

**CALIDAD DEL AGUA EN POZOS DE LA RED DE MONITOREO
DEL ACUÍFERO DEL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO**
**WATER QUALITY IN WELLS OF THE NETWORK OF MONITORING
OF THE AQUIFER IN THE VALLEY OF SAN LUIS POTOSÍ, MEXICO**

Yazmin Peña Hernández¹; Germán Santacruz de León²; Hilario Charcas Salazar³

RESUMEN

El objetivo de este artículo es identificar las familias de agua y analizar el comportamiento de la calidad química del agua del Sistema Acuífero del valle de San Luis Potosí (SAVSLP). El SAVSLP está constituido por tres tipos de acuíferos (somero, intermedio y profundo); el SAVSLP tiene una superficie de 1,800 km², está localizado en una zona árida, con una precipitación pluvial media anual de 386 mm, abastece al principal centro urbano del estado de San Luis Potosí, el cual cuenta con 970 mil habitantes. Se usaron 346 muestras de agua de pozos y norias obtenidas entre los años 1998 y 2009. La información se procesó y analizó con el software Aquachem 4.0 para identificar las familias de agua; para georeferenciar los pozos y norias se usó el software ArcGis 9.2. Los valores de calidad del agua se compararon con los límites máximos permisibles establecidos en la NOM-127-SSA1-1994 para uso doméstico. Para la clasificación en función del uso agrícola, se consideró a la Relación de Absorción de Sodio (RAS) y a la Conductividad Eléctrica (CE). Los resultados muestran la presencia de nitratos de origen antropogénico en el acuífero somero, con valores máximos de 55.8 mg/l y flúor de origen natural en el acuífero profundo con valores máximos de 5.68 mg/l; por otro lado, el acuífero somero presentó altos niveles de salinidad, lo que restringe su uso para algunos cultivos.

Palabras clave: Acuífero, Calidad del agua, Contaminación del agua, San Luis Potosí, México.

ABSTRACT

The aim of this work was to identify the different types of families of water and analyze the chemical quality of water of the aquifer pertaining to the Valley of San Luis Potosí (AVSLP). The AVSLP consists of three types of aquifers (shallow, intermediated and deep), the AVSLP has an area of 1800 Km²; it is located in an arid zone, which has 970 thousand inhabitants. 346 samples of water were used, that were obtained between 1998 and 2009 coming from wells and water wheels. The information was processed and analyzed with the Aquachem 4.0 in order to identify the types of families of water. The wells and water wheels were georeferenced with ArcGis 9.2. The water quality values were compared with the maximum permissible limits established in NOM-127-SSA1-1994 for domestic use. For the agricultural water classification the sodium absorption ratio (SAR) was considered as well as the electrical conductivity (EC). The shallow aquifer had nitrates of the anthropogenic activities with a maximum concentration of 55.8 mg/l and fluorine was observed in the deep aquifer with a maximum concentration of 5.68 mg/l, on the other hand, the shallow aquifer had high levels of salinity, which restricts its use for some crops.

Keywords: aquifer, water quality, water contamination, San Luis Potosí, México.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un líquido que contiene materiales sólidos en solución y su composición química depende de la naturaleza y composición de dichos sólidos disueltos. La hidrogeoquímica estudia la composición química del agua subterránea, así como las reacciones provocadas por esa composición, lo que permite entender la interacción del agua con el material rocoso. Si se analiza un agua de reciente infiltración la composición de iones de calcio serán mayores que los de magnesio y éste será mayor que el del sodio; en el caso de los aniones la presencia de bicarbonatos será mayor que la de los sulfatos y éstos tendrán una mayor concentración que los clo-

ruros (Lillo, 2005; Price, 2003). Después de un largo tiempo de residencia, y por consecuencia del contacto del agua infiltrada con la roca, la composición se invierte, de manera que en este caso la concentración del sodio es mayor que la del magnesio y la de éste es mayor con respecto al calcio; lo mismo ocurre con los aniones (Lillo, 2005; Price, 2003).

La gran variedad de la composición química del agua y la búsqueda del entendimiento de la interacción entre el agua subterránea y los materiales rocosos han generado diferentes técnicas para reportar los componentes químicos del agua (Driscoll, 1986). Las mismas van desde tablas, gráficas o diagramas de pastel como los propuestos por Hill o Piper, además

¹ Maestría en Hidrosistemas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma San Luis Potosí.

² Profesor-Investigador del Programa "Agua y Sociedad". El Colegio de San Luis, A.C. Parque de Macul # 155, Col. Colinas del Parque. San Luis Potosí, S.L.P. C.P. 78299. México. Tel. (444) 8 11 01 01 ext. 6109. E-mail: gsantacruz@colsan.edu.mx.

³ Profesor-Investigador de la Maestría en Hidrosistemas, Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma San Luis Potosí

Artículo enviado el 19 de junio de 2012
Artículo aceptado el 3 de diciembre de 2012

de los llamados índices hidrogeoquímicos. El diagrama de Piper, permite analizar dicha composición y se emplea para compilar un gran número de análisis químicos de agua (Appelo y Postma, 2005; Kehew, 2001), y permite mostrar las variaciones en la composición química del agua.

Por otro lado, cada vez más se está poniendo atención al monitoreo y al análisis de la calidad del agua, sobre todo en los países en desarrollo; de manera que se han generado diferentes técnicas para reportar su calidad, entre ellos los llamados Índices de Calidad del Agua (ICA) los cuales agrupan uno o varios parámetros (Guzmán-Colis et al. 2011; Kankal et al. 2012), incluso con el soporte de técnicas estadísticas (Hafizan et al. 2011; Hülya y Hayal, 2007; Mohd et al. 2011; Papaioannou et al. 2010). Para el caso de México, a partir del año 2002, el ICA "oficial" sólo considera la materia orgánica medida como DBO o DQO (Espinosa et al. 2010; Jiménez, 2007), pero no considera la presencia de contaminación química y biológica. De manera que el ICA ofrece un valor numérico que integra diversos parámetros, lo cual se convierte o suele convertirse en una desventaja, sobre todo a los ojos de la opinión pública. Del mismo modo, el conocimiento de la calidad del agua para fines de uso agrícola es de suma importancia, aunque en México no existen parámetros normados, existen criterios que sirven como apoyo para la clasificación de agua de riego.

En México el agua subterránea es la principal fuente de abasto para diversos usos en las zonas áridas y semiáridas, el conocimiento de la composición química de la misma, en el tiempo y el espacio, es muy importante porque permite diferenciar zonas y, en función de dicha composición, destinarla al mejor uso posible. El acuífero del valle de San Luis Potosí tiene una superficie de 1,800 km² (Carrillo y Cardona, 2003), está localizado en una zona árida, con una precipitación pluvial media anual de 386 mm (Cardona, 2007), abastece al principal centro urbano del estado de San Luis Potosí, en el que habitan 970 mil habitantes; es la principal fuente de abastecimiento del agua para diversos usos en la Zona Metropolitana de San Luis Potosí (Alcalde, 2003; Carrillo y Cardona, 2003; Cirelli, 2004). Debido a dicha dependencia, se han realizado numerosos y diversos estudios que buscan develar sus condiciones geohidrológicas e hidrogeoquímicas (véase: Cardona, 2007; Carrillo y Cardona, 2003; Hergtet et al. 2009; López, 2012; Moran, 2010; Noyola et al. 2009). La Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) tiene una red de monitoreo de la calidad del agua subterránea que opera de manera regular en el acuífero del valle de San Luis Potosí, los datos obtenidos a partir de la misma son considerados como los de carácter oficial, esa información no ha sido analizada de manera sistemática.

