

Caracterización hidrogeoquímica del acuífero Jerez, estado de Zacatecas, México

- Ernesto Patricio Nuñez-Peña* • Felipe de Jesús Escalona-Alcázar •
 - Jorge Bluhm-Gutiérrez • Gustavo Alfonso Ramos-De la Cruz •
 - Alan de la Torre-Guerrero • Emmanuel Ortega-Martínez •
- Universidad Autónoma de Zacatecas, México

*Autor de correspondencia

- Antonio Cardona-Benavides •
- Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México

Resumen

Nuñez-Peña, E. P., Escalona-Alcázar, F. J., Bluhm-Gutiérrez, J., Ramos-De la Cruz, G. A., De la Torre-Guerrero, A., Ortega-Martínez, E. M., & Cardona-Benavides, A. (mayo-junio, 2015). Caracterización hidrogeoquímica del acuífero Jerez, estado de Zacatecas, México. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 6(3), 105-124.

Para llevar a cabo la caracterización hidrogeoquímica y determinación de la calidad del agua del acuífero Jerez se realizó la toma de 29 muestras de agua subterránea, de las cuales se determinaron las concentraciones de aniones y cationes mayores, así como elementos traza, en laboratorios de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Esta información permitió, mediante diagramas de Piper y Stiff, la definición de tres grupos de agua: bicarbonatada sódica, bicarbonatada mixta y bicarbonatada cálcica. La primera tiene el mayor tiempo de residencia relativa en el acuífero, circula a través del medio fracturado, compuesto por rocas volcánicas, además considerando que tiene los mayores promedios de F y temperatura del sistema, se infiere la presencia de un sistema de flujo regional; la segunda de las familias tiene temperaturas moderadas, circula por el medio granular y se le relaciona probablemente con sistemas de flujo intermedio; por último, la familia bicarbonatada cálcica posee las menores concentraciones de Cl, firma que la categoriza con sistemas de flujo local, circula por el medio granular y es la de menor tiempo de residencia relativa del acuífero. En términos generales, el agua es de buena calidad, ya que las concentraciones de STD, SO₄, N-NO₃ y Cl están dentro de los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994, 2000; no obstante, respecto a los iones As y F, su concentración en algunos pozos localizados en las porciones centro y NE del acuífero rebasan la normatividad oficial, lo que sugiere su prohibición de uso como agua potable.

Palabras clave: hidrogeoquímica, acuífero, agua subterránea, aniones, cationes mayores, elementos traza.

Abstract

Nuñez-Peña, E. P., Escalona-Alcázar, F. J., Bluhm-Gutiérrez, J., Ramos-De la Cruz, G. A., De la Torre-Guerrero, A., Ortega-Martínez, E. M., & Cardona-Benavides, A. (May-June, 2015). Hydrogeochemical Characterization of the Jerez Aquifer, Zacatecas, Mexico. *Water Technology and Sciences (in Spanish)*, 6(3), 105-124.

Twenty-nine groundwater samples were collected to define the hydrogeochemistry and quality of groundwater in the Jerez aquifer. These were used to determine major anions and cations as well as trace elements, in the laboratories at the Autonomous University of San Luis Potosí. Along with the use of Piper and Stiff diagrams, three groups of water were identified: sodium bicarbonate, mixed bicarbonate and calcium bicarbonate. The sodium bicarbonate has the longest relative residence time in the aquifer. It circulates through fractured media composed of clastic volcanic rock. It also has the highest F and temperature averages in the system. The presence of a regional flow system is inferred. The temperatures of the mixed bicarbonate water are moderate, it circulates through granular media and likely corresponds to intermediate flow systems. Lastly, the calcium bicarbonate family has lower concentrations of Cl, indicating a local flow system. It circulates through a granular medium and has the shortest relative residence time in the aquifer. In general terms, the water quality is good, given that STD, SO₄, N-NO₃ and Cl concentrations are within the allowable limits established by NOM-127-SSA1-1994, 2000. Nevertheless, concentrations of As and F ions in some of the wells located in the center and northeast parts of the aquifer exceed official norms, indicating it is not suitable to use as potable water.

Keywords: Hydrogeochemistry, aquifer, groundwater, anions, cations, trace elements.

Recibido: 12/12/2013
Aceptado: 21/01/2015

Introducción

El agua subterránea constituye una fuente importante de abastecimiento a la población en México y en muchos países del mundo. Alrededor de 97% del agua en los continentes (excluyendo glaciares y nieves perennes) es agua subterránea (Freeze & Cherry, 1979). En la porción árida y semiárida de nuestro país generalmente se constituye como el motor del desarrollo económico, ya que la producción agrícola y la industria se abastecen principalmente por medio de pozos. La población por lo general compite con el uso agrícola en estas regiones, ya que la limitada capacidad de fuentes superficiales condiciona que la perforación de pozos para el abastecimiento de la población sea una de las opciones económicamente viables que se prefieren. Por otro lado, la evidencia ase-quible indica que el comportamiento del clima es cada vez más impredecible; más allá de la incertidumbre de que si esta modificación es ocasionada por cambio climático acelerado por la intervención humana o por la variabilidad climática natural del planeta. Lo importante en este caso es que genera incertidumbre en la inestabilidad de las componentes del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración, escurrimiento, etc.). En algunas regiones se espera que la precipitación se incremente, generando eventos de inundaciones y problemas asociados; en otras, por el incremento de la temperatura se pronostica disminución de la precipitación e incremento de la evapotranspiración, lo que implica temporadas de sequía prolongadas y problemas en el abastecimiento de agua no sólo para los usos tradicionales sino también para los ecosistemas. De este modo, el manejo apropiado de las fuentes de agua en las zonas áridas es muy importante para tener la posibilidad de adaptación a tales modificaciones del ciclo hidrológico. Una de las estrategias que se ha propuesto para generar adaptación al cambio climático se basa en el desarrollo de políticas flexibles de desarrollo que favorezcan la capacidad de adaptación. Existen diversas metodologías para cumplir con este objetivo,

la definición de los sistemas de flujo de agua subterránea en una región como sustento para la implementación de estrategias de desarrollo sustentable es una de ellas (Carrillo & Cardona, 2012).

De acuerdo con las condiciones climáticas y la política de desarrollo planteada para el estado de Zacatecas, en especial para la porción central cercana a la capital del estado, el uso de agua subterránea para uso agrícola y abastecimiento de la población es fundamental para sustentar el desarrollo económico. El acuífero Jerez, que se localiza 45 km al suroeste de la capital del estado de Zacatecas, es importante porque en conjunto con los acuíferos Aguanaval, Calera, Benito Juárez y Guadalupe-Bañuelos, con los cuales colinda (figura 2), forma parte de los acuíferos en donde se asientan las urbes con mayor densidad demográfica del estado y por tanto de requerimientos importantes de agua apta para uso y consumo humano. Los principales estudios realizados a la fecha en el acuífero Jerez han sido enfocados de manera básica a la determinación del requerimiento medio anual de agua subterránea (Conagua, 1974, 1981, 2009). Utilizando el enfoque de acuífero y planteando una ecuación de balance de agua que se sustentó en un modelo conceptual definido con información de geología del subsuelo, niveles de agua en pozos, pruebas de bombeo y cuantificación de extracciones, se determinó que el flujo de agua subterránea se genera dentro de la cuenca y que se mueve de manera horizontal hacia las zonas de descarga. El resultado de la aplicación de la ecuación de balance indica que existe un déficit en la disponibilidad. Sin embargo, a la fecha no se ha realizado una evaluación integral de la composición química inorgánica del agua subterránea que apoye este modelo conceptual, además de la identificación de sistemas de flujo subterráneo que defina la existencia o no de flujo subterráneo que se genere fuera de la cuenca superficial; la presencia de flujos de tipo regional que transitan entre cuencas superficiales que tienen condiciones geológicas similares (amplias fosas tectónicas con presencia de rocas volcánicas fracturadas) ha sido documentada en

San Luis Potosí (Carrillo, 1996) Aguascalientes e Hidalgo (Cardona & Carrillo, 1998ab). Además, desde 1974 no se había realizado la determinación de la calidad del agua subterránea que se abastece a la población en esta área, hecho muy importante en esta región del estado de Zacatecas, pues se ha identificado en zonas alea-
dañas, como son en los acuíferos Calera y Benito Juárez, la presencia de agua subterránea con valores de F y As superiores al límite permisible de la NOM-127-SSA1-1994, 2000 (Secretaría de Salud, 1994).

El objetivo principal del presente trabajo consistió en la caracterización hidrogeoquímica del acuífero Jerez, desprendiéndose los siguientes objetivos específicos:

- a) Definir las familias de agua del acuífero a partir de la concentración de aniones y cationes mayores, y su relación con la dirección del flujo subterráneo.
- b) Definir las áreas del acuífero en la que puedan presentarse elementos traza que sobrepasen los límites permisibles de la normatividad mexicana para agua de uso y consumo humano.
- c) Caracterizar los sistemas de flujo subterráneo.
- d) Caracterizar la calidad del agua subterránea.

Referente geológico

Tomando como referencia los estudios geológicos de la Carta Zacatecas F13-6, realizados por el Consejo de Recursos Minerales (Coremi, 1997, 1998), la información hidroestratigráfica de la Comisión Nacional del Agua (Conagua, 2009) y las observaciones de campo durante la presente investigación, se infiere una posible fosa tectónica con orientación NE-SW, dando origen a la Cuenca Hidrológica Jerez (CHJ). La estratigrafía de esta cuenca la componen en los parteaguas rocas volcanoclásticas correlacionables con las litologías del Terciario del supergrupo volcánico superior (McDowell & Clabaugh, 1979), así como de basaltos del Cuaternario; en la parte hundida se alojan secuencias de rocas sedi-

mentarias detríticas, compuestas de aluviones cuaternarios. El conjunto de las formaciones antes mencionadas que afloran en la CHJ se describe a continuación en orden estratigráfico ascendente (figura 1).

