

Este artículo puede ser usado únicamente para uso personal o académico. Cualquier otro uso requiere permiso del autor o editor.

El siguiente artículo fue publicado en *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1): 9-26 (2013); y lo puede consultar en <http://boletinsgm.igeolcu.unam.mx/bsgm/>



Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí

Briseida López-Álvarez^{1,2,*}, José Alfredo Ramos-Leal², Janete Moran-Ramírez², Antonio Cardona Benavides³, Guillermo Hernández García⁴

¹ Programa Agua y Sociedad. Colegio de San Luis, A. C. (COLSAN). Parque de Macul No. 155, Fracc. Colinas del Parque, San Luis Potosí, S.L.P. México, C.P. 78299.

² Geociencias Aplicadas. Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C. (IPICYT), C. Presa San José # 2055, Lomas 4^a. Sección, CP 78216, San Luis Potosí, SLP, México.

³ Área de Ciencias de la Tierra de la Facultad de ingeniería, Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

⁴ Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria, 04510 Coyoacán, México, D. F.

* blopez@colsan.edu.mx

Resumen

La historia de la ciudad San Luis Potosí se remonta al siglo XVI. Con el descubrimiento de yacimientos de oro y plata y la presencia de cuerpos de agua en el valle, fue fundada la ciudad San Luis Minas del Potosí, dando lugar a los dos primeros usos de suelo, urbano y minero. A partir del siglo XVII, el uso de suelo agrícola se desarrolló en huertos y fue relegado a la periferia de la zona urbana en el transcurso del tiempo. Finalmente el uso de suelo industrial surgió de manera importante en la segunda mitad del siglo XX. En la actualidad los tres usos de suelo existentes dentro del Valle de San Luis Potosí son el urbano, agrícola e industrial.

A través de una campaña de muestreo hidrogeoquímico en octubre de 2008, con 44 muestras de norias y 3 de manantiales dentro del valle, se evaluaron parámetros físico-químicos, cationes, aniones y elementos traza.

En los tres usos de suelo en la zona de estudio fueron detectados niveles importantes de nitratos, sulfatos, cloruros, conductividad eléctrica, coliformes totales y fecales; sin embargo, en la zona urbana existen anomalías puntuales de metales pesados principalmente de mercurio, bario, estroncio, cadmio, plomo, fósforo y plata, relacionadas a las antiguas actividades mineras y a la industria activa en la zona. Mientras que en la zona agrícola, la presencia de metales está asociada a los canales a cielo abierto que también reciben agua del Tanque Tenorio y éste a su vez de la zona industrial. En la zona industrial se detectaron grandes anomalías de tipo puntual en casi todos los metales pesados analizados; la principal fuente de estos contaminantes corresponden a un terreno industrial activo.

Este trabajo está enfocado a evaluar el impacto que ha generado la actividad antropogénica sobre el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí desde inicios de la fundación de la ciudad hasta la actualidad, utilizando la calidad del agua como herramienta de análisis.

Palabras clave: Cambio de uso de suelo, calidad del agua, acuífero colgado, actividad minera, contaminación.

Abstract

The history of San Luis Potosi City dates back to the sixteenth century. With the discovery of gold and silver deposits and the presence of water bodies in the valley, the city of San Luis Minas Potosí was founded, leading to the first two uses of land: urban and mining. From the seventeenth century, agricultural land developed in orchards and, over time, was relegated to the periphery of the urban area. Finally, industrial land use emerged significantly in the second half of the twentieth century. Currently the three existing land uses within the Valley of San Luis Potosí are urban, agricultural and industrial.

Through a hydrogeochemical sampling campaign in October 2008 with 44 samples from wells and 3 from springs within the valley, we assessed physical and chemical parameters, cations, anions and trace elements.

In the three land uses within the study area, we detected significant levels of nitrates, sulphates, chlorides, electrical conductivity, total and fecal coliforms; but in urban areas there are punctual anomalies of heavy metals, mainly mercury, barium, strontium, cadmium, lead, phosphorus and silver related to former mining and active industry in the area. However, in the agricultural zone, the presence of metals is associated with open channels, which also receive water from the Tanque Tenorio and this in turn from the industrial area. In the industrial area, punctual anomalies were detected in almost all heavy analyzed metals; the main source of these pollutants corresponds to an active industrial area.

