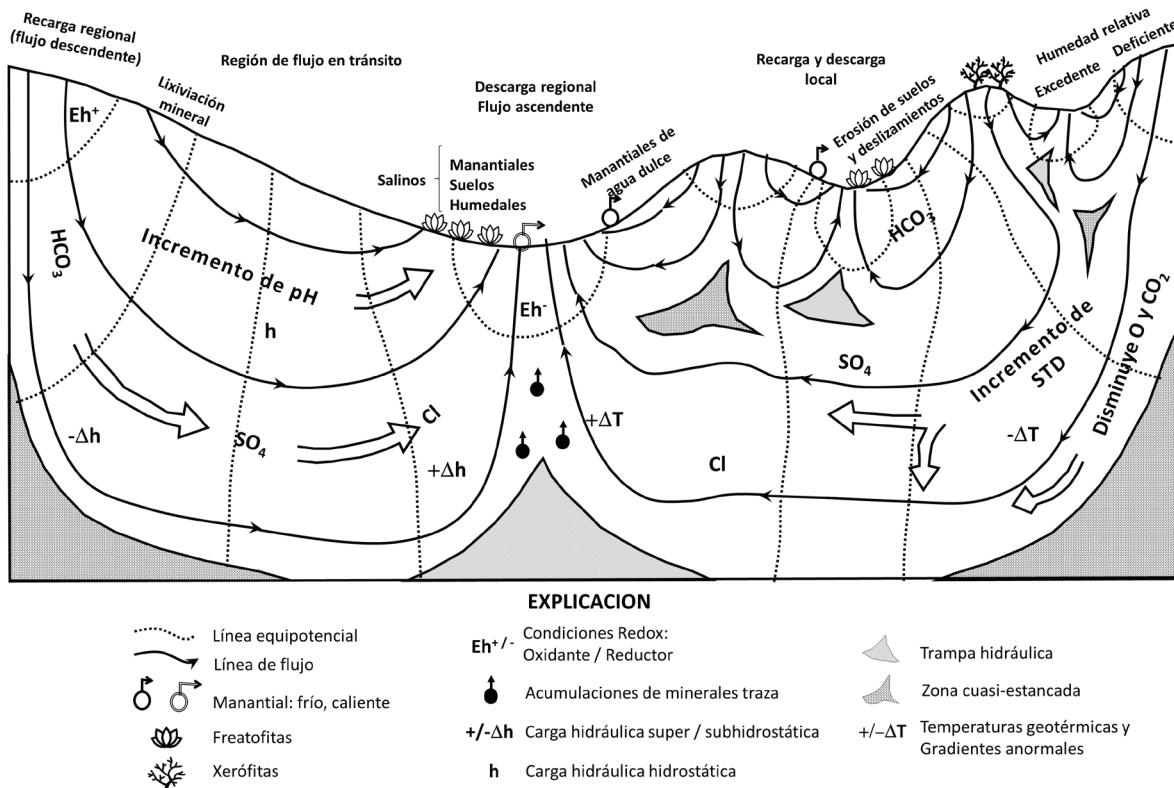


Figura 1. Sistemas de flujo en una cuenca regional (Tóth, 1999).

mm, la evaporación promedio anual es de $1,906.6 \pm 167$ mm y el índice de aridez de 0.255 ± 0.075 (Aguilar-García & Ortega-Guerrero, 2017). La vegetación predominante es matorral xerófilo y bosque de encino en las zonas altas. Los usos del suelo son urbano, agropecuario y de conservación (H. Ayuntamiento de San Miguel de Allende, 2012).

Desde el punto de vista hidrogeológico la región se ubica en el límite de tres provincias geológicas: la Provincia Volcánica Sierra Madre Occidental, la Sierra Madre Oriental y la Faja Volcánica Transmexicana (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001). En esta cuenca existe un acuífero regional fracturado y otro granular (Ortega-Guerrero, 2009), el primero se asocia a las rocas de andesita y basalto de la formación La Joya (Tmj), que son los productos volcánicos provenientes de los estratovolcanes del Terciario: Palo Huérano (Los Picachos), La Joya (Támbula), San Pedro y otros derrames y aparatos menores, mismos que yacen sobre los derrames, depósitos de lahar y brechas de composición andesítica y dacítica (Tdcc) y forman un domo en el flanco oriental del volcán Palo Huérano: la andesita Allende, la ignimbrita riolítica El Obraje, andesita El Cedro (ToA), e ignimbritas (Tig) del bloque levantado de la falla de San Miguel de Allende; así como a rocas de origen marino (KiCa) y rocas intrusivas del Mesozoico (Alaniz-Álvarez *et al.*, 2001; Pérez-Venzor *et al.*, 1996). Las dos estructuras principales corresponden a la falla de San Miguel de Allende y Palo Huérano. El acuífero granular lo constituyen depósitos de arenisca y conglomerado cenozoicos (ArCg) de origen aluvial y lacustre que rellenan las depresiones tectónicas principales asociadas a la falla de San Miguel de Allende y la planicie de las par-

tes bajas de los volcanes principales aparecen intercaladas con rocas ígneas Cenozoicas (Nieto-Samaniego *et al.*, 1999). Regionalmente, el acuífero granular forma parte del Acuífero de la Independencia (Ortega-Guerrero, 2009) y administrativamente, en parte de los acuíferos de SMA (CEAG, 2009) y una porción del acuífero Cuenca Alta del Río Laja (Hernández-Hernández, 2010).

METODOLOGÍA

EIAIHCSMA se delimitó a partir de un recorte de la sub-cuenca RH12Hb Presa Ignacio Allende, que forma parte de la Cuenca Alta del Río Laja y a su vez, de la Región Hidrológica Lerma-Chapala-Santiago. Tal recorte tiene como base la delimitación de subcuencas elaborada por INEGI y disponible a través del Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (INEGI, 2012). El sistema de drenaje tiene como referencia y punto de salida, la cortina de la Presa Allende (Fig. 2). Para delimitar el área de influencia hidrológica, se consideró la dirección de los flujos superficiales de agua desde las partes altas de la sub-cuenca hacia la ciudad de SMA que a su vez, tienen efectos en el tema de riesgos y eventualidades hídricas; además de la ubicación de los manantiales principales.

La descripción del contexto hidrogeológico se realizó mediante la revisión de literatura especializada relativa a la geología de la región y sus estructuras tectónicas: Pérez-Venzor *et al.* (1996) y Alaniz-Álvarez *et al.* (2001).