1. Secuencia de ignimbritas-riolitas (TomIgR). Las primeras son las más abundantes, megascópicamente tienen textura fragmental y al microscopio presentan cristales de cuarzo, ortoclasa, biotita, hornblenda, circón, fragmentos líticos, vidrio, hematita y sericita. Las segundas son de textura porfídica, petrográficamente se identifican cuarzo, ortoclasa, oligoclasa biotita, augita, circón, hematita y minerales arcillosos. Su distribución, aunque es amplia, se presenta hacia los parteaguas este y oeste de la CHJ; es más extensa en las porciones oeste y sur. No fue posible determinar su espesor, sin embargo en áreas alea-
dañas del municipio Villanueva es de 700 m (Coremi, 1997).
2. Sobreyaciendo a la unidad de ignimbritas-riolitas aflora un paquete integrado por riolitas-ignimbritas (TomRIg), predominando las riolitas; tienen textura porfídica; al microscopio hay cuarzo, ortoclasa, biotita, circón, sericita y clorita. Las ignimbritas se caracterizan por su textura vitrofídica, petrográficamente tienen textura vitroclástica; hay cristales de cuarzo, ortoclasa, biotita, hornblenda, vidrio, circón, sericita y clorita. Se distribuye con mayor amplitud hacia las porciones norte y sureste de los parteaguas de la CHJ. Su espesor, considerando las columnas litológicas en la Sierra Fría, asciende a 1 050 m (Coremi, 1997).
3. Suprayaciendo a las dos unidades anteriores, se identificó un paquete de ignimbritas cristalinas (TomIg), con textura fragmental porfídica, megascópicamente se observan fenocristales de cuarzo y de sanidino, cuyo tamaño varía de 5 a 20 mm. Su distribución se restringe a la porción centro NE de la CHJ. El espesor estimado en la Sierra de Cardos es de aproximadamente 200 m.

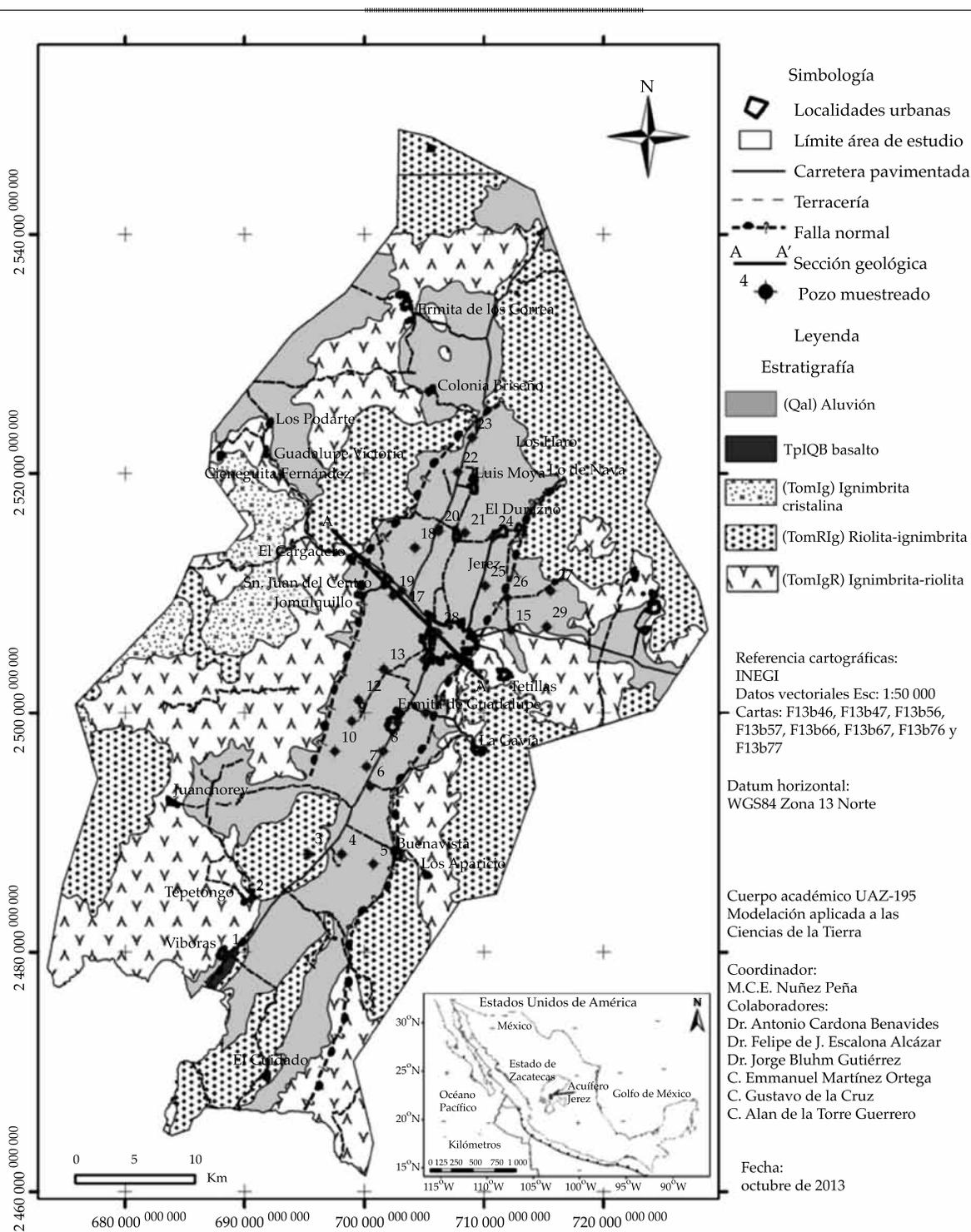


Figura 1. Unidades litoestratigráficas y estructuras mayores presentes en la cuenca hidrológica Jerez.

4. Del Pleistoceno Tardío, Holoceno Temprano, se tienen basaltos con textura afanítica (TpIQB); petrográficamente se identifican

plagioclasas cálcicas, augita, hiperstena, pigeonita y olivino ocasional, embebidos en una mesostasis vítrea. Existe sólo un

pequeño afloramiento de 5 m de espesor en las faldas SW del parteaguas oeste de la CHJ.

5. El aluvión del Holoceno compone las planicies que se distribuyen ampliamente en la porción central de la CHJ, siguiendo una forma elongada con dirección noreste-suroeste. Su litología la integran sedimentos compuestos por arenas finas a gruesas y cantos rodados en etapa de consolidación. Su espesor fluctúa de 30 a 300 m.

Hidrogeología

El acuífero Jerez (AJ), localizado dentro de la CHJ, es de tipo libre y tiene una superficie de 341 km² (Conagua, 2009), es heterogéneo y anisótropo. Existen 166 pozos profundos, 136 son utilizados para el sector agrícola, 29 al abastecimiento de agua potable y uno más que emplea el ramo industrial.

Se cuenta además con 65 norias, destinadas a solventar necesidades de agua potable, uso doméstico y pecuario, haciendo un total de 231 captaciones hidráulicas subterráneas en operación. Los caudales que se extraen de dichos aprovechamientos varían de 7.5 a 82 l/s, con extracción anual de 39.46 Mm³ y recarga de 33.4 Mm³ (Conagua, 2009).

Las unidades hidrogeológicas del acuífero Jerez son dos (figura 5). La primera de ellas es la zona saturada, que bien podría considerarse como la parte somera del acuífero. Se compone de un paquete de aluviones del Cuaternario, constituidos por estratos de conglomerados en etapa de consolidación, soportados en una matriz arcillo-limo-arenosa, alternando con capas y lentes que presentan facies de arcillas y arenas. El espesor de esta unidad varía de 30 m en los bordes del acuífero a 300 en el centro (Conagua, 2009). Las conductividades hidráulicas de esta unidad, considerados por la Comisión Nacional del Agua en 2009, varían en las partes más someras de 0.66 a 6.0×10^{-5} m/s y de 4.3 a 6.7×10^{-6} m/s en las porciones más profundas. La segunda de las unidades hidrogeológicas forman las barreras laterales naturales del acuífero

y da lugar a una segunda zona saturada, que se consideraría en la presente investigación como el acuífero profundo. Su litología la componen secuencias volcánicas de composición félsica. Los espesores estimados para esta secuencia en el área de estudio podrían alcanzar cerca de 700 m, considerando espesores referidos en el área de Villanueva. A pesar de que no existen documentados los valores de su conductividad hidráulica, de acuerdo con Struckmeier y Margat (1995) se estiman rangos de 10^{-2} a 10^{-4} m/s.

Flujo subterráneo

Las cargas hidráulicas que modelan el movimiento del flujo subterráneo en el AJ, se basan en las mediciones piezométricas de una red de monitoreo, integrada por 136 pozos, en el periodo de 1974 a 1998 (Conagua, 1974-1998). Considerando que la información del año 1997 constituye la de mayor número de datos y corresponde a la penúltima de registro más reciente, es la que se utilizó para definir la distribución de cargas hidráulicas en la presente investigación. En la figura 2 se pueden apreciar las que tienen el mayor rango de 2 096 a 2 135 msnm, que se presentan en las porciones noreste y suroeste del acuífero, contrastadas con elevaciones del terreno de 2 100 msnm; mientras que las cargas hidráulicas de menor rango ocupan la parte centro y sureste del mismo, con valores que fluctúan de 1 929 a 1 953 msnm, y elevaciones topográficas de 2 000 msnm; esta diferencia de elevación entre cargas hidráulicas permite definir que el agua se desplaza en dirección norte-sur en la parte norte del acuífero y de oeste a este en el sur del mismo.

Materiales y métodos

Las muestras de agua subterránea fueron colectadas en 28 pozos profundos y un tajo, se georreferenciaron utilizando el Sistema *ArcGis* 9.3.1 y los conjuntos de datos digitales de las cartas F13B46, F13B47, F13B56, F13B57, F13B66, F13B67, F13B76 y F13B77 del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI,