El objetivo de este artículo es identificar las familias de agua y analizar la calidad química del agua del acuífero del valle de San Luis Potosí a partir de 346 muestras de agua obtenidas entre los años 1998 y

2009 para diferentes aprovechamientos hidráulicos subterráneos. La información fue procesada y analizada mediante el uso de hojas de cálculo, para su clasificación se usó el software Aquachem 4.0 y para localizar espacialmente los pozos se empleó el software ArcGis 9.2. Los valores encontrados se compararon, para el caso de uso doméstico, con los establecidos en las normas oficiales mexicanas. Para la clasificación en función del uso agrícola, se compararon con los criterios propuestos por Richards (1973), que considera a la Relación de Adsorción de Sodio (RAS) y la Conductividad Eléctrica (CE).

Los resultados obtenidos muestran que la clase de agua predominante, para uso agrícola, es la C₃S₁, que puede interpretarse como agua de salinidad alta y bajo contenido de sodio. Con respecto al uso doméstico, los resultados muestran que existen aprovechamientos con concentraciones de nitratos, fluoruros, cloruros, sulfatos, sólidos disueltos totales y sodio que exceden los valores establecidos en la NOM-SSA1-127-1994.

METODOLOGÍA

a. Localización y caracterización del área de estudio

El acuífero administrativo de San Luis Potosí se encuentra localizado en la zona conurbada de la ciudad de San Luis Potosí. Las coordenadas que limitan al acuífero son 21°54'54", 22°28'16" de latitud norte y los meridianos 100°37'8", 101°13'44" de longitud este (Figura 1). Los climas predominantes son el Semiseco Templado (BS₀kw), Seco Semicalido (BS₀hw), Seco Templado (BS₀kw.) hasta el Muy Seco Templado (BWkw.). Estos cuatro tipos de climas se caracterizan por presentar lluvias en el verano, son cálidos, con excepción del clima seco semicalido que tiene un invierno fresco, pero todos cumplen un intervalo del 5% al 10.2 % de precipitación en el invierno. En términos geológicos, la columna estratigráfica del altiplano Potosino incluye rocas sedimentarias y volcánicas cuyas edades varían del Cretácico a

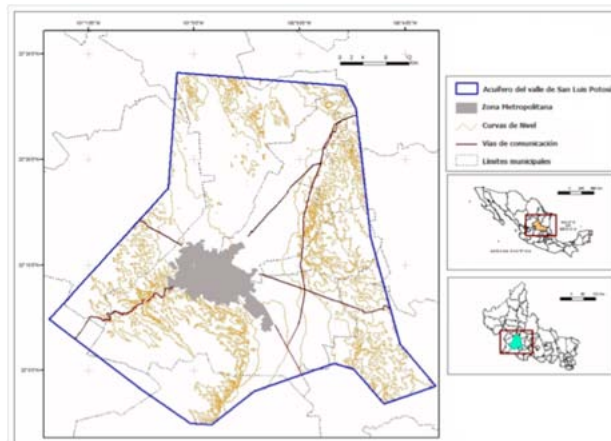


Figura 1 Localización del acuífero del valle de San Luis Potosí.

la edad reciente (Labarthe-Hernández et al. 1982 y 1992; Tristán-González, 1986; Aguillón-Robles et al. 1994; Nieto-Samaniego et al. 1996 y 1997). El valle está formado por fallas normales orientadas hacia el norte, los cuales se rellenaron con flujos piroclásticos, flujos de lava y abanicos aluviales con una distribución regional (COTAS, 2005).

Actualmente existe controversia en el número de acuíferos que constituyen el Sistema Acuífero del valle de San Luis Potosí (SAVSLP); en los años 1960 se plateaba, con base en el nivel estático y la temperatura del agua en algunos pozos, la existencia de dos acuíferos, uno somero y el otro profundo (Streeta y Del Arenal, 1960). En la década de los 1970, se señala la existencia de dos acuíferos, el somero conformado por material aluvial, con espesores de 250 m y el profundo considerado como confinado (Labarthe y Tristán, 1978); lo mismo, aunque con mayor información, se sigue sosteniendo en 1990, se dice que el acuífero somero está formado por una capa de arena, es de tipo libre con profundidades del nivel del agua entre 5 y 30 m; el acuífero profundo es de tipo confinado, en algunas partes la profundidad al nivel del agua es de 200 m y presenta aprovechamientos hidráulicos con profundidades de 350 m a 450 m, aunque existen pozos cuya perforación alcanza los 800 m a 1000 m (Cardona, 2007). Finalmente, en la última década se considera que el sistema acuífero del valle de San Luis Potosí, está constituido por tres acuíferos, el somero que es muy superficial con espesores de 40 m y formado por depósitos aluviales con limo, arena y grava (material poco permeable); el acuífero medio que está conformado por material granular y es el más explotado con pozos de hasta 350 m de profundidad, en material sedimentario, tiene un espesor que varía entre 100 a 200 m; y el acuífero profundo que está conformado por un medio fracturado (López, 2012; Noyola et al. 2009).

b. Recopilación, registro y organización de los datos de las muestras de agua.

La información se obtuvo de los archivos de los laboratorios de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), que corresponden al periodo de 1998 al 2009. Con la información de calidad del agua se conformaron bases de datos, para lo cual se utilizó la hoja cálculo de Excel. Se construyó una matriz en la que las filas corresponden a las muestras de los distintos aprovechamientos y las columnas a los cationes Ca^{+2} , Mg^{+} , Na^{+} y K^{+} y a los aniones Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} , NO_3^{-} y F^{-} .

c. Condición de electroneutralidad

Las soluciones de las muestras que se analizan deben cumplir con el principio de electroneutralidad, es decir, la suma de las cargas de todos los cationes debe ser igual a la suma de las cargas de todos los aniones, deben ser eléctricamente neutras (Fitts, 2002). Para comprobar la exactitud de los análisis

de los iones mayores se realiza el balance iónico. El error que resulta de dicho balance, se expresa por la diferencia de iones (Ecuación 1).

$$\% \text{ Electroneutralidad} = \frac{(\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones})}{(\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones})} \times 100 \quad (1)$$

En esta fórmula, los cationes y aniones se expresan en meq/l. Los iones que se suman son K^{+} , Mg^{2+} , Na^{+} , Ca^{2+} , Cl^{-} , HCO_3^{-} , SO_4^{2-} y NO_3^{-} (Appelo y Postma, 1996 y 2005). Para que el análisis de una muestra sea válido, la amplitud de variación del porcentaje de electroneutralidad debe ser de $\pm 5\%$; aunque, se puede aceptar una amplitud de hasta $\pm 10\%$ (Freeze y Cherry, 1979). En este caso se consideró el intervalo de $\pm 10\%$.