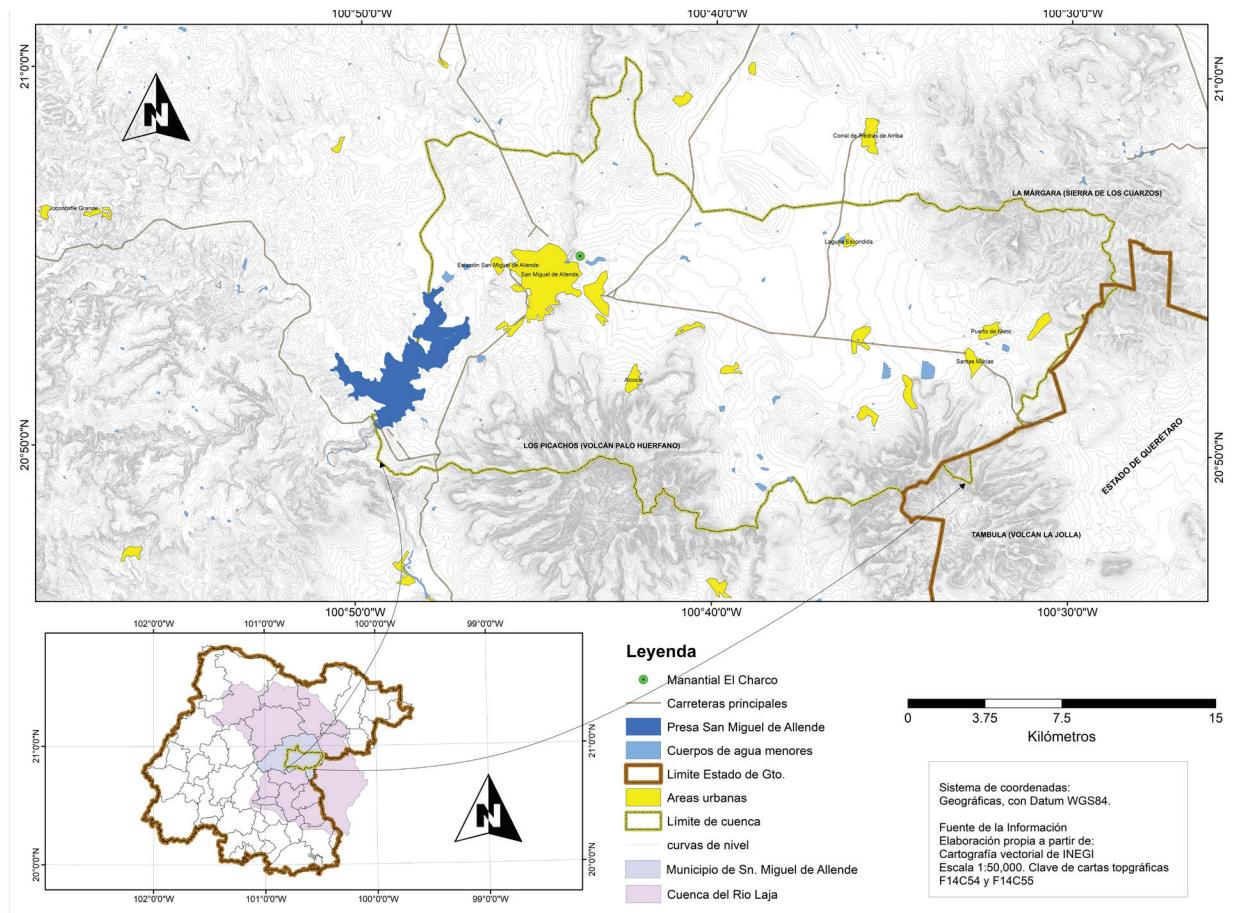


Figura 2. Delimitación del área de influencia hidrológica de San Miguel de Allende, dentro de la sub-cuenca RH12Hb “Presa Ignacio Allende” indicada por el polígono azul en la Cuenca Alta del Río Laja. Se muestran las principales elevaciones topográficas.

La ubicación geográfica, historia y usos de las manifestaciones de agua subterránea en el área de influencia hidrológica, requirió en primer lugar de la revisión bibliográfica de documentos con descripciones históricas del área de estudio como Díaz de Gamarra-Dávalos (1777), Morfi (1778) y García-García (2006), posteriormente la revisión de mapas de INEGI escala 1:50 000 y entrevistas a pobladores de la región.

Para la ubicación de las salidas de agua subterránea, se llevaron a cabo recorridos de campo y se georreferenciaron con ayuda de un Sistema de Posicionamiento Global, para luego ser representados como una capa de puntos en un Sistema de Información Geográfica (SIG) (ESRI, 2013) y analizados en forma combinada con capas de topografía, geología e hidrología. La caracterización de los manantiales y Ciénegas incluye la temperatura relativa respecto al cuerpo humano (Kresic, 2006) y la medida con termómetro, caudal, presencia de flora y fauna, historia y usos. Los manantiales encontrados se clasificaron siguiendo a Botosaneanu (1998) en: limnocrénicos (estanque), helocrénicos (filtración) y rheocrénicos (flujo). De la misma forma, se identificaron evidencias de agua ocasionadas por exploraciones y explotación minera.

La caracterización biótica de los manantiales consistió en identificar fauna (insectos, aves, anfibios, mamíferos, reptiles) que se clasifi-

caron por especie y nombre común, indicadora de disturbio o conservación, así como su uso; mientras que la flora se identificó a partir de su nombre específico, nombre común, uso e indicador de disturbio o conservación.

Finalmente, para analizar los cambios que han ocurrido en la permanencia de las manifestaciones de agua subterránea, se sobrepuso una capa de ubicación de pozos (IEE, 2005), se consultó literatura referente a la situación del acuífero regional como Ortega-Guerrero (2009, 2013) y Hernández-Hernández (2010) y se procedió a su interpretación con apoyo de la información obtenida en las entrevistas.

RESULTADOS

Aspectos históricos de las salidas de agua subterránea. La ciudad de San Miguel de Allende se asentó en una zona con abundantes manantiales y manifestaciones de agua subterránea. En 1777 Díaz de Gamarra habla del Chorro y Sieneguita, éste como termal y en 1778 F. A. de Morfi menciona al Chorro y Ojo de agua (García-García, 2006). En 1904 González (2004) menciona a los manantiales El Chorro, Cieneguita, Xoté, Montecillo y Atotonilco.

Las entrevistas con habitantes, mostraron que existieron al menos dos manantiales caudalosos: El Chorro, que abastecía a la ciudad de SMA, seco hace aproximadamente diez años y El Tajo o Las Tinajas, que abastecía a la población de Puerto de Nieto, seco hace aproximadamente 20 años. Igualmente, se encontró que varios manantiales, hoy considerados como limnocrénicos, anteriormente eran rheocrénicos.

Ubicación y clasificación de las salidas actuales de agua subterránea. Se localizaron y georreferenciaron 23 manantiales y tres ciénagas. De éstos, 10 fueron considerados como limnocrénicos (0.2 a 20 lt/min), tres helocrénicos, nueve rheocrénicos y dos artificiales (Fig. 4). Todos los manantiales son fríos (<20°C), a excepción de Cieneguita, el cual es termal (32.9°C).

En la caracterización biológica, se encontró que tres de ellos (El Charco, Cieneguita y Rincón del Purgatorio), son habitados por peces, langostinos y cangrejos. En todos se encontró flora asociada: árboles como sauces (*Salix sp.*), fresnos (*Fraxinus sp.*) y arbustos como jaras (*Senecio sp.*).

En cuanto a la ubicación, se observa una simetría en altitud así como coincidencia en temperatura y condiciones bióticas entre los ma-

nantiales rheocrénicos Rincón del Purgatorio (1,991 msnm) y El Charco (1,990 msnm) en ambos lados del volcán de Los Picachos, mientras que en el caso de los manantiales de los volcanes de La Mágina y Támbula no se encontraron relaciones similares.

El uso es de tipo doméstico: provisión de agua potable, riego de huertas y parcelas y como abrevaderos para el ganado.

La ubicación de los manantiales y sus características nos permite dilucidar lo siguiente: los manantiales de Rincón del Purgatorio y El Charco, relacionados al volcán Palo Huérano son rheocrénicos, con temperatura fría y presencia de macrofauna, se asocian a un flujo de tipo local con descarga importante. Los manantiales con caudales menores encontrados en altitudes mayores, dada la topografía accidentada, pueden indicar la presencia de flujos locales de recorrido corto. El manantial de Cieneguita, de tipo rheocrénico y termal, ubicado en la porción noroeste del AIHCSMA, indicaría la presencia de un flujo subterráneo de tipo intermedio. Respecto a los manantiales de los volcanes de Támbula y La Mágina, presentaron caudales de tipo limnocrénico y helocrénico a mayores altitudes, relacionados a flujos locales y descarga menor.