This work aims to evaluate the impact of anthropogenic activity in the perched aquifer of the Valley of San Luis Potosí since the city's foundation to the present, using water quality as an analytical tool.

Keywords: Change of land use, water quality, perched aquifer, mining, pollution.

1. Introducción

La composición química de agua subterránea puede ser controlada por factores naturales o antropogénicos. Los naturales son el clima, su interacción con el medio geológico por el cual circula y el tiempo de residencia. Los antropogénicos están directamente relacionados con fuentes potenciales de contaminación asociadas a actividades humanas.

Desde el siglo XVIII, pero más intensamente en los últimos 50 años, los seres humanos han transformado los ecosistemas del mundo más rápido y extensamente que en ningún otro periodo comparable de la historia. Ahora se reconoce que, aún cuando los cambios de uso de suelo ocurren a nivel local, pueden tener consecuencias globales en el ciclo hidrogeológico, debido a que se ha demostrado que la cantidad y calidad del agua dependen en gran parte del uso que se da al suelo en las áreas que captan, conducen, almacenan, proveen y renuevan el recurso hídrico (SEMARNAT, 2005). Sin embargo, como consecuencia del crecimiento poblacional y el desarrollo económico, se generan presiones que conducen a cambios en el uso del suelo de las cuencas (SEMARNAT, 2005).

Diversas investigaciones han sido realizadas en varias partes del mundo orientadas a establecer la relación entre los usos de suelo y sus afectaciones en el agua subterránea (Schmidt y Sherman, 1987; Dummer y Straaten, 1988; Charbonneau y Kondolf, 1993; Cox *et al.*, 1996; Barber *et al.*, 1996; Tong y Chen, 2002; Liu *et al.*, 2005 y Naik *et al.*, 2008).

Un ejemplo de las alteraciones a un sistema natural propiciadas por actividades antropogénicas es el Valle de San Luis Potosí (VSLP) (Figura 1), en donde los usos de suelo han constituido un factor de alto impacto en el volumen y calidad del sistema acuífero. Aunada a esta situación, los cambios de uso de suelo, desde los primeros asentamientos humanos en el valle, han propiciado un efecto de contaminación cruzada que vuelve más complejo el problema de contaminación en el agua subterránea.

La historia del Valle de San Luis Potosí (VSLP) se remonta al siglo XVI, en la región conocida como la Gran Chichimeca, que era diversa tanto en grupos étnicos

nómadas como en su clima, flora y fauna, geografía y relieve (Galván-Arellano, 1999). El agua estaba concentrada en algunos puntos y de las serranías bajaban arroyos naturales que temporalmente llevaban agua (Galván-Arellano, 1999). Una muestra de este escenario era la subregión conocida como el Gran Tunal (hoy VSLP). Con el proceso de pacificación y colonización de los nativos, el descubrimiento de recursos mineros (yacimientos de oro y plata) en el llamado Cerro de San Pedro Potosí y la presencia de cuerpos de agua en el valle, fue fundada la ciudad, entonces nombrada, San Luis Minas del Potosí (actual ciudad de San Luis Potosí), el 3 de Noviembre de 1592. La minería fue el principal detonador del crecimiento y desarrollo de la nueva población, y además la causa de grandes modificaciones del entorno. Por ejemplo, una gran deforestación de las serranías próximas debido a la explotación de leña como combustible para atender la demanda de la minería y de la población. La agricultura fue la segunda actividad económica que más adelante representaría un factor de impacto importante en la calidad del agua, no sólo superficial sino subterránea, dicha actividad se desarrollaba dentro de la zona urbana en huertos a partir del siglo XVII (Figura 2). La tercera actividad económica fue la industrial, que surgió de manera importante en la segunda mitad del siglo XX.