d. Determinación de las familias de agua

La clasificación de familias de agua se realizó mediante el diagrama de Piper, el cual consta de dos triángulos equiláteros ubicados lateralmente y un rombo al centro: el triángulo izquierdo representa las concentraciones de los cationes, el derecho, las de los aniones; el rombo representa la intersección de las concentraciones de los cationes y aniones, y define la familia de agua a la que pertenece la muestra. (Appelo y Postma, 1996 y 2005; Lloyd y Heathcote, 1985). El diagrama de Piper permite reflejar las variaciones causadas por mezclas de aguas, precipitaciones-disoluciones, procesos de intercambio iónico y permite establecer de forma directa la evolución hidroquímica de las aguas (Lilo, 2007). Finalmente, el diagrama permite representar diversos tipos de agua en un sólo gráfico. Los diagramas de Piper se obtuvieron con el software AquaChem 4.0, un programa diseñado por Waterloo Hydrogeologic, que arroja representaciones gráficas y numéricas, además de que permite interpretar datos de calidad de aguas (Cox, 2006). La información validada del acuífero se importó hacia la plataforma del programa AquaChem 4.0. En este programa los datos de las muestras se clasificaron por año y por aprovechamiento, la primera, incluye todas muestras del mismo año, la segunda, comprendió sólo los aprovechamientos que contaban con datos de más de cinco años; finalmente se obtuvieron los diagramas de Piper para las dos clasificaciones.

e. Clasificación del agua en relación con el uso urbano

La calidad de agua potable es el grado de calidad requerido para que pueda ser usada en el consumo humano. Los resultados de calidad química del agua se compararon con los límites permisibles de calidad química para uso y consumo humano establecidos en la NOM-127-SSA1-1994.

El comportamiento espacial de la calidad del agua se realizó mediante el programa ArgGIS 9.2; mien-

tras que la evaluación temporal se analiza a partir de gráficas generadas en hoja de cálculo Excel. En ambos casos, las variables evaluadas fueron el sodio, los sulfatos, los cloruros, fluoruros, nitratos y sólidos disueltos totales; es importante señalar que son diversos los daños a la salud que puede provocar la presencia de estos compuestos (OMS, 2006; Romero, 2009).

f. Clasificación del agua en relación con el uso agrícola

El agua para uso en riego agrícola se clasificó considerando la concentración total de sales (Conductividad Eléctrica) y la proporción de sodio con respecto a los cationes calcio y magnesio (Relación de Absorción de Sodio). Los dos índices considerados para efectos de salinidad o de sodicidad del agua, se conjuntaron e interpretaron con el apoyo del diagrama de Wilcox, propuesto por el Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América, tal diagrama considera la concentración total de sales solubles expresada representada por la conductividad eléctrica en $\mu\text{mhos/cm}$ a 25°C , los valores que corresponden a este parámetro se representan en el eje vertical. Por otro lado, la concentración de sodio en relación a la correspondiente al calcio y al magnesio, es decir el índice de relación de adsorción de sodio, es representada por líneas perpendiculares a las líneas de conductividad.

RESULTADOS Y DISCUSION

La información obtenida del archivo de la CONAGUA corresponde a datos de 346 muestras, de ellas 297 corresponden a 15 pozos profundos y 70 fueron tomadas en 3 norias, que constituyen la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua del Acuífero del valle de San Luis Potosí (Tabla 1); es muy importante señalar que estos aprovechamientos subterráneos se encuentran en operación y se destinan a diversos usos; diez se destinan a uso público urbano, seis a uso agrícola y sólo uno de ellos se destina a uso industrial. El número total de aprovechamientos –para los distintos usos- registrados por la CONAGUA, ascienden a 1,194 (Figura 2).

En relación con la validación de los datos por la condición de electroneutralidad, los resultados muestras que, de las 346 muestras consideradas, el 1.7% no queda comprendido en el intervalo de $\pm 10\%$ (Figura 3). De acuerdo con lo establecido en la bibliografía especializada, 340 muestras cumplen la calidad necesaria para ser consideradas en el análisis de la composición química del agua.

Considerando que la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CONAGUA comprende aprovechamientos (norias) en el acuífero somero y aprovechamientos (pozos) en el acuífero profundo, los resultados de las familias de agua se presentan considerando lo anterior. En la noria CNA-11-576-1 ha predominado la familia mixta cálcica; en la noria

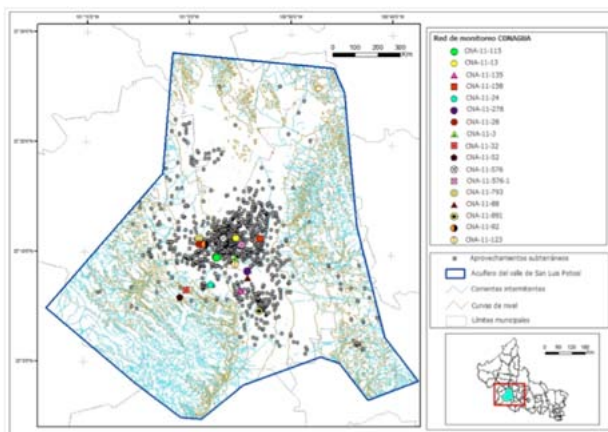


Figura 2. Localización de los pozos y norias de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CONAGUA en el acuífero de San Luis Potosí.

CNA-11-891 cuyas extracciones se destinan a uso agrícola, se clasifica como bicarbonatada cálcica; en la noria CNA-11-135 predomina la familia mixta cálcica, aunque existen muestras clasificadas como bicarbonatadas cálcicas; finalmente en la noria CNA-11-158 predomina la bicarbonatada cálcica aunque también presenta muestras clasificadas como mixtas cálcicas (Figura 4); estos resultados coinciden con los encontrados por Cardona(2007) y Morán (2010).

Se elaboraron diagramas de Piper por año, en el en el concentrado general se observa que predominan las familias Bicarbonatada-Sódica, la Bicarbonatada-Mixta y la Bicarbonatada-Cálcica. Al realizar el análisis por pozo se observa que en el pozo CNA-11-576 (uso agrícola) predomina -con 48% de las muestras-el agua clasificada como Mixta-Cálcica y el 36 % se clasifican como Mixta-Mixta. En los pozos CNA-11-24, CNA-11-28 y CNA-11-3destinados a uso público urbano ha permanecido en el tiempo la familia de agua Bicarbonatada-Sódica (Figura 5). Los pozos anteriores explotan el acuífero profundo a profundidades que están entre los 200 a 400 metros.

En lo que respecta a la calidad del agua para uso público urbano –incluido el uso potable-, sólo 10 pozos de los 17 de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CONAGUA se destinan a dicho uso; sin embargo, se analiza el comportamiento de la calidad del agua en las norias que explotan el acuífero somero aunque no cumple las condiciones de calidad para uso doméstico.