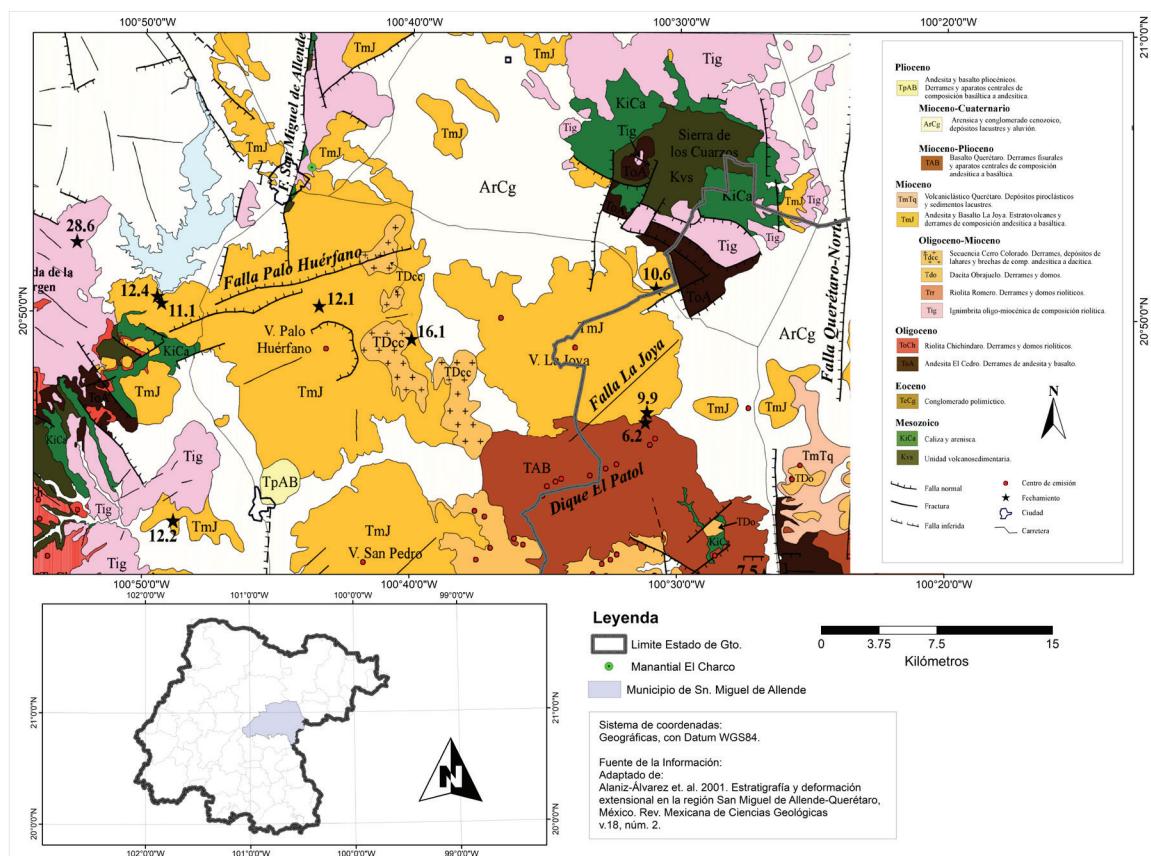


Figura 3. Contexto geológico de la región, denota la composición rocosa-fracturada de los conos volcánicos presentes en la sub-cuenca así como la composición sedimentaria-granular en las partes medias y bajas. Se muestran las principales estructuras tectónicas siendo de especial atención para este estudio las fallas de San Miguel de Allende, Palo Huérano y aquellas presentes en la Sierra de Los Cuarzos. Tomado de Alaniz-Álvarez *et al.* (2001).

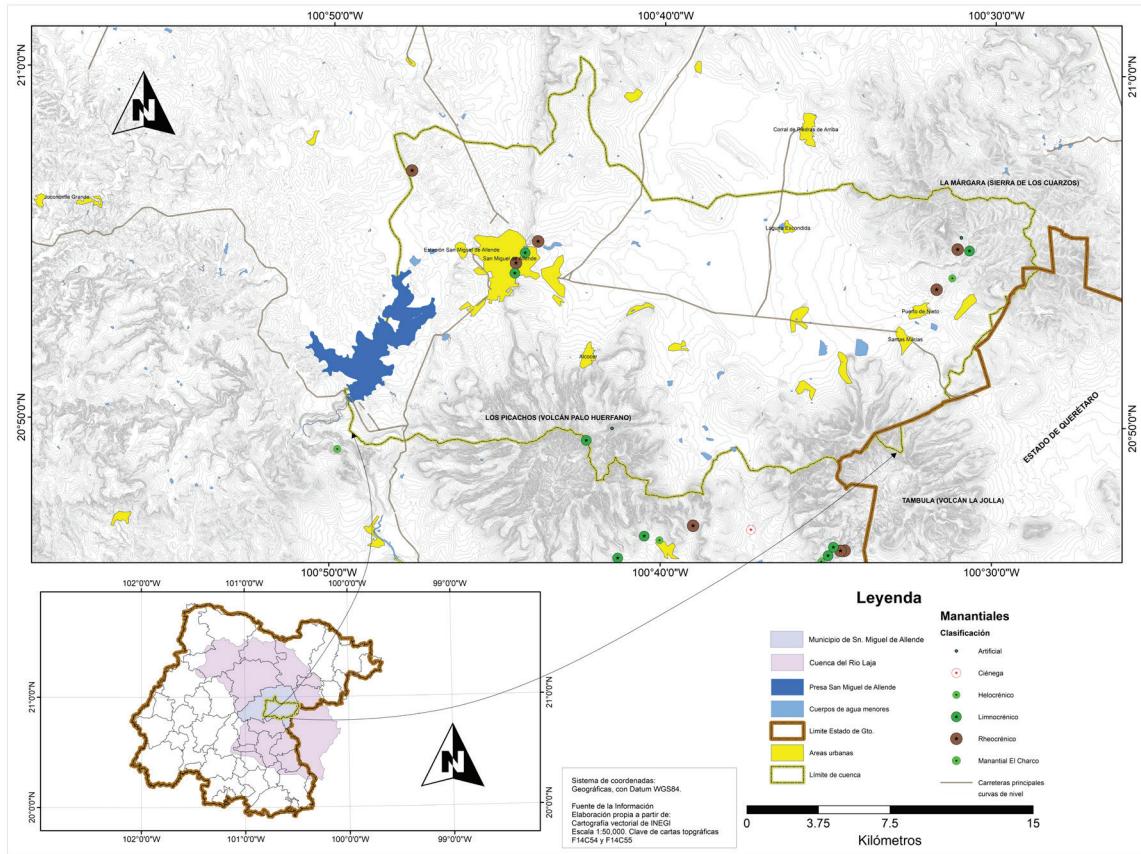


Figura 4. Ubicación y clasificación de manantiales y ciénagas en el AIHCSMA.

Controles regionales en las salidas de agua subterránea. Sobreponiendo el mapa de ubicación del AIHCSMA y de las distintas manifestaciones de agua subterránea encontradas (Fig. 5), se observa una relación entre la distribución de manantiales y ciénagas con estructuras tectónicas y contactos geológicos.

El grupo de manantiales de la ciudad de SMA se ubica en los límites de coladas de ignimbritas y aglomerados del Volcán Palo Huérfano y en la proximidad de la Falla de San Miguel. El manantial de Cieneguita, se ubica en la traza de una fractura regional que cruza el Río Laja.

Otros manantiales se localizan en fracturas en la parte sur de los volcanes Palo Huérfano y La Joya. Finalmente, otro grupo se ubica en zonas de contactos de medio fracturado con medio granular. Esta relación, lleva a suponer que la mayor parte de la infiltración y movimiento del agua evidente, se da en el medio fracturado de los distintos volcanes y serranía.