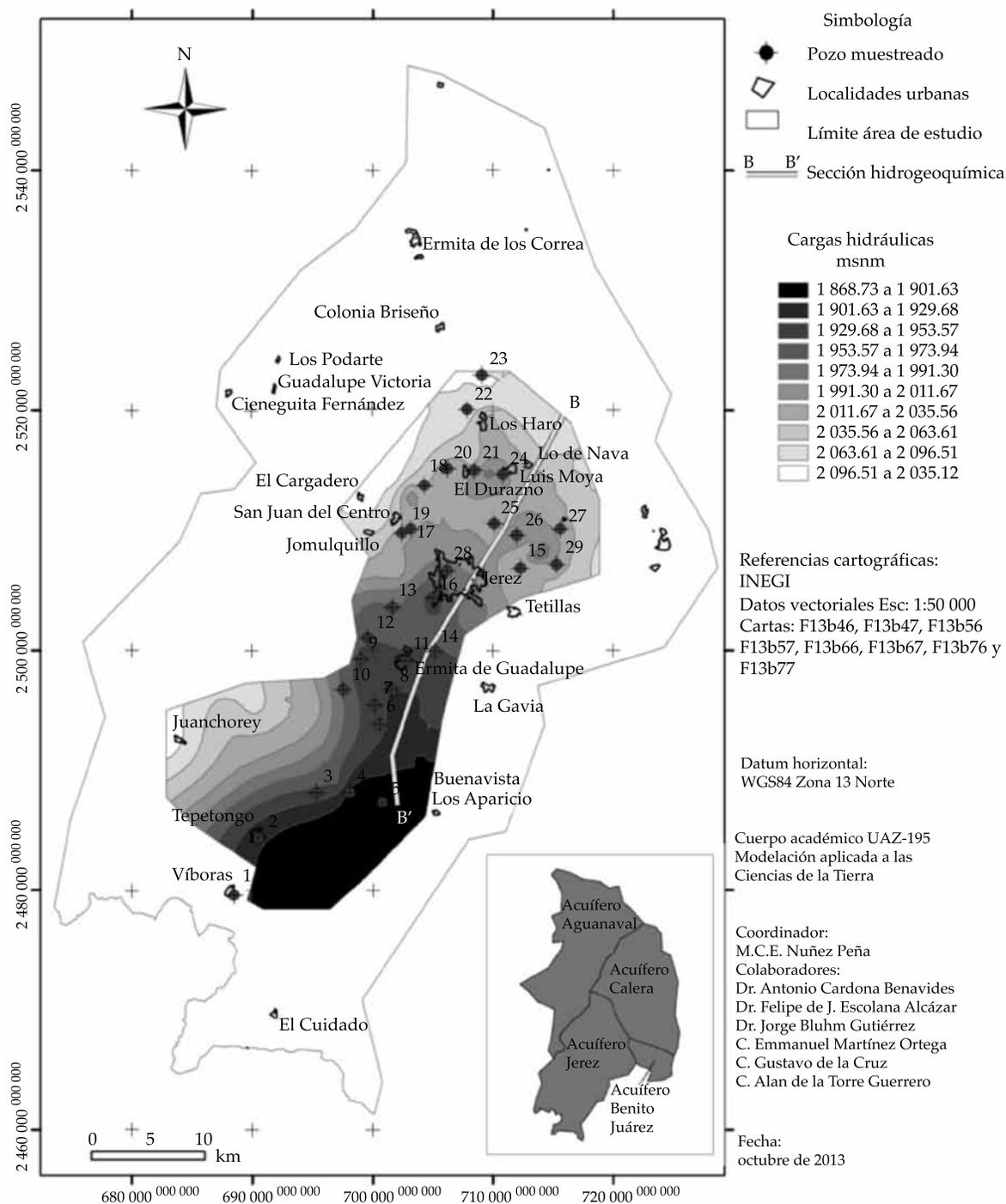


Figura 2. Distribución y valores de cargas hidráulicas en el acuífero Jerez.

2013), en proyección UTM, zona 13 norte, datum WGS84, elipsoide de Clarke 1866, a escala 1:50 000. El uso que se da al agua de esos pozos corresponde a seis destinados a la agricultura,

uno al uso doméstico-pecuario y 21 al abastecimiento de agua potable.

En cada captación hidráulica se aplicó la metodología de muestreo definida por Car-

dona (2007), utilizando un sistema cerrado, que incluye una celda de aislamiento para evitar la interacción del agua subterránea con la atmósfera y facilitar la estabilización de las mediciones. Asimismo se documentó en cada uno temperatura, pH, conductividad eléctrica, potencial rédox, oxígeno disuelto y alcalinidad. La colección de muestras para su análisis en laboratorio se hizo en envases de polietileno de baja densidad. A la toma para la determinación de aniones mayores no se añadió ningún tipo de conservador, a la de nitratos se adicionó 1.0 ml de ácido sulfúrico, y las de metales mayores y elementos traza se filtraron con filtro de acetato de celulosa de 0.45 μm y se les agregó ácido nítrico, para producir un pH menor a 2.0, suficiente para la estabilización de metales y nitratos.

Las determinaciones de parámetros físico-químicos, elementos mayores (cuadro 1) y elementos traza (cuadro 2), se realizó en los laboratorios del Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

A los resultados de laboratorio se les practicó la técnica de balance iónico, consistente en la suma de equivalentes de aniones y cationes, respectivamente; para definir el error de balance iónico se utilizó la expresión:

$$\text{Porcentaje de error} = \frac{(\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones})}{(\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones})} \times 100\%$$

Los análisis químicos que presentan balance iónico menor al $\pm 5\%$ se consideran dentro del límite permisible (Freeze & Cherry, 1979).

Por otra parte, con base en la información de cargas hidráulicas, se trazó una línea de sección para analizar la evolución hidrogeoquímica a lo largo del flujo subterráneo (figura 2). Se realizaron además mapas interactivos, haciendo acopio de los conjuntos de datos vectoriales y modelos de elevación, editados por el INEGI, y la información hidrogeológica asequible de la Conagua, así como la generada en el presente estudio, utilizando para su procesamiento el sistema de cómputo *ArcGis 9.3.1*.

Resultados

Química del agua subterránea

La química del agua en el acuífero se obtuvo a partir de la información de los parámetros físico-químicos y químicos reportados de laboratorio (cuadros 1 y 2), mismos que al agruparlos de acuerdo con tales características sirvieron de base para su representación en diagramas de Piper y de Stiff (figuras 3 y 4). En ellos se definen tres familias de agua, las de mayor predominancia son 14 de bicarbonatada sódica, 10 de bicarbonatada mixta y 5 de bicarbonatada cálcica. En el cuadro 3 se resumen los parámetros químicos en términos estadísticos, como promedio, valores mínimos y máximos, y desviación estándar. Si bien los valores de pH de campo en el 25% de las muestras reporta valores superiores a 8.1, las mediciones de pH de laboratorio son menores a ocho unidades, por lo que el valor de CO_3 reportado es nulo.

La familia de agua bicarbonatada sódica fue colectada de los pozos 6, 7, 10, 11, 12, 14, 16, 20, 21, 22, 23, 24, 25 y 28; su química y fisicoquímica está caracterizada por tener los siguientes promedios: STD 289.7 mg/l, Na 61.15 mg/l, SO_4 32.4 mg/l, N- NO_3 2.3 mg/l, Cl 13.1 mg/l, Li 0.38 mg/l, temperatura de 25.6 °C y 7.9 de potencial pH. Contiene además las mayores concentraciones promedio de As con 0.020 mg/l y de F con 2.7 mg/l. El flujo de estas aguas circula por las rocas volcánicas fracturadas a profundidades superiores a 300 m, dato consistente con la profundidad en que se encuentran tales rocas. Dicho movimiento del agua a través de las mismas se infiere por las concentraciones y comportamientos que se tienen de los iones Na, Li, F y As, tal como se aprecia en los gráficos Li-Na (figura 7), Li-F (figura 8), Li-As (figura 9) y As-Na (figura 10). La interacción del agua subterránea con la mesostasis vítrea de las rocas volcánicas produce su desvitrificación, en este proceso se genera intercambio de iones hidrógeno de la solución por iones Na y Li presentes en la roca; a medida que haya mayor

Cuadro 1. Concentraciones de elementos mayores y parámetros físico-químicos en el acuífero Jerez, Zacatecas.

Muestra núm.	Fam. agua	% error	Uso	Prof. pozo	Temp.	pH campo	pH lab.	Eh	Cond. elec. campo	STD	Dureza total	Na	K	Ca	Mg	Si	Cl	SO ₄	HCO ₃	CO ₃ N-NO ₃	F	
Unidades				m	°C				µmhos	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	
1	HCO ₃ -Ca	3.010	Doméstico		22.2	6.29	7.07	200	298	290	176.4	19	5.6	50	12.5	32	28.58	14	201.30	0	5.3	0.01
2	HCO ₃ -Ca	1.821	Agrícola		25.9	6.5	7.18	332	466	398	236.9	18	7	75	12	28	25.85	22	251.93	0	8.3	0.01
3	HCO ₃ -Ca	0.213	Potable		24.5	8.51	7.35	95		355	229.8	36	4.4	73	11.5	36	12.90	17	323.30	0	3.6	0.48
19	HCO ₃ -Ca	0.690	Potable		25.7	7.58	7.35	205	263	251	112.3	35	4.6	40	3	39	16.66	22	170.80	0	2	1.31
29	HCO ₃ -Ca	3.810	Potable		23.9	7.93	7.63	176	282	195	125.3	37	10.6	45	3.1	37	11.56	5	252.03	0	2.2	0.25
4	HCO ₃ -mixta	0.815	Agrícola		26.7	7.3	7.46	165		347	167.1	50	9.3	55	7.2	50	12.90	25	286.70	0	3	0.94
5	HCO ₃ -mixta	1.712	Agrícola		22.1	7.72	7.46	136	300	300	160.7	33	6	48	9.9	30	12.90	20	234.85	0	4.5	0.34
8	HCO ₃ -mixta	0.609	Agrícola		23.7	7.47	7.62	182	286	282	112.4	44	10.3	41	2.4	58	12.90	24	201.30	0	2.1	1.07
9	HCO ₃ -mixta	0.916	Doméstico		25.5	7.84	7.73	150	286	260	109.5	39	15.5	40	2.3	65	12.90	27	189.10	0	2	0.65
13	HCO ₃ -mixta	1.192	Potable	200	23	7.15	7.67	123		171	78.2	24	5.4	27	2.6	37	9.22	10	134.20	0	2	0.01
17	HCO ₃ -mixta	0.987	Potable		25.2	7.34	7.27	162	262	228	111.5	35	7.6	39	3.4	42	18.47	5	184.22	0	4.5	1.1
18	HCO ₃ -mixta	1.204	Potable		24.3	7.66	7.56	190	242	221	97.8	29	7.4	34	3.1	45	11.34	19	152.50	0	3.4	0.56
26	HCO ₃ -mixta	5.080	Potable		22.4	7.75	7.47	151	418	280	141.9	52	16.6	51	3.5	51	16.81	44	268.83	0	2.7	2.35
27	HCO ₃ -mixta	0.480	Potable		23.9	7.77	7.7	164		282	149.8	64	7.1	55	3	23	12.61	47	268.83	0	2.2	2.27
6	HCO ₃ -Na	0.295	Potable		29.8	8.16	7.62	141	343	300	116	51	8.3	33	8.14	45	11.06	19	234.85	0	2.3	1.05
7	HCO ₃ -Na	0.187	Agrícola		25	8.34	7.79	136	360	313	114.5	67	9.7	42	2.3	55	11.06	33	256.20	0	1.9	1.8
10	HCO ₃ -Na	1.587	Agrícola	200	22.4	7.78	7.72	263	278	278	110.3	47	15	40	2.5	63	12.90	29	201.30	0	2.4	0.92
11	HCO ₃ -Na	1.500	Potable		21.5	7.1	7.73	42	311	315	95	54	9.4	35	1.82	50	12.90	31	206.18	0	2.3	1.34
12	HCO ₃ -Na	3.443	Potable		26.5	8.2	7.88	161	303	290	90.6	50	11.6	30	3.8	60	11.06	28	212.28	0	2.5	0.66
14	HCO ₃ -Na	0.842	Potable		23.5	8.38	7.54	169	387	358	124.8	71	9.9	43	4.2	43	18.47	38	250.10	0	2	3.47
15	HCO ₃ -Na	2.207	Potable		22.9	7.99	7.56	157	266	271	103.1	40	7.7	35	3.8	29	10.64	9	213.50	0	1.6	1.47
16	HCO ₃ -Na	0.758	Potable		26.4	9.26	7.73	136	345	322	80	73	8.6	31	0.6	58	15.95	36	207.40	0	3.5	4.17
20	HCO ₃ -Na	2.977	Potable		24.7	7.29	7.46	157	255	243	86.5	39	10.4	31	2.2	48	17.02	29	152.50	0	3.6	1.48
21	HCO ₃ -Na	0.310	Potable		22.4	7.95	7.73	170	320	287	63.3	67	5.6	24	0.8	40	10.64	33	176.90	0	2.1	4.9
22	HCO ₃ -Na	3.722	Potable		25.2	7.9	7.89	146	283	255	57.5	62	7.4	22	0.6	42	10.64	22	158.60	0	2.3	4.22
23	HCO ₃ -Na	0.386	Potable	300	36.8	8.2	7.93	122	315	298	56.2	74	3.6	22	0.3	33	12.41	28	193.98	0	1.9	4.17
24	HCO ₃ -Na	4.216	Potable		25.2	7.64	7.39	190	277	286	112.7	71	3.8	45	0.05	29	13.66	51	252.03	0	1.8	3.97
25	HCO ₃ -Na	1.109	Potable		24.7	7.27	7.54	189	370	285	120.3	71	14.6	46	1.3	52	12.61	46	268.83	0	1.7	2.97
28	HCO ₃ -Na	3.158	Potable		24.9	7.42	7.71	171	297	226	89.1	64	12.3	34	1	61	12.61	30	201.62	0	2.1	2.75