En tal sentido puede verse que en las norias CNA-11-576-1 y CNA-11-135 se tienen valores máximos de 303.5 mg/l y de 304.8 mg/l respectivamente, que sobrepasan los 250 mg/l establecido como máximo permisible para la presencia de cloruros. El valor máximo de sulfatos se presentó en el aprovechamiento CNA-11-576-1 en el año 2007 y fue de 617.9 mg/l, la norma oficial mexicana establece un límite máximo de 400 mg/l para este parámetro. En relación con los

Tabla 1. Localización geográfica, volúmenes extraídos, usos y número de muestras extraídas en la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua de la CONAGUA en el acuífero de San Luis Potosí, México.

Clave RED	Clave CONAGUA	x	y	Tipo de Aprovechamiento	Número de muestras	Profundidad (m)	Q (lps)	Uso
EACCN-10	CNA -11-576	-100.94	22.19	Pozo	22	N/D	5	Agrícola
EACCN-09	CNA -11-576-1	-100.91	22.18	Noria	25	N/D	4	Agrícola
EACCN-01	CNA -11-891	-100.88	22.08	Noria	24	N/D	N/D	Agrícola
EACCN-03	CNA -11-793	-100.98	22.19	Pozo	24	270	N/D	Agrícola
EACCN-11	CNA -11-135	-100.91	22.11	Pozo	21	N/D	17.28	Industrial
EACCN-02	CNA -11-13	-100.92	22.19	Pozo	19	400	16.93	Público Urbano
EACCN-12	CNA -11-158	-100.88	22.19	Noria	21	N/D	9	Agrícola
EACCN-07	CNA -11-32	-101.00	22.11	Pozo	26	300	20	Público Urbano
N/D	CNA -11-52	-101.01	22.10	Pozo	16	300	15	Público Urbano
EACCN-05	CNA -11-3	-100.92	22.16	Pozo	16	217	24	Público Urbano
EACCN-04	CNA -11-24	-100.96	22.12	Pozo	29	300	17	Público Urbano
EACCN-06	CNA -11-28	-100.98	22.18	Pozo	25	N/D	10	Público Urbano
EACCN-08	CNA -11-92	-100.97	22.18	Pozo	27	300	33	Público Urbano
N/D	CNA -11-278	-100.90	22.14	Pozo	18	N/D	32	Agrícola
PACCN-06	CNA -11-115	-100.95	22.16	Pozo	11	267	20	Público Urbano
PACCN-07	CNA -11-88	-100.90	22.13	Pozo	8	350	38	Público Urbano
PACCN-05	CNA-11-123	-100.92	22.15	Pozo	11	300	29.44	Público Urbano

Fuente: Elaboración propia con base en información de la CONAGUA.

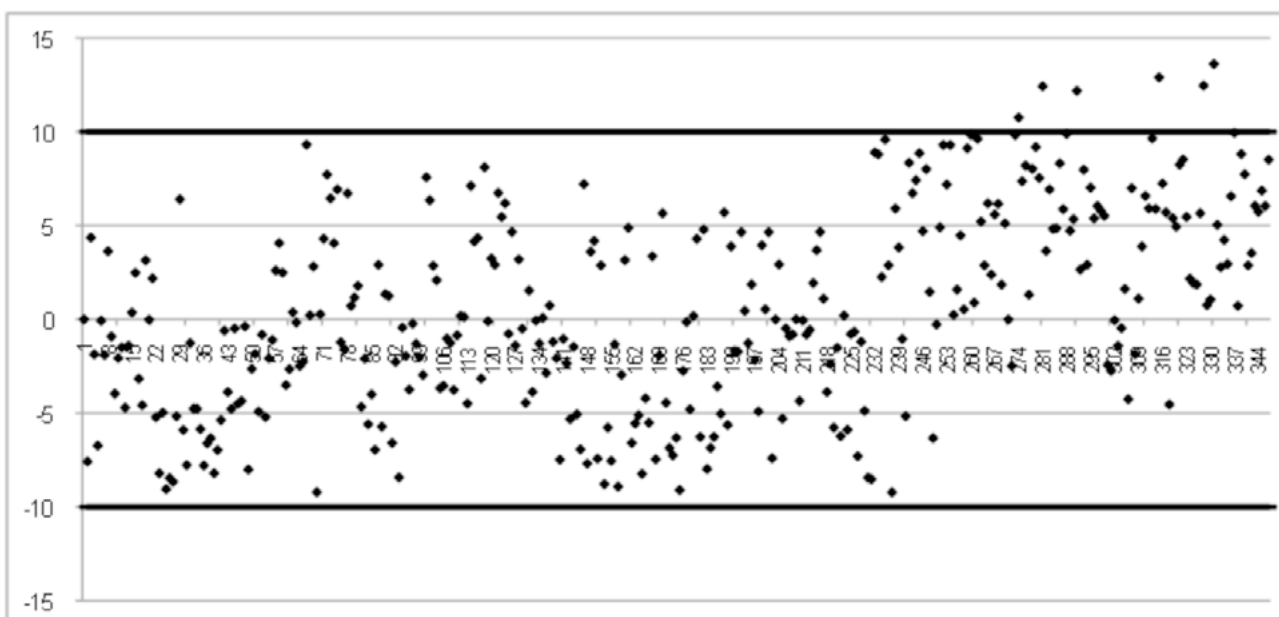


Figura 3. Porcentaje de electroneutralidad de las muestras tomadas en la Red de Monitoreo del acuífero de San Luis Potosí.

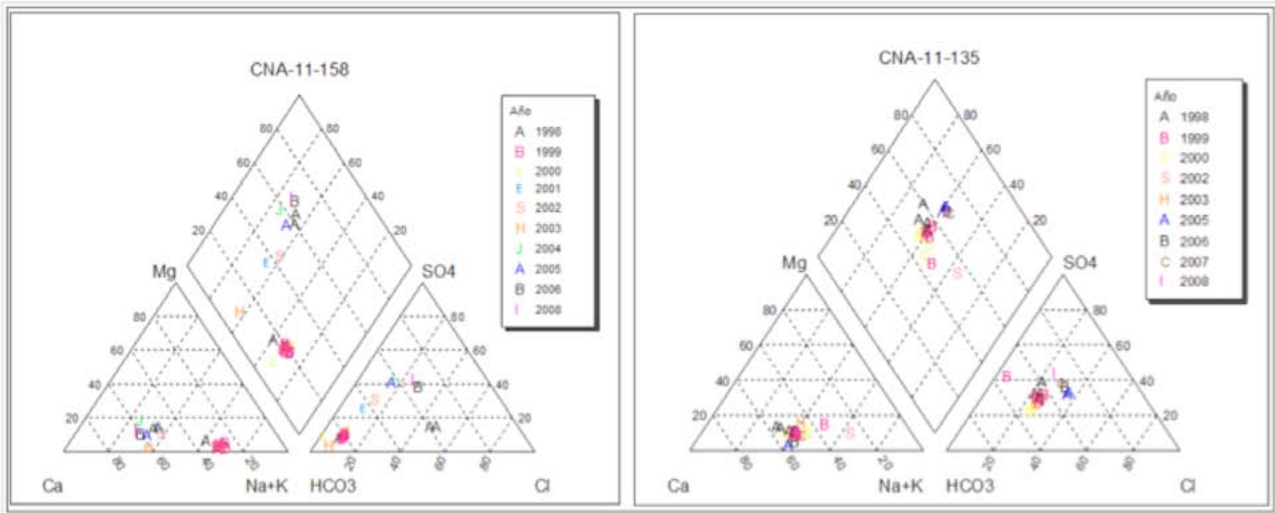


Figura 4. Diagrama de Piper (comportamiento temporal) para las norias CNA-11-158 y CNA-11-135 del acuífero de San Luis Potosí.