Cambio de las salidas de agua subterránea y extracción de agua en pozos. Los municipios al interior de la Cuenca Alta del Río Laja o de la Independencia, dependen exclusivamente de sus flujos subterráneos para el suministro de agua potable y para los usos doméstico, industrial y agrícola, este último es el principal consumidor, con el 85% del volumen de agua extraída (CNA, 1996).

Actualmente, a pesar de la existencia de tres “Decretos de veda rígida” de 1958, 1964 y 1976, hay cerca de 3 000 pozos en la Cuenca de la Independencia. Su profundidad total varía de 100 a 300 m, mientras que la profundidad de su nivel estático aumenta a una tasa que varía de los 2 a los 5 m por año, lo cual hace necesario perforar cada vez a mayores profundidades con los consecuentes incrementos en los costos de mantenimiento y consumo de energía (CNA, 1996). Situación similar prevalece en el resto del estado de Guanajuato (Chávez, 1998).

La historia de la perforación de pozos en SMA, inició en 1935, cuando el Sr. Julián Ramírez compró tres hectáreas cercanas a la comunidad de Puerto de Sosa, para encontrar agua a poca profundidad y después, adquirir tierras en la comunidad cercana a Los Rodríguez, y enviarla hacia allá. Este pozo en sus inicios tenía una profundidad de 10 metros y un caudal de 400 l/s, en 1995 su caudal se había reducido a 100 l/s con una profundidad de 60 metros y para el 2006 estaba completamente seco. La mayor apertura de pozos se dio en los años cuarenta y cincuenta del siglo XX, el rendimiento promedio en estos últimos era de 80 l/s y se bombeaba a una profundidad de 35 metros. El agua subterránea era para el riego de cultivos (García-García, 2006).

En 2006, se contabilizaban un total de 805 pozos profundos en operación para el municipio de SMA, de los cuales 15 eran para uso

potable urbano, 112 potable rural, ocho para uso industrial y 670 para uso agrícola. El caudal que se extraía para uso potable era de 400 l/s, con 18 horas en promedio de funcionamiento. El pozo de uso agrícola más importante fue el de San Julián en la Ciénaga de Landeta, del que se extraían en promedio 26 l/s (García-García, 2006).

En la Figura 6, se muestra la ubicación de las salidas naturales de agua subterránea y de los distintos pozos al interior del AIHCSMA; el volumen extraído de los acuíferos para el 2004 era de 43.3 hm³/año y hacia el 2007 había aumentado a 49.0 hm³/año; de este volumen, solo el 15% era para uso doméstico y el resto para uso agrícola e industrial. La Comisión Estatal de Aguas de Guanajuato (CEAG) identifica y reconoce 504 aprovechamientos, de los cuales el 84% son pozos, 15% son norias y 1% son manantiales (Hernández-Hernández, 2010). Con los datos anteriores se infiere un incremento anual de aproximadamente 2 hm³/año, que representaría un total de extracción de 65 hm³/año al 2015; por su parte, en la Cuenca de la Independencia se extraen aproximadamente 1,000 hm³/año, por lo que la extracción dentro del AIHCMA representaría el 6.5% del total aprovechado.

De continuar estas tendencias de extracción de agua subterránea, es de esperarse un mayor impacto negativo en términos de aparición y acumulación de elementos químicos disueltos en los pozos, que ya en la actualidad están provocando afectaciones en la salud de las personas que la consumen (Ortega-Guerrero, 2009), en los campos de cultivo de riego y en la pérdida de ecosistemas asociados a manantiales y niveles freáticos someros.

Según lo mencionado en las entrevistas a los pobladores, la desaparición de los manantiales de El Chorro y El Tajo o Las Tinajas, puede estar relacionada tanto al uso de dinamita, por un mayor caudal, como al abatimiento del nivel freático provocado por la apertura en los 80's de pozos cercanos para el riego de cultivos. La modificación local de la vegetación en las zonas de recarga, es otro factor que pudo afectar el volumen de infiltración.

Es muy probable que la flora y fauna que habitaba estos manantiales que han perdido o disminuido su caudal, se haya extinto no sólo localmente, sino a nivel mundial, ya que los manantiales de ecosistemas áridos representan sitios con alto grado de endemismo (Brown *et al.*, 2007).

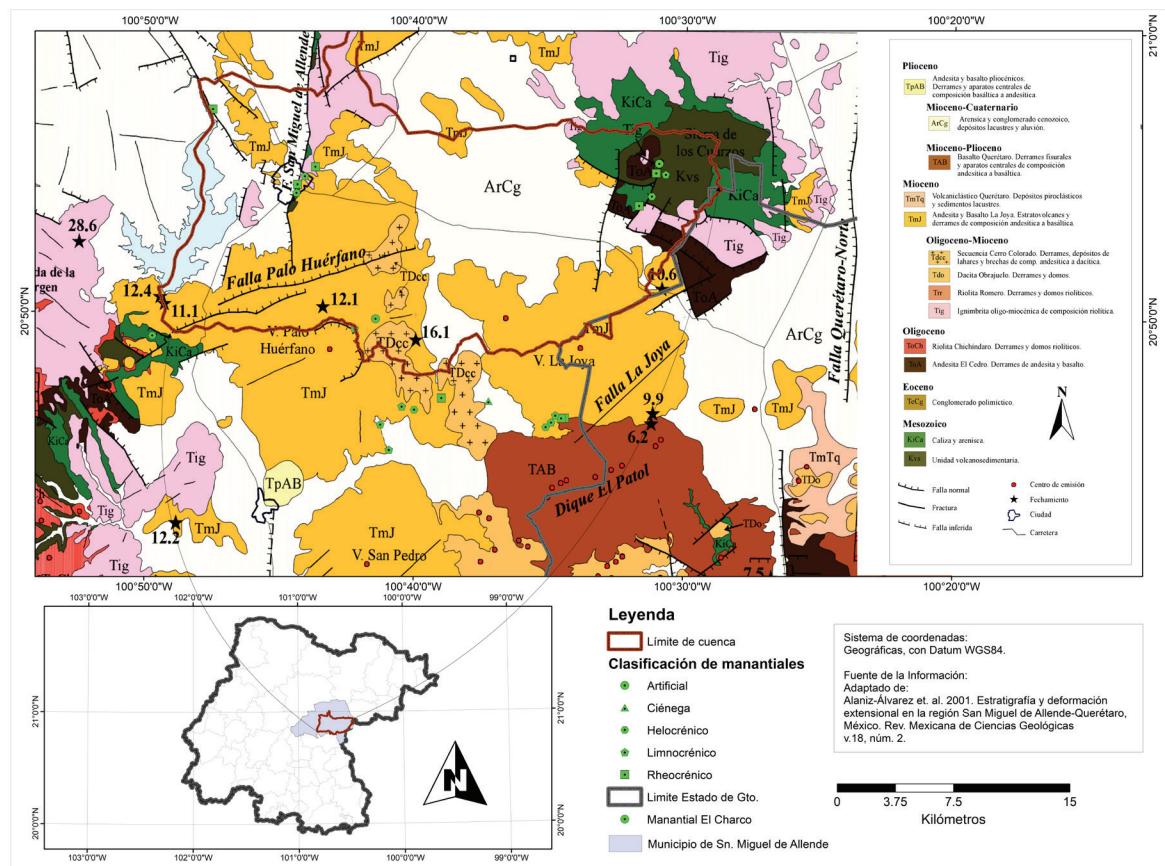


Figura 5. Relación de las manifestaciones de agua subterránea con el medio hidrogeológico: asociadas al sur de los conos volcánicos en puntos de contacto geológico, fallas del norte de la Presa de Allende, sur de la Sierra de Los Cuarzos, Volcán La Joya y la Falla de San Miguel de Allende.