Cuadro 2. Concentraciones de elementos traza en el acuífero Jerez, Zacatecas.

Muestra núm.	Clave CNA	Municipio	UTM X	UTM Y	Elevación	Li	B	V	Mn	Fe	Zn	Ge	As
Unidades			m	m		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1		Tepetongo	688 445	2 479 608	1 890	0.004	0.003	0.0028	0.0009	0.0809	0.3727	0.0001	0.0012
2		Tepetongo	690 490	2 484 411	1 932	0.008	0.005	0.0029	0.0047	0.0993	0.0991	0.0001	0.0014
3		Tepetongo	695 305	2 488 151	1 995	0.018	0.011	0.0039	0.0386	0.1020	0.3007	0.0002	0.0011
4		Tepetongo	698 118	2 488 151	1 910	0.060	0.116	0.0131	0.0012	0.0952	0.1626	0.0004	0.0077
5		Tepetongo	700 776	2 487 364	1 947	0.010	0.019	0.0123	0.0008	0.0900	0.1582	0.0001	0.0020
6		Tepetongo	700 535	2 493 830	1 968	0.067	0.135	0.0144	0.0023	0.1006	0.1823	0.0006	0.0095
7		Tepetongo	700 174	2 495 467	1 965	0.158	0.303	0.0124	0.0009	0.0906	0.1601	0.0010	0.0211
8		Tepetongo	701 564	2 496 756	1 961	0.078	0.165	0.0078	0.0008	0.0903	0.2518	0.0006	0.0088
9		Jerez	698 970	2 499 272	1 937	0.048	0.108	0.0104	0.0013	0.0935	0.1696	0.0006	0.0078
10		Jerez	697 529	2 496 756	2 012	0.062	0.133	0.0102	0.0010	0.0966	0.1709	0.0006	0.0094
11		Jerez	702 801	2 499 155	1 997	0.093	0.166	0.0078	0.0015	0.1186	0.1764	0.0007	0.0093
12	169	Susticacán	699 551	2 501 038	1 993	0.051	0.126	0.0117	0.0023	0.1002	0.2390	0.0006	0.0076
13	156	Jerez	701 629	2 503 621	2 007	0.010	0.021	0.0044	0.0018	0.1010	0.1494	0.0003	0.0016
14		Jerez	705 145	2 499 946	1 990	0.180	0.260	0.0132	0.0021	0.0975	0.1427	0.0008	0.0254
15		Jerez	712 269	2 506 879	2 043	0.037	0.060	0.0181	0.0011	0.0890	0.3055	0.0003	0.0109
16		Jerez	704 996	2 504 410	2 060	0.190	0.345	0.0122	0.0012	0.0872	0.2504	0.0013	0.0202
17		Jerez	703 150	2 510 166	2 044	0.040	0.083	0.0079	0.0041	0.1310	0.1054	0.0006	0.0060
18	463	Jerez	704 259	2 513 762	2 077	0.013	0.032	0.0046	0.0018	0.0785	0.2654	0.0002	0.0022
19	162	Jerez	702 419	2 509 824	2 050	0.044	0.064	0.0067	0.0015	0.1040	0.2164	0.0007	0.0056
20	389	Jerez	706 209	2 515 175	2 066	0.040	0.090	0.0090	0.0015	0.0955	0.3332	0.0004	0.0086
21		Jerez	708 423	2 515 034		0.190	0.352	0.0070	0.0011	0.0910	0.2250	0.0018	0.0302
22		Jerez	707 806	2 520 110	2 094	0.129	0.282	0.0076	0.0047	0.0960	0.2417	0.0015	0.0210
23		Jerez	709 031	2 522 977	2 103	0.183	0.398	0.0060	0.0023	0.0362	0.4165	0.0022	0.0260
24		Jerez	710 791	2 514 696	2 053	0.244	0.768	0.0035	0.0005	5.0000	0.0202	0.0013	0.0331
25		Jerez	710 097	2 510 601	2 031	0.211	0.742	0.0048	0.0003	5.0000	0.0217	0.0009	0.0403
26		Jerez	711 957	2 509 597	2 039	0.142	0.532	0.0086	0.0005	5.0000	0.0129	0.0003	0.0290
27		Jerez	715 578	2 510 167	2 033	0.195	0.637	0.0049	0.0009	0.0871	0.2687	0.0006	0.0323
28		Jerez	706 154	2 506 661	2 000	0.130	0.733	0.0071	0.0002	5.0000	0.1819	0.0004	0.0163
29		Jerez	715 267	2 507 179	2 061	0.025	0.091	0.0077	0.0008	5.0000	0.2075	0.0001	0.0073

interacción a lo largo de la dirección de flujo, las concentraciones de estos iones se incrementaran (figura 7). Un comportamiento similar de tales iones en el agua subterránea ha sido identificado en San Luis Potosí, aunque en este caso el efecto de la temperatura del agua subterránea a profundidad (50-60 °C) tiene un efecto adicional (Carrillo, 1996). En San Luis Potosí también se identificó que las concentraciones de Li se relacionan con el F (Carrillo-Rivera *et al.*, 2002) y con el As (Banning, Cardona, & Rude, 2012), tal y como sucede en el área estudiada (figura 8);

el incremento del tiempo de residencia del agua en el subsuelo es fundamental para el aumento de las concentraciones de estos iones.

El agua bicarbonatada mixta procede de las muestras 4, 5, 8, 9, 13, 15, 17, 18, 26 y 27 y circula a través del medio granular. Tiene los siguientes promedios: STD, 264.2 mg/l; Na, 41.0 mg/l; N-NO₃, 2.8 mg/l; SO₄, 23 mg/l; Cl, 13.1 mg/l; Fs, 1.1 mg/l, y Li, 0.063 mg/l. Temperaturas de 24 °C; pH, 7.6; As, 0.011 mg/l, y F, 1.1 mg/l.

El agua bicarbonatada cálcica transita por el medio granular, los promedios son los siguientes:

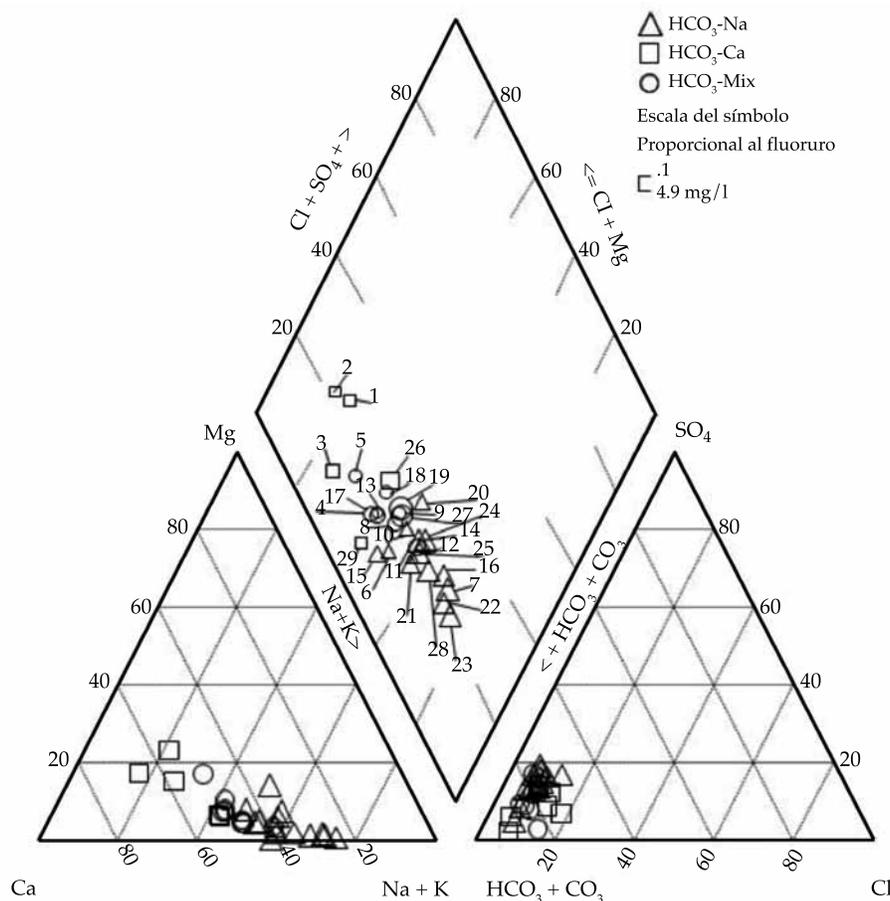


Figura 3. Diagrama Piper que ilustra las familias de agua: bicarbonatada sódica, bicarbonatada mixta y bicarbonatada cálcica, en escala gradual de concentración con respecto al ion F.

tes: STD, 297.8 mg/l; Na, 29.0 mg/l; SO_4 , 16.0 mg/l; N- NO_3 , 4.3 mg/l; Cl, 19.1 mg/l; F, 0.4 mg/l; Li, 0.020 mg/l; temperatura, 24.4 °C; pH, 7.4, y As, 0.003 mg/l.