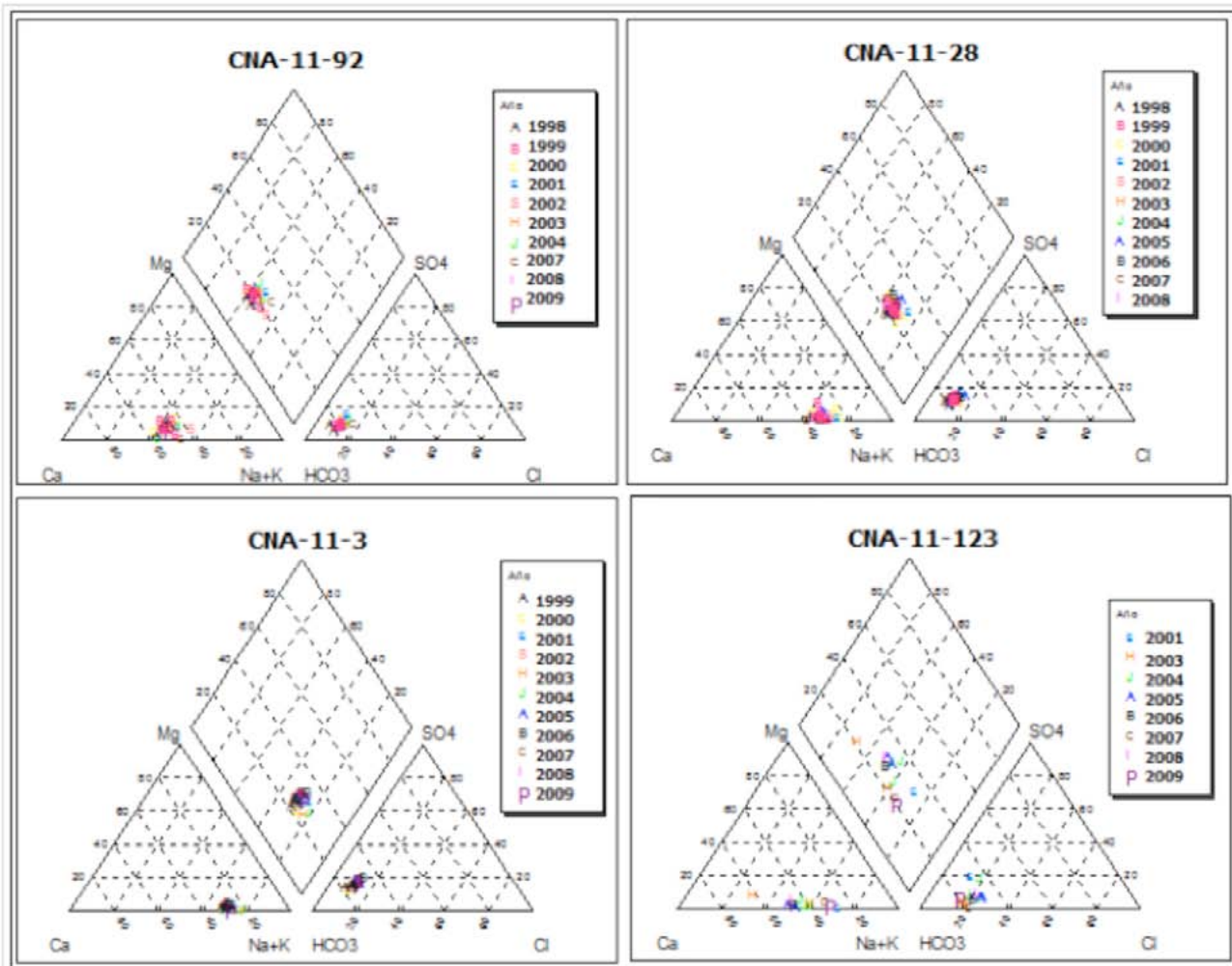


Figura 5. Diagrama de Piper para los pozos (comportamiento temporal) de la Red de Monitoreo de la calidad del agua en el acuífero de San Luis Potosí.

sólidos disueltos totales (SDT), esas mismas norias son las que sobrepasan los 1000 mg/l establecidos en la NOM-127-SSA-1994. Especial atención se le debe poner a la presencia de nitratos, en este caso sólo la noria CNA-11-576-1, con un valor máximo de 55.8 mg/l, rebasa los 10 mg/l establecidos en la norma mexicana (Tabla 2). Los resultados anteriores coinciden con los reportados para el acuífero somero por diversos autores, los cuales concluyen que este acuífero presenta contaminación de tipo antropogénica, debido fundamentalmente a las actividades industriales y agrícolas (Cardona, 2007; Carrillo-Rivera y Armienta, 1990; Hergt et al. 2009; López, 2012; Morán, 2010).

En el acuífero medio y profundo se localizan los aprovechamientos destinados a extraer agua para uso doméstico y público-urbano; los resultados de calidad del agua muestran contaminación química de tipo natural, relacionada con la presencia de fluoruros cuyo origen se encuentra en las rocas volcánicas fracturadas, por lo que durante el movimiento del agua subterránea a través de las fracturas, interacciona con su matriz vítrea y minerales como el topacio y la fluorita ricos en flúor (Bocanegra, 2005; Cardona, 2007; López, 2012; Noyola et al. 2009); sin embargo, puede señalarse que los niveles de

contaminación, que rebasan considerablemente lo establecido en la normatividad ambiental mexicana, se han incrementado como resultado del minado del acuífero. Los valores máximos encontrados, hasta el momento, son de 5.68 mg/l de fluoruros en el pozo CNA-11-3 cuya profundidad es de 220 m; este pozo en conjunto con los clasificados como CNA-11-28, CNA-11-24, CNA-11-278, CNA-11-52, CNA-11-32 y CNA-11-115, son los que exceden el límite máximo permisible en la NOM-127-SSA1-1994 (Figura 6) dichos valores son similares a los reportados por Cardona, 2007 y López, 2012.