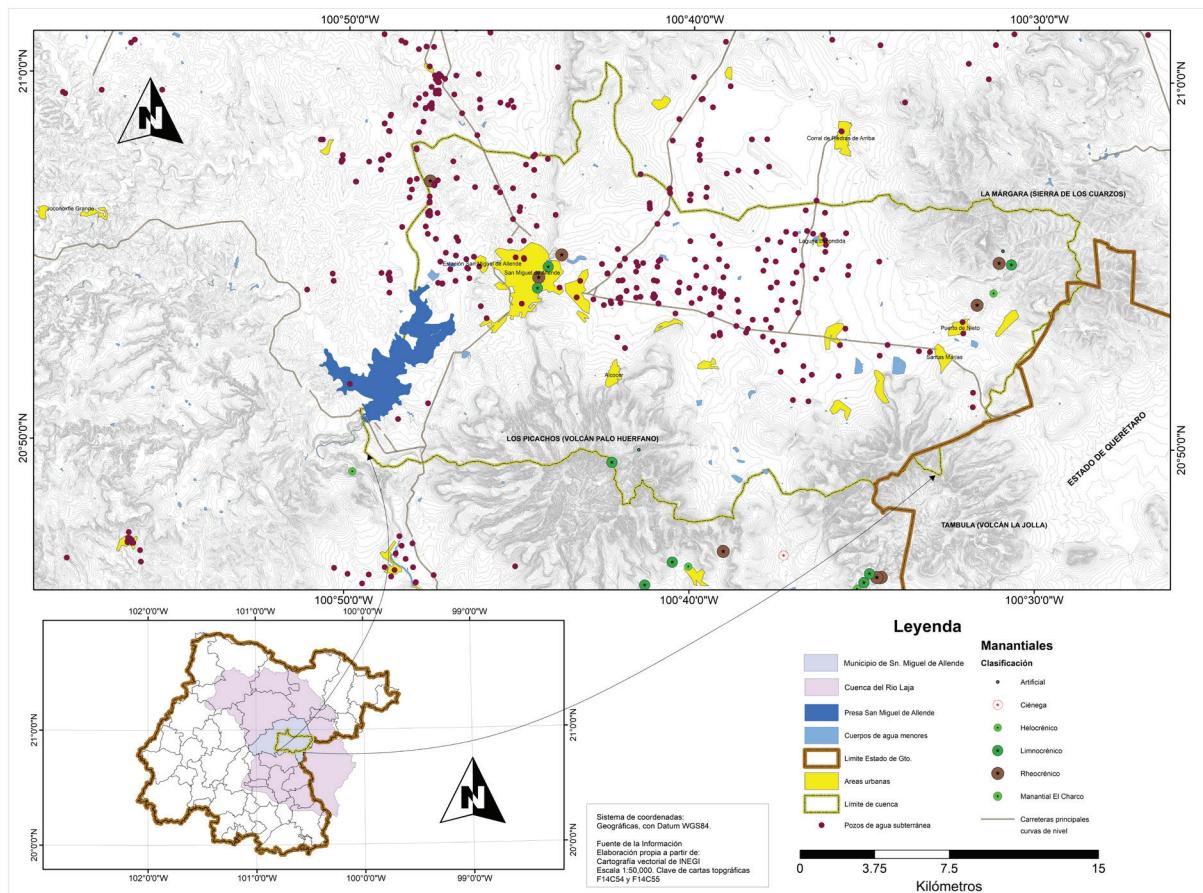


Figura 6. Ubicación de los pozos dentro del AIHCSMA, se observa la cercanía de pozos a manantiales secos en la actualidad o su presencia dentro de las ciénagas que han desaparecido o disminuido su volumen.

Manejo de la biodiversidad y educación ambiental para mejorar la infiltración. La conservación de manantiales, requiere de acciones a nivel de zonas funcionales de recarga en la sub-cuenca, que ayuden a recuperar el flujo subterráneo que los alimenta, a través de la oferta de servicios ecosistémicos por áreas funcionales (Villa *et al.*, 2002). **Alta.** Aprovechamiento de especies de flora y fauna (Tablas 1 y 2) con algún uso dentro del AIHCSMA, a través de proyectos de extracción sustentable con el establecimiento de Unidades de Manejo Ambiental (UMA). Agostadero, con parcelas de rotación de ganado con el coeficiente de agostadero por tipo de vegetación de 5 ha/UA en temporada de secas y de 4.6 ha/UA en lluvias (Carranza-Velázquez, 2010). Turismo ecológico con caminatas de observación de bajo impacto, con beneficio económico a los pobladores de zonas rurales. Esta zona ha sido propuesta como Área Natural Protegida Estatal bajo el nombre de “Corredor Biológico Támbula-Picachos-Presa de Allende”, ello apoya las opciones de aprovechamiento. **Media.** Producción agrícola y pecuaria, relacionada con el alto nivel de agrobiodiversidad de agroecosistemas tradicionales, con efectos positivos en su funcionamiento (Nicholls & Altieri, 2015); que estén basados en la biodiversidad local con una diversificación y

rotación de cultivos, que incluya en la rotación una leguminosa que propicie la fijación de nitrógeno que beneficie al suelo. La técnica viable para la preparación de terrenos es la rotura vertical por un periodo de 7 a 11 años antes de poner en práctica la siembra directa o labranza cero, con cambios favorables para el suelo que permita un tránsito de agua hacia los acuíferos (Aguilar-García, 2008; Aguilar-García *et al.*, 2011; 2014). El rescate del conocimiento local del grupo étnico otomí o hñähñü desde la época precolombina, sobre suelos, relieve, vegetación y los movimientos del agua, quienes desarrollaron la agricultura de temporal, con estructuras para la captura de agua como bordos, el uso intensivo del maguey (*Agave spp.*) y la fertilización con estiércol para mejorar el suelo (Toledo *et al.*, 1985; Johnson, 1977; Nicolls & Altieri, 2015). **Baja.** Se llevan a cabo actividades adicionales de tipo secundario como el turismo y la pesca. Por lo tanto, la educación ambiental enfocada hacia el conocimiento de los ecosistemas y sus servicios que caracterizan esta región, es parte de las estrategias básicas para iniciar un cambio cultural a largo plazo en la población local y visitante de SMA.

Tabla 1. Especies de flora con algún uso actual o potencial dentro del AIHCSMA. Esta lista se basa en la experiencia propia, así como en distintas fuentes como Gutiérrez (2008), Terrones *et al.* (2004), Tarango-Arámbula (2005), Báez-Montes *et al.* (2012) y Hernández-Sandoval *et al.* (2012).