Descripción de la sección de evolución hidrogeoquímica

Con la finalidad de conocer la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea, los parámetros físicos, temperatura y químicos, STD, SO_4 , Cl, F, Na, Li, B y Ge fueron proyectados a la línea de sección hidrogeoquímica orientada a lo largo de las líneas de flujo (figura 6). En el caso de la temperatura, en el extremo norte de la

sección, inicia con 36.8 °C, la cual contrasta con el resto de las muestras, pues disminuye a 25.2 °C y de ahí en adelante se sostiene con valores relativamente similares, hasta el extremo sur, en donde se incrementa entre uno y tres grados. Respecto al ion Cl, por ser una especie conservativa, que en términos generales no es afectada por procesos de precipitación-disolución, ni por reacciones de óxido-reducción, referido en Graniel, Cardona y Carrillo (1999), expresa de forma primordial las entradas de agua meteórica. En el caso del AJ, la concentración de Cl en general es baja, lo cual sugiere que su origen es principalmente atmosférico y puede ser utilizado para estimar la recarga natural por el método de

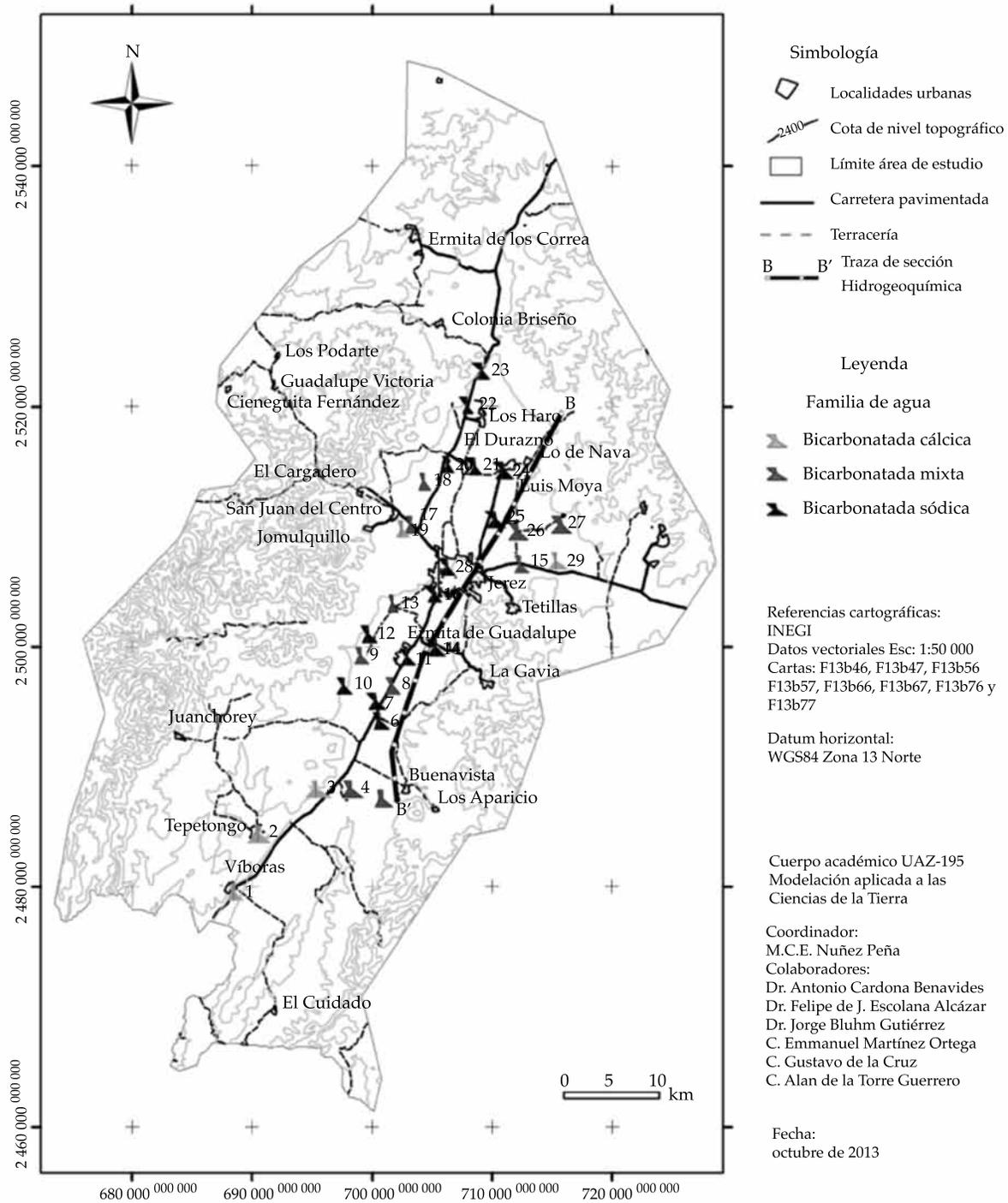


Figura 4. Representación y distribución de las familias de agua mediante diagramas de Stiff y su relación de evolución en la dirección del flujo de agua subterránea (sección hidrogeoquímica B-B').

balance de masa de Cl; el promedio en las aguas bicarbonatadas sódicas y en las bicarbonatadas mixtas es de 13.1 mg/l y en las bicarbonatadas

cálcicas de 19.1 mg/l. La ecuación básica para la evaluación de la recarga utilizando el método de balance de masa de Cl (Wood, 1995) es:

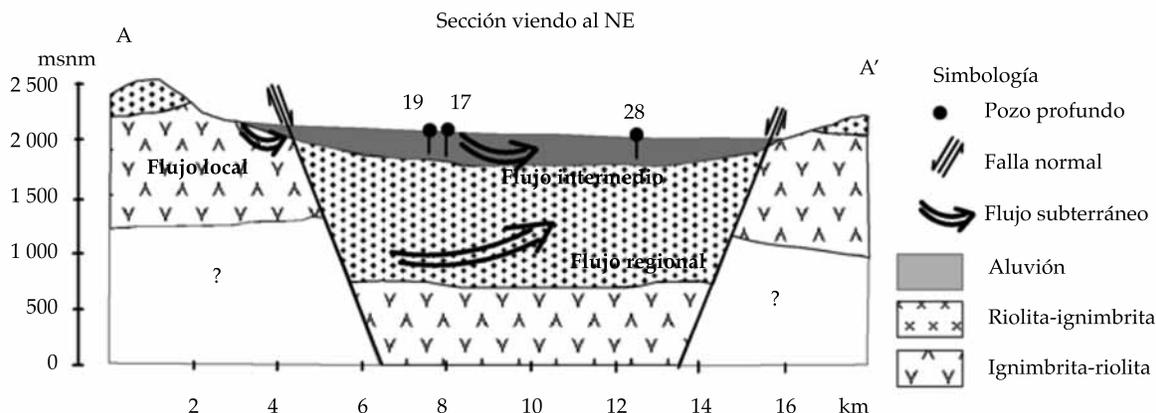


Figura 5. Sección estratigráfica que muestra las diferentes unidades litoestratigráficas presentes en el área de estudio y los sistemas de flujo circulantes en esas unidades (sección A-A' referida en la figura 1).

$$q = \frac{P(Cl_{\text{precipitación}})}{Cl_{\text{agua subterránea}}}$$

En donde q es el flujo de la recarga natural; P , la precipitación promedio anual; $Cl_{\text{precipitación}}$ es la concentración de Cl promedio en la precipitación, y $Cl_{\text{agua subterránea}}$ es la concentración de Cl en el agua subterránea.

No se conoce la composición química de la precipitación en la zona de interés. Tomando en cuenta la composición química de la precipitación en San Luis Potosí, que tiene un promedio de 0.61 mg/l de Cl (Cardona, 2007), realizando un balance de masa con este ion, suponiendo que la única fuente de Cl es atmosférica y que el escurrimiento fuera de la cuenca es mínimo, es posible calcular una recarga del orden de 3 a 4% de la precipitación media anual. En cuanto a las concentraciones de SO_4 , tienen un mínimo de 5 mg/l a un máximo de 51 mg/l; los valores más altos se sitúan en la parte norte de la línea de sección y pertenecen a la familia bicarbonatada sódica. El F inicia con valores altos, 4.17 mg/l, y tienden a ir disminuyendo hacia el centro del acuífero, donde se incrementan de nuevo e incluso adquieren valores

otra vez fuera de norma, 4.17 mg/l, y de ahí disminuyen de forma gradual hacia la zona de descarga del manto freático. Respecto al ion Li, los valores más altos, de 0.18 a 0.24 mg/l, se distribuyen principalmente en la porción norte del acuífero, en donde inicia el flujo, además se registra de nuevo valores de 0.18 mg/l en dos áreas menores hacia el centro del acuífero; en general, la amplia variación que presenta esta especie es indicativa de la existencia de aguas con diferentes tiempos de residencia relativa en el acuífero. Por otra parte, los STD se incrementan ligeramente conforme evoluciona el flujo de agua, indicando que la salinidad se incrementa en esa dirección. De manera contradictoria, los iones Li, B, Ge y F decrecen en la dirección de flujo (figura 6).

Discusión

Diferenciación hidrogeoquímica

Considerando los tres tipos de agua presentes en el acuífero y apoyados en la gráfica de litio-sodio (figura 6), se puede apreciar una bien definida agrupación lineal por familias de agua, lo que sugiere que ambas sustancias químicas se derivan de la misma fuente de origen y su incorporación al agua subterránea obedece al mismo

Cuadro 3. Parámetros químicos y físico-químicos representados en términos estadísticos de valores: promedio, máximos, mínimos y desviación estándar; categorizados para las tres familias de agua: bicarbonatada cálcica, bicarbonatada mixta y bicarbonatada sódica.