En la tabla 1 puede verse que básicamente son las norias y un par de pozos profundos los que se destinan para uso agrícola; de manera que se pone énfasis en estos aprovechamientos en relación con la clasificación del agua para uso agrícola. Las norias CNA-11-576-1 y CNA-11-135 presentan aguas clase C3S1 y C4S1, dicho comportamiento permanece en el tiempo (Figura 7), estos resultados coinciden con lo reportado para el acuífero somero por Sarabia et al. (2011) y Morán (2010). Dichos aprovechamientos están perforados a profundidades que varían de 22 a 50 m; por lo que se podría considerar que las norias o pozos que están perforados a profundidades menores a 50 m y se localizan hacia el oriente del

Tabla 2. Valores máximos, mínimos y desviación estándar (mg/l) de parámetros de calidad del agua en norias del acuífero somero de San Luis Potosí

Parámetro		Aprovechamientos		
		CNA-11-576-1	CNA -11-135	CNA -11-158
SDT	Máximo	2106.2	1835.8	830.0
	Mínimo	1051.0	865.3	224.5
	Promedio	1431.5	1595.0	490.8
	Desviación Estándar	292.9	339.1	209.0
Na	Máximo	292.5	312.5	61.6
	Mínimo	110.6	135.6	13.3
	Promedio	180.8	194.6	38.0
	Desviación Estándar	39.2	45.8	11.1
Cl	Máximo	303.5	304.8	104.1
	Mínimo	83.5	35.0	1.5
	Promedio	214.0	189.6	25.7
	Desviación Estándar	56.4	53.9	29.7
SO4	Máximo	617.9	472.5	184.3
	Mínimo	102.0	197.3	3.8
	Promedio	311.5	312.2	40.4
	Desviación Estándar	93.9	71.2	50.6
NO3	Máximo	55.8	0.9	2.8
	Mínimo	0.4	0.4	0.2
	Promedio	6.2	0.6	1.3
	Desviación Estándar	14.2	0.2	0.7

Fuente: Elaboración propia.

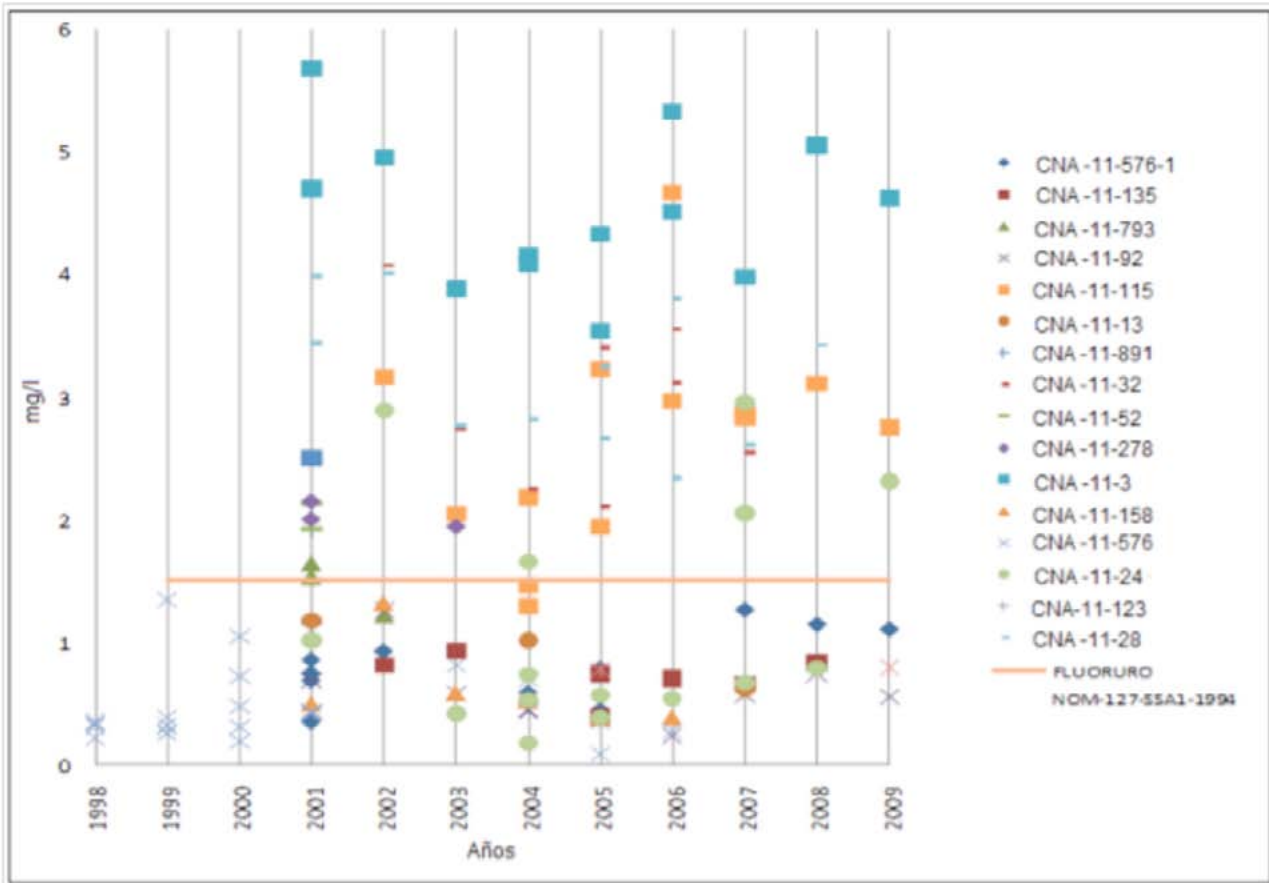


Figura 6. Variación temporal de fluoruros (mg/l) en los aprovechamientos de la red de monitoreo del sistema acuífero del valle San Luis Potosí.

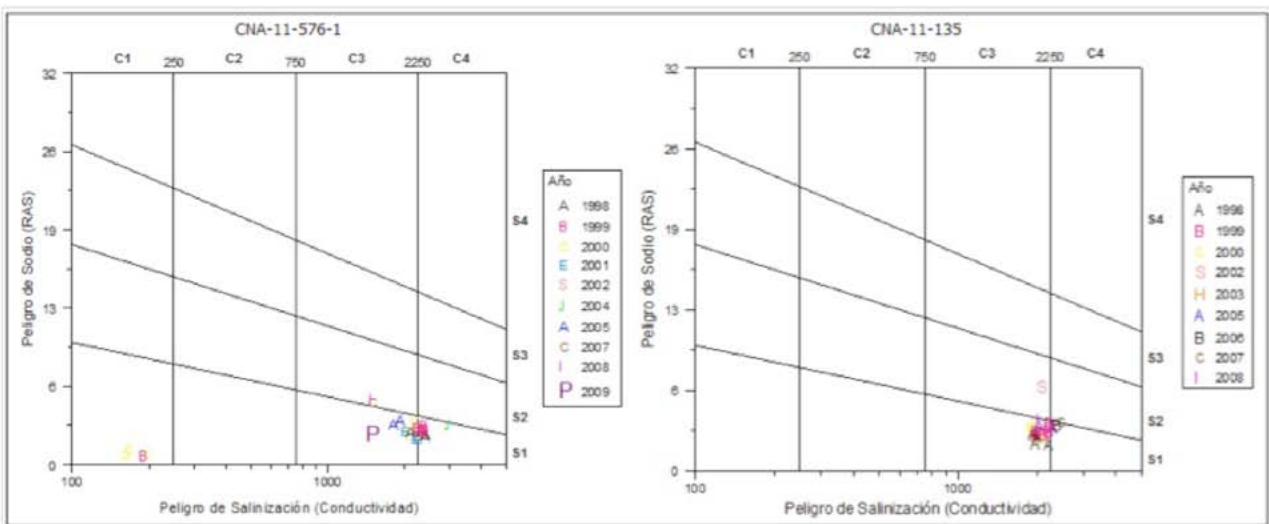


Figura 7. Variación temporal de las clases de agua en las norias CNA-11-576-1 y CNA-11-135.

acuífero, pueden presentar estas clases de agua. De acuerdo con esa clasificación, el agua de esas norias es altamente salina y de bajo contenido de sodio, de manera que se puede usar para el riego de cultivos tolerantes a la salinidad, en suelos con adecuadas condiciones de drenaje; aunque otros especialistas señalan que el uso de esta agua tiene un grado de restricción moderado para el riego de una amplia variedad de cultivos (Ayers y Westcot, 1985).