Especie	Nombre común	Uso						Indicadora de conservación		
		Alimenticio	Medicinal	Ornamental	Ceremonial	Madera/ leña	Artesanías	Construcción	Forraje	Indicadora de disturbio
<i>Acacia farnesiana</i> (L.) Willd	huizache hediondo					X		X		
<i>Acacia shaffneri</i> (L.) Willd	huizache chino					X		X		
<i>Agave</i> spp (L.)	agave, maguey	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>Antiphytum parryi</i> S. Watson	hierba del negro		X							
<i>Arbutus</i> sp. L.	madrón	X				X		X		X
<i>Arctostaphylos pungens</i> L.	pingüica	X		X		X		X		
<i>Artemisia ludoviciana</i> Nutt.	ajenojo			X						
<i>Baccharis</i> sp. L.	jara			X						
<i>Bouvardia longiflora</i> (Cav.) Kunth	flor de San Juan			X						
<i>Bryophyta</i>	musgo			X		X				X
<i>Buddleja cordata</i> Kunth	tepozán			X		X				
<i>Bursera fagaroides</i> (Kunth) Engl	palo xixote			X		X				
<i>Castilleja tenuiflora</i> Benth.	hierba del cáncer			X				X		X
<i>Cedrela dugesii</i> S. Watson	nogal cimarrón, cedro			X						
<i>Chrysactinia mexicana</i> A. Gray	San Nicolás			X						
<i>Chrysanthemum parthenium</i> (L.) Bernh.	santamaría			X						
<i>Condalia mexicana</i> Schlecht.	granjeno	X				X			X	
<i>Dahlia</i> Cav. spp.	dalia			X						
<i>Datea</i> L. spp.	engordacabra			X				X		
<i>Dasyllirion acrotriche</i> (Schiiede) Zucc.	cucharilla			X		X				
<i>Dioscorea</i> L. sp.	Camote de cerro			X						
<i>Dodonaea viscosa</i> Jacq.	Ocotillo			X		X				
<i>Dysphania ambrosioides</i> L. Mosyakin et epazote Clements				X					X	

Tabla 1. Continúa.

Especie	Nombre común	Uso						Indicadora de conservación		
		Alimenticio	Medicinal	Ornamental	Ceremonial	Madera/ leña	Artesanías	Construcción	Forraje	Indicadora de disturbio
<i>Dyssodia</i> Cav. Sp.	Parraleña	X								
<i>Eryngium heterophyllum</i> Engelm.	hierba del sapo	X					X	X	X	
<i>Erythrina flabelliformis</i> Kerney	colorín, pato	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>Eysenhardtia polystachya</i> (Ortega) Sarg.	Palo dulce	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>Ferocactus histrix</i> (DC.) G.E. Linds	guamishe, borrachita	X		X						X
<i>Forestiera phillyreoides</i> (Benth.) Torr.	acebuché			X						
<i>Gnaphalium viscosum</i> (ex H.B.K.) Poe-	gordolobo	X								
pp. ex Kunth										
<i>Hechtia podantha</i> Mez.	guapilla	X								
<i>Sclerocarpus</i> sp. Jacq.	gachupín		X							
<i>Hetherotheca inuloides</i> Cass.	árnica		X							
<i>Ipomoea murucoides</i> Roem	cazahuate									
<i>Jatropha dioica</i> Sessé ex Carv.	sangregrado	X								
<i>Lantana camara</i> L.	peonía, cinco negritos			X						
<i>Litsea glaucescens</i> Kunth	laurel	X								X
<i>Lysiloma</i> sp.	tepehuaje				X					X
<i>Mammillaria</i> spp. Haw..	Chilitos, biznaga	X		X						X
<i>Milla biflora</i> Cav.	estrella	X	X							
<i>Mimosa</i> spp.L.	uña de gato				X					X
<i>Myrtillocactus geometrizans</i> (Mart. ex Pfeiff.) Console	garambullo	X	X	X	X					X
<i>Opuntia</i> spp.Mill.	nopal	X	X	X	X	X	X	X	X	
<i>Opuntia imbricata</i> (Haw.) DC.	cardón	X	X							
<i>Orchidaceae</i>	orquídea, lirio									
<i>Plumbago pulchella</i> Boiss.	jiricuya									

Tabla 1. Continúa.

Especie	Nombre común	Usos								
		Alimenticio	Medicinal	Ornamental	Ceremonial	Madera/ leña	Artesanías	Construcción	Forraje	Indicadora de disturbio
<i>Prosopis laevigata</i> (H. & B.) Jonhst	mezquite	X	X	X	X	X	X	X	X	X
<i>Quercus</i> spp. L.	Encino					X	X	X		X
<i>Rosmarinus officinalis</i> L.	romero		X							
<i>Salix</i> spp. L.	sauce		X				X	X		X
<i>Satureja macrostema</i> Benth.	poleo			X						
<i>Schinus molle</i> L.	pírul		X	X		X				
<i>Selaginella</i> spp. P. Beauv.	flor de peña				X					
<i>Senna</i> spp. Mill.	Bricho					X				
<i>Tagetes lunulata</i> Ortega	cinco llagas			X						
<i>Tagetes minuta</i> L.	anís		X							
<i>Tecomaria stans</i> L. Juss ex Kunth	flor de San Pedro		X	X			X		X	
<i>Thymophylla acerosa</i> (DC.) Strother	hierba del perro			X						
<i>Tillandsia recurvata</i> (L.) L.	paixtle				X					
<i>Tillandsia usneoides</i> (L.) L.	gallito				X					
<i>Verbesina greenmanii</i> Urb.	heno					X			X	
<i>Viguiera linearis</i> (Cav.) Sch. Bip.	pitaneja									
<i>Yucca filifera</i> Chabaud	romerillo									
<i>Zaluzania augusta</i> (Lag.) Sch.Bip.	yuca	X	X	X		X	X	X	X	X
	caxtingüin	X								

Tabla 2. Especies de fauna con algún uso actual o potencial dentro del AIHCSMA. Esta lista se basa en la experiencia propia, así como en distintas fuentes como Gutiérrez (2008), Tarango-Arámbula (2005) y Báez-Montes et al. (2012).

Nombre	Nombre común	Usos			
		Alimenticio	Medicinal	Piel / trofeo	Control de plagas
Insectos					
<i>Acentrocneme hesperiaris</i> Walker	gusanos de maguey	X			
<i>Apis mellifera</i> Linnaeus	abeja mielera	X	X		
<i>Comadia redtenbacheri</i> Hammer Schmidt	chinicuil	X			
<i>Liometopum apiculatum</i> Mayr	escamol	X			
<i>Melipona</i> Illiger spp.	abeja melipona	X	X		X
<i>Myrmecosystus</i> Wesmael sp.	Hormiga mielera o gushilera	X	X		X
<i>Thasus gigas</i> Klug	tantaría	X			
Anfibios y reptiles					
<i>Crotalus aquilus</i> Klauber	serrana de cascabel	X	X	X	X
<i>Coluber</i> sp Linnaeus	Chirrionera			X	
<i>Pituophis deppei</i> Duméril	alicante			X	
Aves					
<i>Columbina passerine</i> Linnaeus	torcaza	X			
<i>Cyrtonyx montezumae</i> Vigors	codorniz	X			
<i>Zenaidura asiatica</i> Linnaeus	paloma aliblanca	X			
<i>Zenaidura macroura</i> Linnaeus	paloma huijota	X			
Mamíferos					
<i>Canis latrans</i> Say	coyote		X	X	
<i>Dasypus novemcinctus</i> Linnaeus	armadillo	X	X	X	X
<i>Didelphis marsupialis</i> Linnaeus	tlacuache	X			
<i>Felis concolor</i> Linnaeus	puma		X		X
<i>Lepus californicus</i> Gray	liebre	X	X		
<i>Lynx rufus</i> Schreber	gato montés		X	X	X
<i>Mephitis</i> É. Geoffroy Saint-Hilaire & Cuvier sp.	zorillo	X	X	X	
<i>Odocoileus virginianus</i> Zimmermann	venado		X	X	
<i>Sciurus</i> Linnaeus spp.	ardilla	X			
<i>Sylvilagus</i> Linnaeus spp.	Conejo	X			
<i>Taxidea taxus</i> Schreber	tejón, tlacoyote	X	X	X	X
<i>Urocyon cinereoargenteus</i> Schreber	zorra	X	X	X	X

CONCLUSIONES

La delimitación del AIHCMA permitió comprender las dinámicas del agua subterránea a través de las salidas superficiales: manantiales y ciénagas. La importancia histórica y cultural de la ciudad, vuelve una prioridad el conocimiento de las dinámicas hídricas para asegurar el futuro no sólo de la población que la habita, sino de sus actividades económicas y los ecosistemas asociados, que son los sitios que permiten en diferentes escalas de tiempo la infiltración del agua que se encuentra de forma subterránea.