Tipo de agua	Bicarbonatada cálcica				Bicarbonatada mixta				Bicarbonatada sódica				
	Unidades	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar	Promedio	Máximo	Mínimo	Desviación estándar
Temp.	°C	24.4	25.9	22.2	1.50	24.0	26.7	22.1	1.47	25.6	36.8	21.5	3.81
pH		7.4	8.5	6.3	0.95	7.6	8.0	7.2	0.27	7.9	9.3	7.1	0.57
Eh	mV	201.6	332.0	95.0	85.20	158.0	190.0	123.0	19.79	156.6	263.0	42.0	47.70
Cond. eléct.	umhos/cm	327.3	466.0	263.0	93.60	294.3	418.0	242.0	57.81	317.4	387.0	255.0	39.01
STD	mg/l	297.8	398.0	195.0	80.83	264.2	347.0	171.0	48.24	289.7	358.0	226.0	33.61
Dureza total	mg/l CaCO ₃	176.1	236.9	112.3	57.51	123.2	167.1	78.2	29.64	94.1	124.8	56.2	23.46
Na	mg/l	29.0	37.0	18.0	9.62	41.0	64.0	24.0	11.92	61.5	74.0	39.0	11.24
K	mg/l	6.4	10.6	4.4	2.54	9.3	16.6	5.4	3.84	9.3	15.0	3.6	3.49
Ca	mg/l	56.6	75.0	40.0	16.29	42.5	55.0	27.0	9.45	34.1	46.0	22.0	8.18
Mg	mg/l	8.4	12.5	3.0	4.91	4.1	9.9	2.3	2.47	2.1	8.1	0.1	2.14
Si	mg/l	34.4	39.0	28.0	4.39	43.0	65.0	23.0	13.45	48.5	63.0	29.0	10.46
Cl	mg/l	19.1	28.6	11.6	7.69	13.1	18.5	9.2	2.73	13.1	18.5	10.6	2.45
SO ₄	mg/l	16.0	22.0	5.0	7.04	23.0	47.0	5.0	13.95	32.4	51.0	19.0	8.47
HCO ₃	mg/l	239.9	323.3	170.8	58.12	213.4	286.7	134.2	51.15	212.3	268.8	152.5	36.14
N-NO ₃	mg/l	4.3	8.3	2.0	2.61	2.8	4.5	1.6	1.04	2.3	3.6	1.7	0.57
F	mg/l	0.4	1.3	0.0	0.54	1.1	2.4	0.0	0.77	2.7	4.9	0.7	1.47
Li	mg/l	0.020	0.044	0.004	0.016	0.063	0.195	0.010	0.061	0.138	0.244	0.040	0.066
Mn	mg/l	0.009	0.039	0.001	0.016	0.001	0.004	0.001	0.001	0.002	0.005	0.000	0.001
Fe	mg/l	1.077	5.000	0.081	2.193	0.586	5.000	0.078	1.551	1.144	5.000	0.036	2.090
Ge	mg/l	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.001
As	mg/l	0.003	0.007	0.001	0.003	0.011	0.032	0.002	0.011	0.020	0.040	0.008	0.010
Cr	mg/l	0.0015	0.0020	0.00103	0.00037	0.0018	0.0030	0.0005	0.0009	0.0019	0.003	0.0005	0.0009

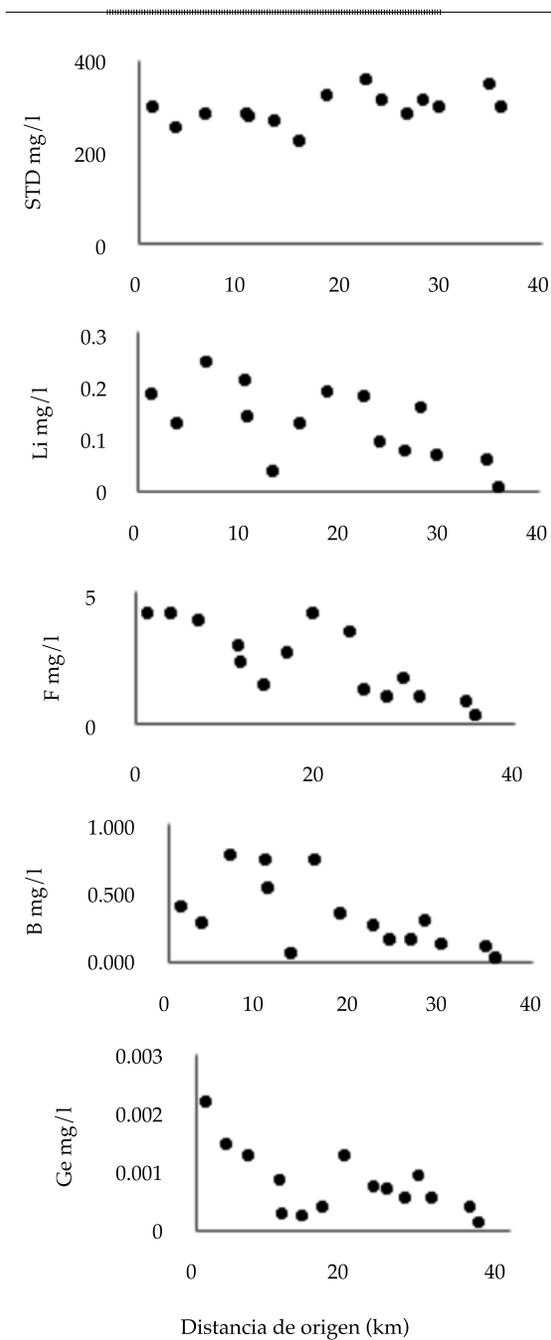


Figura 6. Evolución en la concentración de los parámetros químicos STD, Li, F, B y Ge proyectados en dirección del flujo subterráneo sobre la sección hidrogeoquímica B-B' referida en la figura 2.

proceso; y ya que el sodio se considera un buen indicador en la diferenciación de tipos de agua y del tiempo de residencia relativa del agua sub-

terránea (Molina, 1996), la familia bicarbonatada cálcica tendría el menor tiempo de residencia relativa, en tanto que la familia bicarbonatada sódica denota el mayor tiempo de circulación en el AJ. Esta misma interpretación se confirma con los resultados de la gráfica litio-fluoruro (figura 8), ya que el Li, como elemento conservativo, constituye también un excelente parámetro que

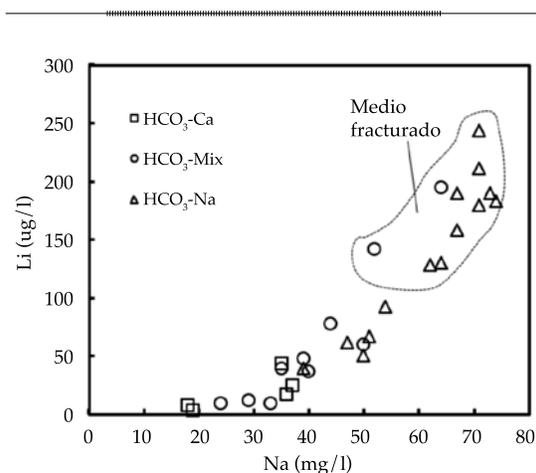


Figura 7. Evolución de familias de agua en cuanto a la relación Li-Na con el medio de circulación del agua subterránea.

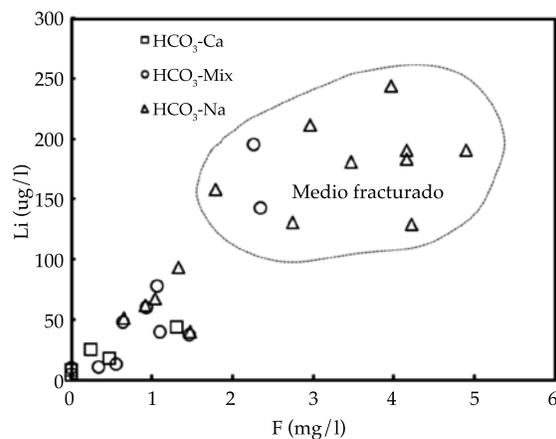


Figura 8. Evolución de familias de agua con respecto a la relación Li-F y su vínculo con el medio geológico con el que interactúa el agua subterránea.

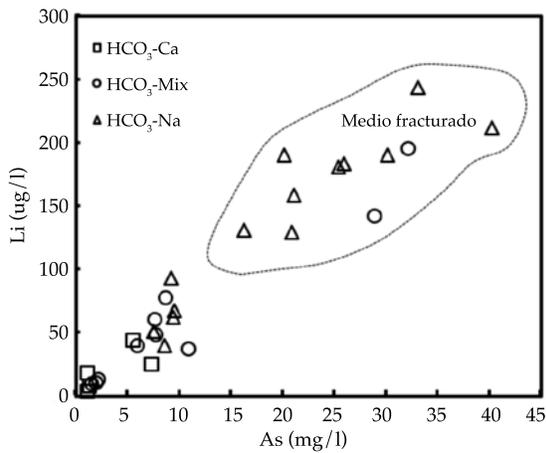


Figura 9. Evolución de familias de agua sobre la relación Li-As y su relación con el medio geológico con el que interactúa el agua subterránea.

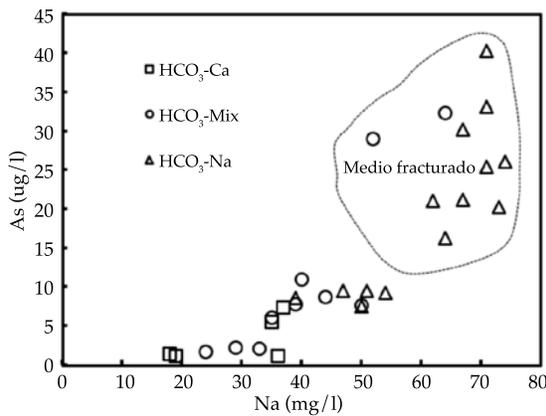


Figura 10. Evolución de familias de agua con respecto a la relación As-Na y su relación con el medio geológico con el que interactúa el agua subterránea.

refleja los tiempos de residencia relativa de los flujos subterráneos. La concentración del litio en este mismo tipo de agua ostenta el mayor promedio de 0.138 mg/l y aunque la temperatura de algunas de sus muestras corresponde al promedio más elevado, 25.6 °C, no es una constante a lo largo del flujo.

Reacciones redox

La información documentada en campo para los parámetros, oxígeno disuelto y Eh revela concentraciones de 1.8 a 7.4 mg/l y de 42 a 332 mV, respectivamente. La distribución de valores más elevados referidos a oxígeno disuelto ocupa las porciones nor-noreste y suroeste del AJ. Las condiciones oxidantes identificadas determinan que algunos elementos traza, como Fe, Mn y Cr, controlados por esta variable se mantengan en concentraciones bajas, con los siguientes promedios: Fe, 0.59-1.077 mg/l; Mn, 0.0014-0.009 mg/l, y Cr 0.0015-0.0019 mg/l (cuadro 3).

Respecto al Eh, las zonas con mayor grado de reducción de manera general, como es normal en los flujos subterráneos, disminuyen su rango en la dirección que sigue la evolución hidrogeoquímica hacia el centro del acuífero, pero vuelven a incrementarse de forma ligera hacia la zona de descarga.