En el caso de los pozos que explotan el acuífero medio y que se destinan a uso agrícola, los peligros por la presencia de sodio son bajos y los de salinización son de bajos a medios, dando como resultados aguas clase C2S1 y C3S1 para el pozo CNA-11-278 y C2S1 para el pozo CNA-11-793 (Figura 8). Los resultados anteriores se pueden explicar por el hecho de que en el acuífero de San Luis Potosí se presentan dos patrones de flujo de la escorrentía: i) del área de

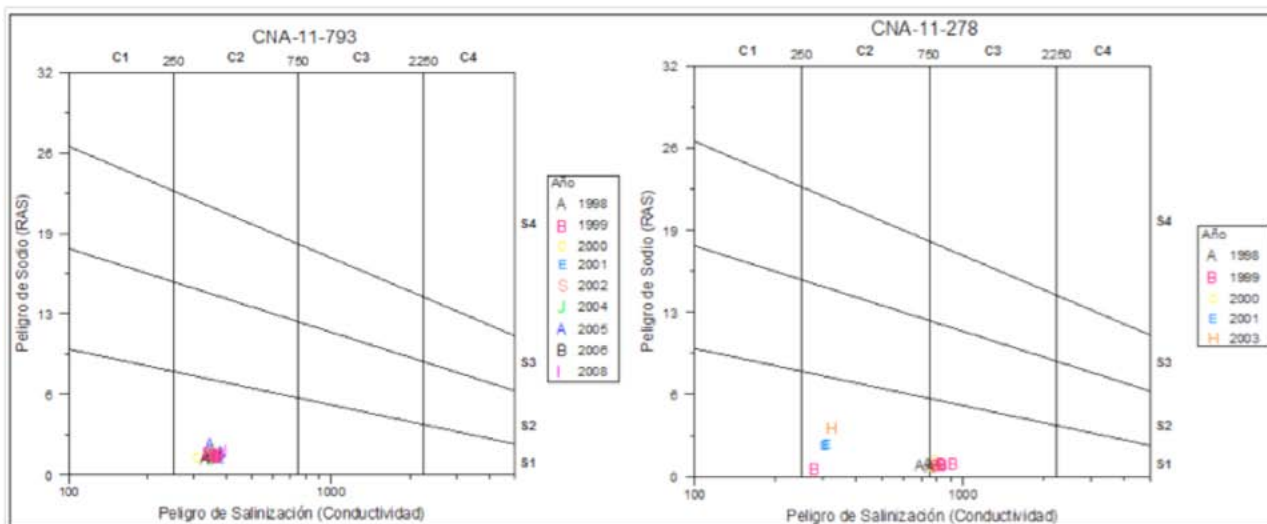


Figura 8. Variación temporal de las clases de agua en los pozos CNA-11-793 y CNA-11-278.

recarga occidental (sierra de San Miguelito) hacia el centro del valle, con un trayecto relativamente corto e infiltración a través de materiales granulares de origen ígneo; ii) del área de recarga oriental (sierra de Álvarez) hacia el centro del valle, con un trayecto más largo e infiltración a través de materiales ígneos y calizos.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos a partir de los pozos y norias de la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua del Sistema acuífero del valles San Luis Potosí, que son coincidentes con los reportados en otras investigaciones, permiten concluir que el acuífero somero se encuentra contaminado por componentes químicos, que en algunos casos requieren atención especial como es la presencia de nitratos, cuyo origen está en fuentes antropogénicas. Por otro lado, permiten concluir que el acuífero profundo presenta altos niveles de contaminación por flúor, los cuales ya presentan efectos notables en la salud de los habitantes, si bien es cierto que dicho elemento tiene un origen natural, las altas concentraciones (5.6 mg/l) han sido provocadas también por el minado del acuífero.

En lo que respecta a las condiciones del agua para uso agrícola, las extracciones del acuífero profundo, y esto coincide con lo reportado en otras investigaciones para ciertos años, se clasifican como aguas tipo C_2S_1 pertinentes para el riego de la mayoría de los cultivos; sin embargo, el acuífero somero, del cual se extrae grandes volúmenes de agua para uso agrícola, presenta aguas tipos C_3S_1 y C_4S_1 , con contenidos altos y muy altos de sales, lo que restringe su uso a cultivos tolerantes a ellas.

Finalmente, es claro que la Red de Monitoreo de la Calidad del Agua del Sistema acuífero del valles San Luis Potosí operada por la CONAGUA arroja valores que coinciden con los reportados en investigaciones

similares, pero no reflejan las variaciones espaciales de la contaminación del sistema acuífero; por lo tanto, es conveniente determinar y operar una red de monitoreo constituida de norias y pozos que sea representativa de las condiciones hidrogeoquímicas actuales.

AGRADECIMIENTOS

A la Gerencia Estatal en San Luis Potosí y a la Gerencia de Calidad del Agua de la Comisión Nacional del Agua, México.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguillón R., Aranda-Gómez, J. y Solorio-Munguía, G. 1994. Geología y tectónica de un conjunto de domos riolíticos del Oligoceno medio en el sur del Estado de San Luis Potosí, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 11(1): 29-42.
- Alcalde, R. 2003. La Política Intergubernamental del servicio de agua potable en San Luis Potosí, S.L.P. 1989-2002. Tesis de Maestría en Administración y Políticas Públicas de El Colegio de San Luis, A.C. México. 347 Pp.
- Appelo, A. y Postma D. 2005. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema. Segunda Edición.
- Appelo, A. y Postma, D. 1996. *Geochemistry, groundwater and pollution*. Rotterdam, Netherlands, A.A. Balkema.
- Ayers, S. y Westcot, D. 1985. *Water quality for agriculture*. Food and Agriculture Organization. Roma, Italia.
- Bocanegra, M. 2006. Evaluación de Riesgo en Salud por la Exposición a Fluoruro, Arsénico en Agua de Pozo para Consumo de las Zonas Altiplano, Centro y Media del Estado de San Luis Potosí. San Luis Po-