De acuerdo a la literatura, se identificaron dos vías para el movimiento del agua subterránea: el medio fracturado en los conos volcánicos de la parte alta y el medio granular en los depósitos lacustres y abanicos aluviales de la parte media y baja de la sub-cuenca, lo cual indica condiciones complejas y heterogéneas del medio en el que se mueve el agua. El AIHCSMA presenta montañas, planicies y fallas como estructuras tectónicas, que participan en la formación de sistemas de agua subterránea.

El estudio de las salidas superficiales del agua subterránea permitió un acercamiento al conocimiento del funcionamiento de los sistemas de flujo y los cambios que han influenciado su modificación o pérdida.

El inventario de manantiales en el AIHCSMA mostró que éstos se presentan principalmente al sur de los conos volcánicos, asociados a puntos de contacto entre el medio rocoso y el aluvial-lacustre, fallas del norte de la Presa de Allende, sur de la Sierra de Los Cuarzos, Volcán La Joya y en la Falla de SMA. Esta ubicación y sus características, indican flujos locales de recorridos cortos y medios. El único manantial que se considera de tipo intermedio y termal fue el de Cieneguita, en la porción noroeste del AIHCSMA.

En la investigación histórica y de campo a través de entrevistas, se encontró que dos de los manantiales con importancia histórica: El Chorro y El Tajo o Las Tinajas y la Ciénaga de Landeta están secos en la actualidad; la disminución del volumen de agua en el resto de las ciénagas y el cambio de caudal en varios de los manantiales de tipo helocrónico y limnocrónico, se relaciona con la extracción de agua en pozos agrícolas cercanos, los cuales representan el 85% de los aprovechamientos de agua subterránea en el área de influencia hidrológica.

La conservación de manantiales, puede lograrse a través de acciones en las diferentes zonas funcionales de recarga en la sub-cuenca, que ayuden a recuperar en diferentes escalas de tiempo el flujo subterráneo que los alimenta, a través del manejo de la biodiversidad, la conservación y aprovechamiento de la vegetación, la educación ambiental para relacionar procesos hidrológicos con el funcionamiento de la sub-cuenca.

REFERENCIAS

- AGUILAR-GARCÍA, R. 2008. *Utilización óptima de recursos: energía, agua, suelo e insumos en los sistemas de producción agropecuaria de regiones semiáridas*. Sitio Experimental Norte de Guanajuato, El Refugio, San Luis de la Paz. Informe técnico. 8 p.
- AGUILAR-GARCÍA, R. & M. A. ORTEGA-GUERRERO. 2017. Análisis de la dinámica del agua en la zona no saturada en un suelo sujeto a prácticas de conservación: implicaciones en la gestión de acuíferos y adaptación al cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 34(2): 91-104.
- AGUILAR-GARCÍA, R., M.L. GARCÍA-LEÁNOS & R. PAREDES-MELESIO. 2011. *Manejo agronómico de una microcuenca en el norte de Guanajuato, México: reflexiones y propuestas*. Folleto Técnico. 1^a. Reimpresión corregida y aumentada. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), Centro de Investigación Regional Centro, Sitio Experimental Norte de Guanajuato, México. 40 p.
- AGUILAR-GARCÍA, R., I.A. SOTO-GUTIÉRREZ, J.G. MEDINA-TORRES, H. SUÁREZ-DOMÍNGUEZ, A. DONGHU ÁNGELES & S. REYES-RODRÍGUEZ. 2014. *Proyecto integral para el abasto sustentable de agua y forraje para la ganadería en Guanajuato*. Comité Estatal Sistema Productivo Bovinos Carne de Guanajuato. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA), INCA Rural, Sistema Nacional de Capacitación y Asistencia Técnica Rural Integral (SINACATRI), México. 48 p.
- ALANIZ-ÁLVAREZ, S. A., A.F. NIETO-SAMANIEGO, M.A. REYES-ZARAGOZA, M.T. OROZCO-ESQUIVEL, A.C. OJEDA-GARCÍA & L.F. VASSALLO. 2001. Estratigrafía y deformación extensional en la región San Miguel de Allende-Querétaro, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 18(2): 129-148.
- BAEZ-MONTES, O., E. VARGAS-COLMENERO, Y. F. ESTRADA-SILLAS & L. C. OROZCO-URIBE. 2012. La biodiversidad le pone sazón a Guanajuato. In: CONABIO (ed.). *La Biodiversidad de Guanajuato: Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE). México, pp. 1- 446.
- BOTOSANEANU, L. 1998. *Studies in crenobiology: the biology of springs and springbrooks*. Backhuys, Leyden, The Netherlands. 261 p.
- BROWN, J., A. WYERS, A. ALDOUS & L. BACH. 2007. *Groundwater and biodiversity conservation: a methods guide for integrating groundwater needs of ecosystems and species into conservation plans in the Pacific Northwest*. The Nature Conservancy, U.S.A. 176 p.
- BRYAN, K. 1919. Classification of springs. *The Journal of Geology* 27(7): 522-561.
- CARRANZA-VELÁZQUEZ, J. A. 2010. *Propuesta de manejo sustentable de la ganadería extensiva en la microcuenca Guadalupe de Támala, Guanajuato*. Tesis de Maestría en Gestión Integrada de Cuencas, Universidad Autónoma de Querétaro. México. 129 p.
- CEAG (COMISIÓN ESTATAL DEL AGUA DE GUANAJUATO). 2018. Compendio del Agua Subterránea en Guanajuato. Gobierno del Estado, Dirección General de Planeación. Dirección de Estudios y Monitoreo. 428 p.
- CHÁVEZ, G. R. 1998. Estado actual del conocimiento del agua subterránea en el estado de Guanajuato. In: Castellanos, J.Z., J.J. Carrillo & C. Hernández (eds.). *Memoria del Simposio Internacional de Aguas Subterráneas*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. León, Guanajuato, pp. 19-28.
- CNA (COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA). 1996. *Actualización del estudio geohidrológico de la cuenca de Laguna Seca, Guanajuato*. Informe técnico realizado por la empresa Proyectos Antares, S.A. de C.V. bajo el