Caracterización de los sistemas de flujo subterráneo

De acuerdo con la teoría de Tóth (1962, 1963), el flujo subterráneo se puede clasificar en flujo local, flujo intermedio y flujo regional. El primero se caracteriza por constituir flujos someros de trayectorias cortas, contiene la menor concentración de sólidos totales disueltos STD, las temperaturas de más bajo rango y circula en topografías montañosas; el flujo intermedio circula a profundidades moderadas y recorre distancias más largas, la concentración de STD aumenta al igual que su temperatura; el flujo regional se desplaza en las profundidades más acentuadas del acuífero, ostentando las mayores temperaturas, además de poseer los valores de STD más elevados.

Basados en la teoría de Toth (1962, 1963), y considerando los resultados de la diferenciación hidrogeoquímica que se presenta a lo largo del movimiento del agua subterránea, se sugiere la presencia de tres sistemas de flujo que se describen a continuación.

Sistemas de flujo local

Los valores de Cl en general están por debajo de 25 mg/l, que de acuerdo con las condiciones semiáridas de la zona y el tipo de materiales geológicos indican básicamente que representan la entrada atmosférica, en donde el Cl de la lluvia se concentra por evapotranspiración durante la recarga natural. Las bajas concentraciones sugieren que el proceso de recarga natural debe ser de tipo indirecto a través de zonas preferenciales como fracturas o zonas de mayor permeabilidad en el material granular y en las zonas de pie de monte de los parteaguas. Las mayores concentraciones del ion Cl (19.1 mg/l) y N-NO₃ (4.3 mg/l) se presentan en la familia bicarbonatada cálcica, indicando la presencia de flujos de tipo local, lo que sugiere la influencia de retornos de riego agrícola o lixiviados de granjas que se infiltran al subsuelo, alcanzando la zona saturada y modificando de manera ligera la calidad del agua subterránea.

Sistemas de flujo intermedio

En la familia bicarbonatada cálcica, las especies F y As, aunque son las que tienen las menores concentraciones, se define correlación con el Na, B y Li, lo que sugiere que se derivan de la interacción agua roca, pero no existe una relación con respecto a la temperatura del agua subterránea, lo que indica que se podría tratar de sistemas de flujo de tipo intermedio, cuya profundidad de circulación en tal caso sería menor a 300 m que corresponde al espesor máximo del medio granular.

Sistemas de flujo regional

Como se comentó en la descripción de evolución de la línea de sección hidrogeoquímica (figura 6), la muestra 23, perteneciente a la familia bicarbonatada sódica, y localizada en la parte norte del AJ, tiene la temperatura más elevada 36.9 °C, y una alta concentración de fluoruro 4.17 mg/l. Además, las mayores cargas hidráulicas, 2 096 msnm, se localizan también en

esa área. Información que en conjunto sugiere agua relacionada a un sistema de flujo regional, que incluso por valores de cargas hidráulicas de 2 240 msnm y direcciones de flujo norte-sur que sigue el agua subterránea de porción sur del acuífero Calera, colindante al norte con el de Jerez indican el reflejo de un flujo inter-cuencas que se filtra probablemente hacia el acuífero Jerez (figura 2). En medios geológicos en los que predominan rocas volcánicas, los sistemas de flujo regional se caracterizan porque su evolución geoquímica de elementos mayores se detiene en bicarbonatada sódica, ejemplos de este caso se identifican en la zona de estudio y en San Luis Potosí (Carrillo, 1996). La principal razón está asociada con los minerales con los que está en contacto, la amplia distribución geográfica de las rocas volcánicas limita el contacto del agua subterránea con minerales de tipo evaporítico (yeso y anhidrita) que permitiría la evolución geoquímica del agua a sulfatada sódica, por lo tanto es posible concluir que el flujo regional está controlado por las rocas volcánicas.

Calidad del agua subterránea

La evaluación de la calidad del agua responde a la concentración de elementos mayores y traza derivados, ya sea de procesos geogénicos o antrópicos. Para tener una semblanza confiable respecto a esta importante temática se realizaron mapas temáticos interactivos con el propósito de identificar aquellas zonas del AJ en donde algunos de los elementos mayores y elementos traza pudiesen presentar concentraciones fuera de lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994, 2000 (Secretaría de Salud, 1994).

Considerando las actividades antropogénicas que se desarrollan en la cuenca hidrológica Jerez y el marco geológico de referencia se seleccionaron los aniones y cationes mayores, Na, Cl, F, SO₄, N-NO₃ y STD; en lo que concierne a elementos traza se estudió el comportamiento del As. Respecto al primer grupo, éstos se encuentran dentro de los límites permisibles, a excepción del F que forma una franja orientada

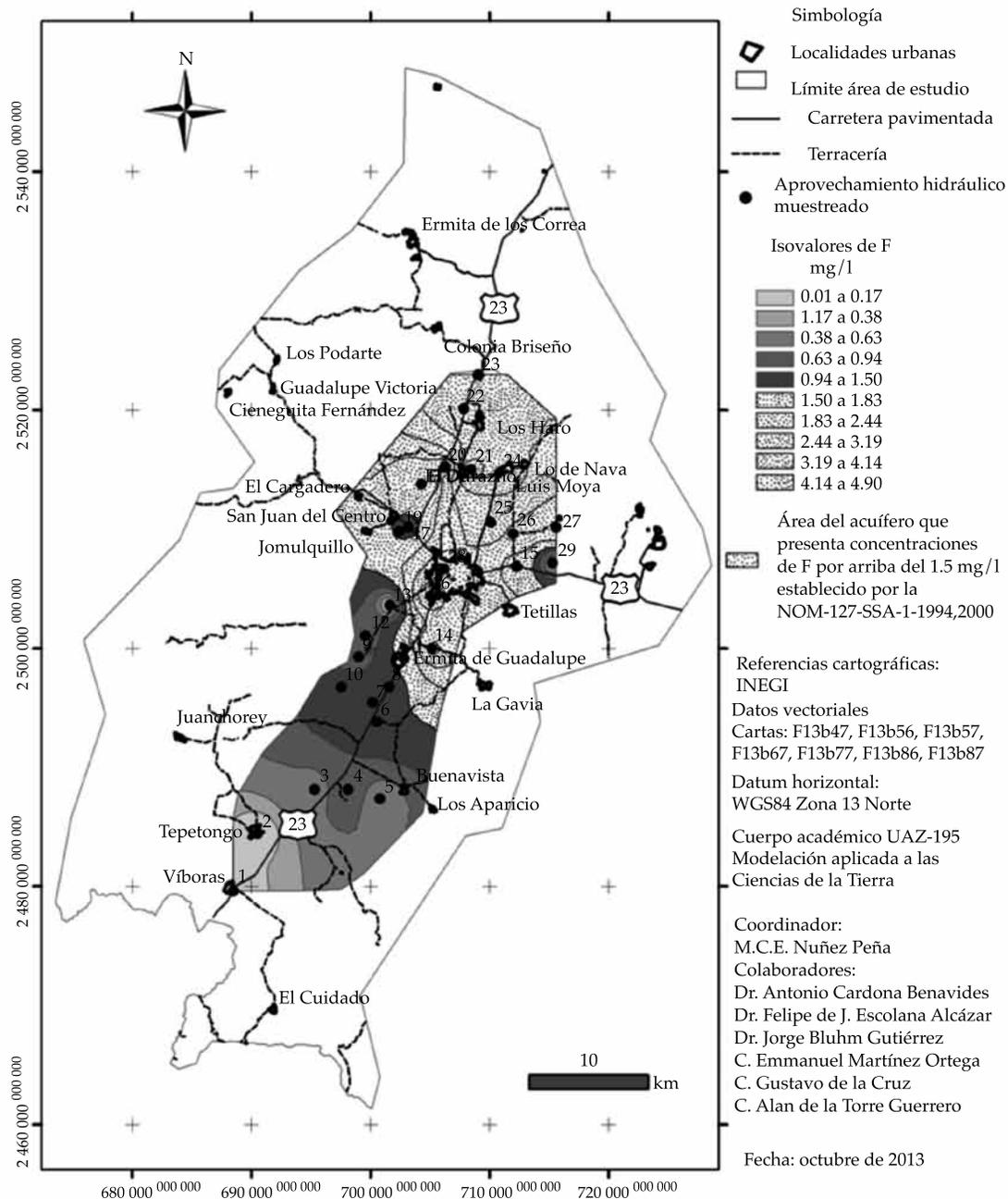


Figura 11. Mapa de isoconcentraciones de F que ilustra valores por arriba de los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 en las porciones centro y noreste del acuífero.

suroeste-noreste en la que se comprenden las muestras 14, 16 y de la 21 a la 28, con valores fuera de la normatividad oficial mexicana, que inicia en el noreste hasta la población Ermita de

Guadalupe (figura 11). En cuanto al arsénico, las muestras 21 y de la 23 a la 27, localizadas en la porción norte-noreste del acuífero (figura 12), superan las concentraciones los valores