- tosí, México. Tesis de Maestría. Programa Multidisciplinario de Posgrado en Ciencias Ambientales Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Cardona, A. 2007. Hidrogeoquímica de sistemas de flujo, regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y Contaminación. Tesis de doctorado. Posgrado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geofísica. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Carrillo-Rivera, J. y Armienta, A. 1990. Diferenciación de la contaminación inorgánica de las aguas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí, México. *Geofísica Internacional*, 28(4): 763-783.
- Carrillo, J. y Cardona, A. 2003. Entorno hidrogeológico de San Luis Potosí. En: Price, M. (Editor) *Agua Subterránea*. Limusa-Noriega Editores. México. pp. 274-319.
- CEPIS. 2004. Guías de la calidad del agua para consumo humano. 24/09/2010. <http://www.cepis.ops-oms.org/bvsacg/e/guiasoms3corr.pdf>. Tercera edición.
- Cirelli, C. 2004. Agua desechada, agua aprovechada. Cultivando en las márgenes de la ciudad. El Colegio de San Luis, A.C. S.L.P., México. 224 Pp.
- Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS). 2005. Estudio Técnico para la reglamentación de la explotación, uso y aprovechamiento de las aguas subterráneas y modificación de la veda del Acuífero San Luis Potosí, en el Estado de San Luis Potosí. México
- Cox, C. 2006. Tutorial de AQUACHEM 4.0. Hidrogeología. 30/04/2010.
- URL: http://mct.dgf.uchile.cl/AREAS/Hidro_MOD5/Tutorial%20AQUACHEM.pdf.
- Driscoll, G. 1986. *Groundwater and wells*. Johnson Filtration Systems Inc., St. Paul, Minnesota, Third Printing, 1089 pp.
- Espinosa García A., Aguilar Medina M. y Mazari-Hiriart M. 2010. Calidad, una limitante más para la disponibilidad del agua. En Alonso Aguilar Ibarra (coord.) *Calidad del agua: un enfoque multidisciplinario*. UNAM, Instituto de Investigaciones Económicas, México. 308 p. pp. 25-54.
- Freeze, R. y Cherry, J. 1979. *Groundwater*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.
- Guzmán-Colis G., Thalasso F., Ramírez-López M., Rodríguez-Narciso E., Guerrero-Barrera A. y Avelar-González F. 2011. Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el estado de Aguascalientes, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 27 (2) 89-102.
- Hafizan J., Sharifuddin M., Mohd K., Tengku H., Mohd A., Mohd E. y Mazlin M. 2011. Spatial water quality assessment of Langat River Basin (Malaysia) using environmetric techniques. *Environ. Monit. Assess.*, (173):625–641
- Hergt, T., Castro-Larragoitia, J., Cardona-Benavides, A. y Carrillo-Rivera, J. 2009. Análisis multivariado en la definición de sistemas de flujo de agua subterránea en San Luis Potosí, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, Vol. XXV, núm. 4, II Época, octubre-diciembre.
- Hülya B. y Hayal B. 2007. Surface Water Quality Assessment by Environmetric Methods. *Environ. Monit. Assess.*, (131): 371–376
- Jiménez, B. 2007. Información y Calidad del Agua en México. *Revista Trayectorias*. 9 (24): 45-56.
- Kankal N., Indurkar M., Gudadhe S. y Wate S. 2012. Water Quality Index of Surface Water Bodies of Gujarat, India. *Asian J. Exp. Sci.*, 26 (1): 39-48.
- Kehew, E.A. 2001. *Applied chemical hidrogeology*. N.J., Prentice Hall.
- Labarthe G. y Tristán M. 1978. Cartografía geológica hoja "San Luis Potosí". Folleto Técnico No.59. Instituto de Geología y Meteorología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 41 pp.
- Labarthe G., Tristan M. y Aranda J. 1982. Revisión estratigráfica del Cenozoico en la parte central del estado de San Luis Potosí. Folleto Técnico No. 85. Instituto de Geología y Meteorología. Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Labarthe G. y Jiménez-López L. 1992. Características físicas y estructura de lavas e ignimbritas riolíticas en la sierra de San Miguelito, S.L.P. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico.
- Lilo, J. 2007. *Técnicas Hidrogeoquímicas*. 22/03/2010. Universidad Rey de Juan Carlos. <http://www.escet.urjc.es/~jlillo/TecnicasHidrogeoquimicas.pdf>.
- Lloyd, W. y Heathcote, A. 1985. *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater*. Clarendon Press, New York.
- López, B. 2012. Cambios de uso de suelo y su impacto en el sistema acuífero del valle de San Luis Potosí, aplicando modelación numérica. Tesis de Doctorado. División de Geociencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica.
- Mohd S., Hafizan J., Sharifuddin M. y Nur H. 2011. Surface River Water Quality Interpretation Using Environmetric Techniques: Case Study at Perlis River Basin, Malaysia. *International Journal of Environmental Protection*, 1 (5): 1-8.
- Morán J. 2010. Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí. Tesis de Licenciatura. Universidad del Noroeste, Tamaulipas, México.
- Nieto-Samaniego, F., Macías-Romo, C. y Alaniz-Álvarez A. 1996. Nuevas edades isotópicas de la cubierta

- volcánica cenozoica de parte meridional de la Mesa Central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 13(1): 117-122
- Nieto-Samaniego, F. Alaniz-Álvarez, A. y Labarthe-Hernández, G. 1997. La deformación Cenozoica Poslaramídica en la parte meridional de la mesa central, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 14 (1): 13-25.
- Noyola-Medrano, M., Ramos-Leal, J., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez, L., López-Loera, H. y Carbajal, N. 2009. Factores que dan origen al minado de acuíferos en ambientes áridos: caso Valle de San Luis Potosí. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 26 (2): 395-410.
- NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. Publicada en el Diario Oficial de la Federación el 18 de Febrero de 1996. México. (Disponible en www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/127ssa14.html).
- Papaioannou A., Dovriki E., Rigas N., Plageras P., Rigas I., Kokkora M. y Papastergiou P. 2010. Assessment and Modelling of Groundwater Quality Data by Environmetric Methods in the Context of Public Health. *WaterResour. Manage.*, DOI 10.1007/s11269-010-9605-0
- Price, M. 2003. Agua subterránea. Limusa-Noriega Editores. México.
- Richards A. 1973. Diagnóstico y Rehabilitación de Suelos Salinos y Sódicos. Ed. Limusa. México.
- Romero, R. 2009. Calidad del agua. Editorial Escuela colombiana de Ingeniería.
- Sarabia I., Cisneros R., Aceves J., Durán H. y Castro J. 2011. Calidad del agua de riego en suelos agrícolas y cultivos del valle de San Luis Potosí, México. *Rev. Int. Contam. Ambie.* 27 (2) 103-113.
- Stretta, E.J.P. y Del Arenal, R., 1960. Estudio para el abastecimiento de agua potable para la Ciudad de San Luis Potosí. AppliedSciencesInstitute, HydrologySection, UNESCO-Instituto de Geofísica, UNAM. Reporte Interno, 40 p.
- Tristán-González, M. 1986. Estratigrafía y tectónica del graben de Villa de Reyes en los estados de San Luis Potosí y Guanajuato. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Instituto de Geología, Folleto Técnico.