- contrato GAS-011-96 para la Gerencia de Aguas Subterráneas de la Comisión Nacional del Agua, México, D. F. 201 p.
- DÍAZ DE GAMARRA-DÁVALOS, J. B. 1777. *Descripción de la Villa de San Miguel el Grande y su Alcaldía Mayor*. Amigos del Museo de San Miguel de Allende, A. C. México. 93 p.
- DURAZO, J. & R. N. FARVOLDEN. 1989. The groundwater regime of the Valley of Mexico from historic evidence and field observations. *Journal of Hydrology* 112: 171-190.
- ESRI (ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE, INC.) Redlands, CA. 2013. ArcGIS [software GIS]. Version 10.2.
- FREEZE, R. A. & J. A. CHERRY. 1979. *Groundwater*. Prentice-Hall, Inc. Estados Unidos. 604 p.
- GARCÍA-GARCÍA, E. 2006. *El agua en San Miguel de Allende, ayer, hoy y mañana*. Edición de Autor, San Miguel de Allende, Guanajuato. 179 p.
- GONZÁLEZ, P. 2004. *Geografía local del Estado de Guanajuato: Lecciones escritas para dar a conocer esta fracción de la República Mexicana a los profesores de instrucción primaria y a la juventud de la misma*. Ediciones La Rana, México. 700 p.
- GUTIÉRREZ-CZELAKOWSKA, D. 2008. Propuesta de conectividad de áreas críticas para el mantenimiento de la estructura y función de la cuenca San Miguel Allende. Tesis de maestría en Gestión Integrada de Cuencas, Universidad Autónoma de Querétaro. México. 144 p.
- H. AYUNTAMIENTO DE SAN MIGUEL DE ALLENDE. 2012. Programa de Ordenamiento Ecológico y Territorial del Municipio de San Miguel de Allende, Guanajuato. Periódico Oficial del Gobierno del Estado de Guanajuato. Número 88, Año XCIX, Tomo CL. Segunda Parte. 116 p.
- HERNÁNDEZ-HERNÁNDEZ, M. A. 2010. Propuestas de manejo hídrico conjunto en la subcuenca Támbula-Picachos, Guanajuato. Tesis de Maestría en Gestión Integrada de Cuencas, Universidad Autónoma de Querétaro. México. 223 p.
- HERNÁNDEZ-SANDOVAL, L., Y. PANTOJA-HERNÁNDEZ & M. MARTÍNEZ. 2012. Plantas útiles y distribución potencial de las forrajeras, medicinales y de uso múltiple. In: CONABIO (ed.). *La Biodiversidad de Guanajuato: Estudio de Estado*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Instituto de Ecología del Estado de Guanajuato (IEE). México. Tomo I, pp. 1- 446.
- IEE (INSTITUTO DE ECOLOGÍA DEL ESTADO DE GUANAJUATO). 2005. *Pozos extractores de agua del estado de Guanajuato*. Capa de datos geográficos. Ordenamiento Territorial del Estado de Guanajuato.
- INAFED (INSTITUTO NACIONAL PARA EL FEDERALISMO Y DESARROLLO MUNICIPAL). 2010. *Enciclopedia de los municipios y delegaciones de México*. Disponible en línea en: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/> (Consultado el 01 marzo 2015).
- INEGI (INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA Y GEOGRAFÍA). 2005. *Cuaderno Estadístico Municipal, San Miguel de Allende Guanajuato*, México. Disponible en línea en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825001265> (consultado 01 de febrero 2015).
- INEGI. 2012. *Simulador de flujos de agua de Cuencas hidrográficas*. Disponible en línea en: http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/SIATL/# (consultado el 01 febrero 2015).
- JOHNSON, K., 1977. *Do as the land bids: A study of Otomí resource use on the eve of irrigation*. PhD dissertation. Clark University, EEUU. 533 p.
- KRESIC, N. 2006. *Hydrogeology and groundwater modeling*. Taylor and Francis Grou, U.S.A. 828 p.
- MEINZER, O. E. 1923. *The occurrence of groundwater in the United States with a discussion of principles*. U. S. Geological Survey Water-Supply Paper 849, Washington, D. C. 321 p.
- MHEYBOOM, P. 1966. Groundwater studies in the Assiniboine River drainage basin: I. The evaluation of a flow system in south-central Saskatchewan. *Geological Survey Canada Bulletin* 139. 65 p.
- MORFI, F. DE A. 1778. *Viaje de indios y diario del Nuevo México*. Archivo General de la Nación, México. D. F. 154 p.
- NICHOLLS, C. I. & M. A. ALTIERI. 2015. *Cambio climático y agricultura campesina: impactos y respuestas adaptativas*. Cambio Climático.org. Disponible en línea en: <http://www.cambioclimatico.org/contenido/cambio-climatico-y-agricultura-campesina-impactos-y-respuestas-adaptativas> (consultado el 01 julio 2016).
- NIETO-SAMANIEGO, A. F., S. A. ALANIZ-ÁLVAREZ, M. CERCA-MARTÍNEZ. 1999. *Carta geológica-minera Celaya, escala 1:50,000*. Pachuca, Hidalgo. Secretaría de Comercio y Fomento Industrial, Consejo de Recursos Minerales. 1 mapa con texto.
- ORTEGA-GUERRERO, A. 2009. Presencia, distribución hidrogeoquímica y origen del arsénico, flúor y otros elementos rastreados, disueltos en el agua subterránea a escala de la cuenca, tributaria de la Lerma-Chapala, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 26(1): 143-161.
- ORTEGA-GUERRERO, A. 2013. *La insustentabilidad del recurso agua en la Cuenca del Alto Río Laja, México: interacciones sociohidrológicas en un acuífero regional sobreexplotado con crecientes concentraciones de flúor, arsénico y sodio*. Memorias del Congreso Internacional de la American Geophysical Union. Cancún, México. 2 p.
- ORTEGA-GUERRERO, M. A. 2000. *Proyecto para el manejo sustentable del agua subterránea en la Cuenca de la Independencia, municipios de San José Iturbide, Dr. Mora, San Luis de la Paz y Dolores Hidalgo, San Miguel de Allende y San Diego de la Unión, Gto*. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México, D. F. 104 p.
- ORTEGA, M. A., J. Z. CASTELLANOS, R. G. AGUILAR, A. VÁZQUEZ-ALARCÓN, E. R. ALANÍS, C. VARGAS & F. URRTIA-E. 2002. A conceptual model for increases of sodium, SAR, alkalinity and pH at the Independence Aquifer in Guanajuato. *Terra* 20(2): 199-207.
- PALACIOS-VÉLEZ, E. & C. LÓPEZ-LÓPEZ. 2007. La sobreexplotación de las cuencas hidrológicas: el caso de la cuenca del río de La Laja, Guanajuato. In: Cotler, H. (ed.). *El Manejo Integral de Cuencas en México, estudios y reflexiones para orientar la política ambiental*. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología. México, pp 1- 347.
- PÉREZ-MUNGUÍA, R. M. 2004. Patrones y procesos determinantes para el establecimiento de las asociaciones de macroinvertebrados acuáticos en manantiales cársticos de la Huasteca mexicana. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Querétaro. Querétaro, México. 460 p.

- PÉREZ-VENZOR, J. A., J. J. ARANDA-GÓMEZ, F. McDOWELL & J. G. SOLORIO-MUNGUÍA. 1996. Geología del Volcán Palo Huérfano, Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 13(2): 173-183.
- SADA, D. W. & K. F. POHLMANN. 2006. *Spring inventory and monitoring protocols*. Conference proceedings. Spring-fed Wetlands: Important scientific and cultural resources of the intermountain region, Reno. 69 p.
- SPITALE, D., M. LEIRA, N. ANGELI & M. CANTONATI. 2012. Environmental classification of springs on the Italian Alps and its consistency across multiple taxonomic groups. *Freshwater Science* 31(2): 563-574.
- TARANGO-ARÁMBULA, L. A. 2005. Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas* 4 (2): 17-21.
- TERRONES-RINCÓN, T. DEL R., C. GONZÁLEZ & S. A. Ríos. 2004. *Arbustivas nativas de uso múltiple en Guanajuato*. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Celaya, Guanajuato, México. 213 p.
- TOLEDO, V. M., J. CARABIAS, C. MAPES & C. TOLEDO. 1985. *Ecología y autosuficiencia alimentaria: hacia una opción basada en la diversidad biológica, ecológica y cultural de México*. Siglo XXI, México D. F. 118 p.
- TÓTH, J. 1999. Groundwater as a geologic agent: an overview of the causes, processes and manifestations. *Hydrogeology Journal* 7(1): 1-14.
- TÓTH, J. 2000. Groundwater as a geological agent: an overview of the causes, processes and manifestations. *Hidrogeología Journal* 7(1): 1-14.
- TÓTH, J. 2009. *Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation and utilization*. Cambridge University Press, U.S.A. 310 p.
- VILLA, F., M. A. WILSON, R. DE GROOT, S. FARBER, R. COSTANZA & R. M. J. BOUMANS. 2002. Designing an integrated knowledge base to support ecosystem services valuation. *Ecological Economics* 41: 445-456.