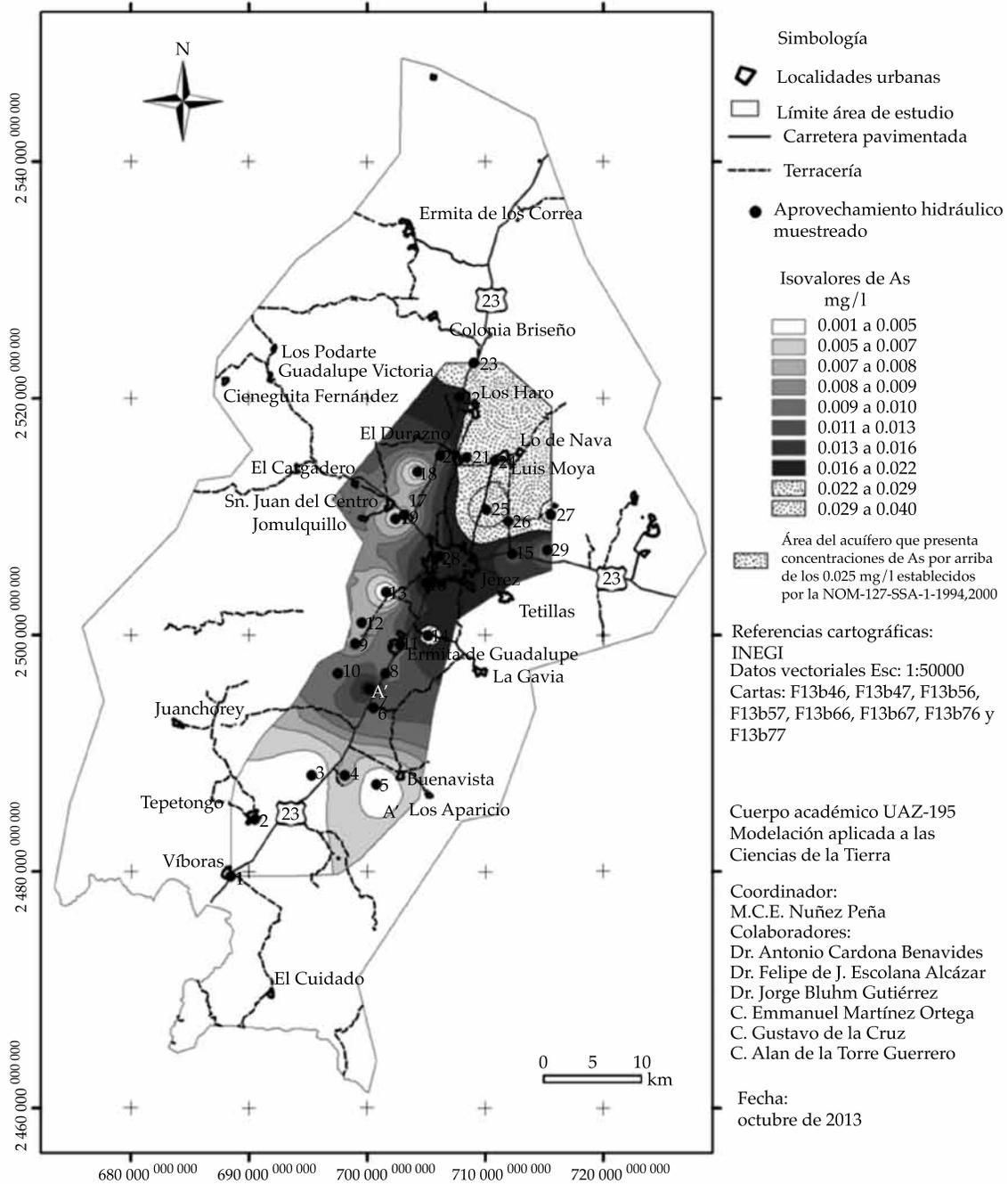


Figura 12. Mapa de isoconcentraciones de arsénico que ilustra valores por arriba de los límites permisibles de la NOM-127-SSA1-1994 en las porciones centro y noreste del acuífero.

establecidos por la NOM-127-SSA1-1994, 2000 (Secretaría de Salud, 1994), pero en el resto del acuífero las concentraciones están dentro de esa norma.

Conclusiones

En el acuífero se presentan tres familias de agua: bicarbonatada sódica, bicarbonatada mixta y

bicarbonatada cálcica. De acuerdo con la composición de elementos mayores y menores (Li, F, As), en conjunto con la geología del subsuelo, fue posible definir que la primera circula por el medio fracturado (unidades de rocas volcánicas) y tiene el mayor tiempo de residencia relativa en el sistema, la segunda y tercera circulan por el medio granular y, de las tres, el agua bicarbonatada cálcica es la de menor tiempo de residencia relativa en el acuífero, por lo que la bicarbonatada sódica es la que ha tenido la mayor evolución dentro del flujo subterráneo.

El análisis e interpretación de los datos químicos de elementos mayores y traza definen que se trata de agua subterránea relacionada con sistemas de flujo local e intermedio, con claras evidencias de la presencia de flujos regionales, probablemente relacionados con flujos intercuenas, como lo sería de la cuenca hidrológica Calera hacia la de Jerez, mismos que por el momento aún no se han manifestado plenamente en esta última, pero considerando la extracción intensiva que se requiere para el riego de productos agrícolas como la alfalfa, práctica ampliamente extendida en la CHJ y, por otro lado, la existencia de un incipiente riego tecnificado dentro de esa cuenca, se podría potenciar un mayor abatimiento de los sistemas local e intermedio, y por tanto incrementar la extracción de agua del sistema de flujo regional, con todas las consecuencias que ello implica por la presencia de mayores concentraciones de F, As, y probablemente algunos otros elementos pesados que contribuirían al deterioro de la calidad del agua.

En términos generales, el agua subterránea se considera de buena calidad, con excepción de la porción noreste del acuífero, en donde se presentan algunos pozos con rangos de concentración por arriba de lo establecido en la NOM-127-SSA1-1994, 2000 (Secretaría de Salud, 1994) tanto en As en los pozos 21 y del 23 al 27 (figura 12) como en F, abarcando los aprovechamientos hidráulicos situados en la porción centro noreste del acuífero (figura 11). Recomendándose por tanto la no utilización directa del agua de esos aprovechamientos para uso y consumo humano, no sin antes haber diluido con mezclas de

agua subterránea procedente de otros pozos del acuífero ubicados fuera de las zonas anómalas en As y F, a fin de lograr estándares de agua potable.

Agradecimientos

Los autores integrantes del Cuerpo Académico Modelación Aplicada a las Ciencias de la Tierra, Clave UAZ-CA195 y del Cuerpo Académico "Geodinámica y Materiales de la Corteza" de la UASLP agradecen al Programa de Mejoramiento del Profesorado por el apoyo financiero brindado para la realización del proyecto *Situación actual de la hidrodinámica del acuífero Jerez, estado de Zacatecas*.

Referencias

- Banning, A., Cardona, A., & Rude, T. (2012). Uranium and Arsenic Dynamics in Volcano-Sedimentary Basins –An Exemplary Study in North-Central Mexico. *Applied Geochemistry*, 27, 2160-2172, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.01.001>.
- Cardona, A. (2007). *Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación* (238 pp.). Tesis de doctorado en Ciencias de la Tierra. México, DF: Programa de Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México.
- Cardona, A., & Carrillo, J. (noviembre, 1998a). Hidrogeoquímica y mecanismos de recarga en la Sierra Madre Occidental, México (pp. 1468-1488). Vol. 3. *Memorias del 4º Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, Montevideo, Uruguay.
- Cardona, A., & Carrillo, J. (1998b). Situación hidrogeológica de las cuencas de San Luis Potosí, Aguascalientes, Hidalgo y Valle de México, como referencia conceptual del funcionamiento del agua subterránea en la región centro del país (pp. 69-83). *Memorias del Simposio Internacional de Aguas Subterráneas*, León, Guanajuato, México.
- Carrillo, J. (1996). Importance of the Vertical Component of Groundwater Flow: A Hydrogeochemical Approach in the Valley of San Luis Potosi, Mexico. *Journal of Hydrology*, 185, 23-44.
- Carrillo, J., Cardona, A., Edmunds, W. (2002). Use of extraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in extracted groundwater: San Luis Potosí Basin, México. *Journal of Hydrology*, 261, pp. 24-47
- Carrillo, J., & Cardona, A. (2012). Groundwater Flow Systems and Their Response to Climate Change: A Need for a Water-System View Approach. *American Journal of Environmental Sciences*, 8(3), 220-235.

- Conagua (1974). *Estudio geohidrológico preliminar de la cuenca de Jerez, estado de Zacatecas* (75 pp.). SARH, realizado por Consultores S.A. (inédito). México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (1981). *Estudio geohidrológico del valle de Jerez estado de Zacatecas* (150 pp.). SARH, realizado por Consultores S.A. (inédito). México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (1974-1998). *Datos piezométricos de 136 pozos del acuífero Jerez* (20 pp.). Reporte interno. Dirección Estatal Zacatecas (inédito). México, DF: Comisión Nacional del Agua.
- Conagua (noviembre 2009) [en línea]. Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (3205) Jerez, estado de Zacatecas. *Diario Oficial de la Federación*. Comisión Nacional del Agua. Recuperado de http://www.conagua.gob.mx/Conagua07/Aguasubterranea/pdf/DR_3205.pdf.
- Coremi (octubre de 1997). *Informe geológico -minería y geoquímica de la carta Zacatecas F13-6, Escala 1:250,000* (154 pp.). México, DF: Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- Coremi (1998). *Carta geológica minera y geoquímica F13-6, escala 1:250,000*. México, DF: Consejo de Recursos Minerales, Secretaría de Comercio y Fomento Industrial.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Groundwater* (604 pp.). Englewood Cliff, USA: Prentice Hall.
- Grael, E., Cardona, A., & Carrillo, J. (septiembre-diciembre de 1999). Hidrogeoquímica en el acuífero calcáreo de Mérida, Yucatán: elementos traza. *Ingeniería Hidráulica en México*, 14(3), 19-26.
- INEGI (2013). Conjuntos de datos vectoriales y modelos de elevación. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática.
- McDowell, F. W., & Clabaugh, S. E. (1979). Ignimbrites of the Sierra Madre Occidental and their Relationship to the Tectonic History of Western Mexico. *Boletín de la Geological Society of America. Special paper*, 180, 113-124.
- Molina, A. (1996). Diferenciación hidrogeoquímica de los flujos de agua subterránea en la zona sur-centro del estado de Aguascalientes, México (121 pp.). Tesis de licenciatura. México, DF: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Secretaría de Salud (1994). Modificación a la NOM-127-SSA1-1994 del agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Actualización en 2000. *Diario Oficial de la Federación*, 18-1-1996, 41-49.
- Struckmeier, W., & Margat, J. (1995). Hydrogeological Maps a Guide and a Standard Legend. *Association of Hydrogeologists*, 17, 177.
- Tóth, J. (1962). A Theory of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta. *Journal of Geophysical Research*, 67(11), 4375-4387.
- Tóth, J. (1963). A Theoretical Analysis of Groundwater Motion in Small Drainage Basins in Central Alberta. *Journal of Geophysical Research*, 68(11), 4795-4812.
- Wood, S. (1995). Chemical and Isotopic Method for Quantifying Ground-Water Recharge in a Regional Semiarid Environment. *Ground Water*, 33(3), 458-486.

Dirección institucional de los autores

M.C. Ernesto Patricio Nuñez Peña
 Dr. Felipe de Jesús Escalona Alcázar
 Dr. Jorge Bluhm Gutiérrez
 Geól. Gustavo Alfonso Ramos-De la Cruz
 Geól. Alan de la Torre-Guerrero
 Geól. Emmanuel Ortega-Martínez

Unidad Académica de Ciencias de la Tierra
 Universidad Autónoma de Zacatecas
 Calzada de la Universidad 108, Colonia Progreso
 98000 Zacatecas, Zacatecas, MÉXICO
 Teléfono: +52 (492) 9226 470
 epnunez@yahoo.com.mx
 fescalona@hotmail.com
 jorgebg5@yahoo.com
 gardc@hotmail.com
 che_manuel04@hotmail.com

Dr. Antonio Cardona Benavides

Área de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería
 Universidad Autónoma de San Luis Potosí
 Av. Manuel Nava 8, Zona Universitaria
 78290 San Luis Potosí, San Luis Potosí, MÉXICO
 Teléfono: +52 (444) 8262 330, extensión 2105
 acardona@uaslp.mx