Con la urbanización se generaron alteraciones al sistema hidrológico, una muestra de ello fueron las grandes inundaciones que se registraron desde los primeros años de la fundación de la ciudad de San Luis las Minas Potosí, lo que propició la construcción de una obra de desvío llamada "la corriente", en 1688. Ésta desalojaba a las aguas que bajaban de la Sierra de San Miguelito (SSM) e inundaban a la ciudad. Una segunda obra de desvío fue realizada en 1771. Ambas obras funcionaron hasta 1946 (De la Rosa-Charcas y Llanas-Rivera, 2000).

Desde sus inicios, la ciudad de San Luis Potosí (SLP) se abastecía de fuentes de agua superficiales: pequeños manantiales, ríos, arroyos, incluso de charcos que se formaban en temporadas de lluvia, teniendo un ecosistema aún en equilibrio. Al agotarse las fuentes de abastecimiento inmediatas en el valle, fueron necesarias obras hidráulicas para dar abasto a la ciudad en constante crecimiento, como el acueducto, las "conservas" (cajas de agua) y la presa

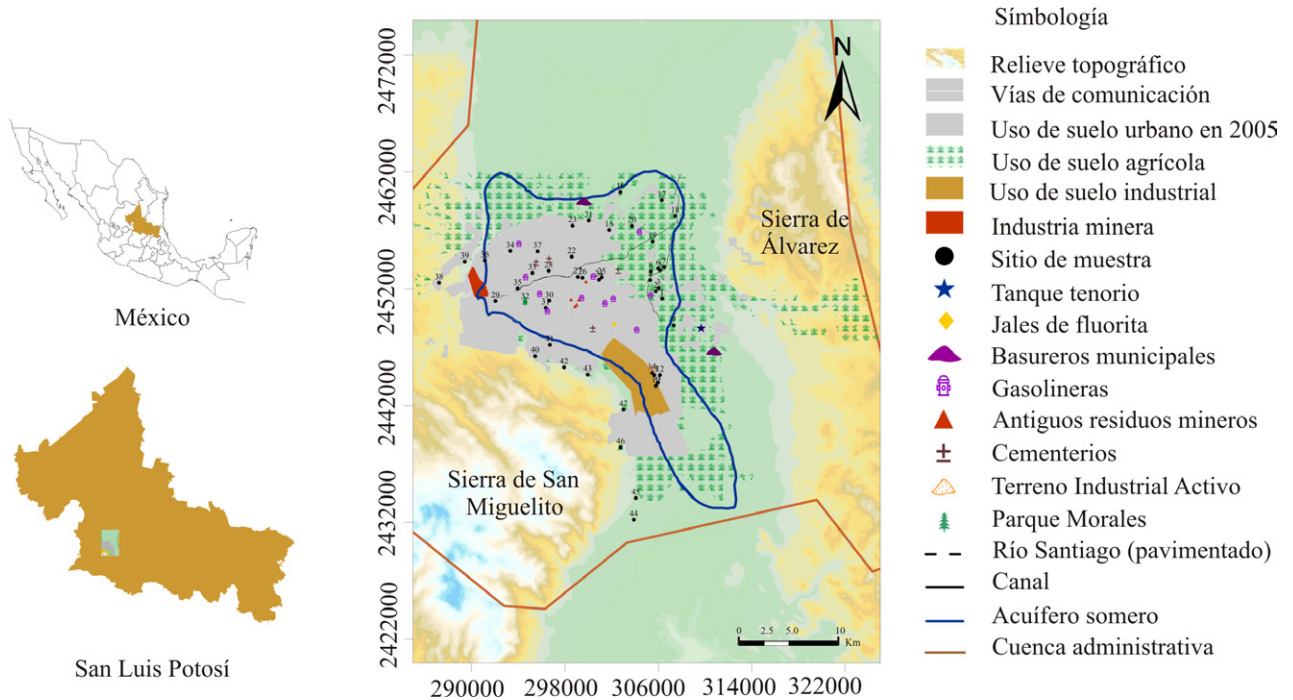


Figura 1. Localización del área de estudio, fuentes potenciales de contaminación y usos de suelo,

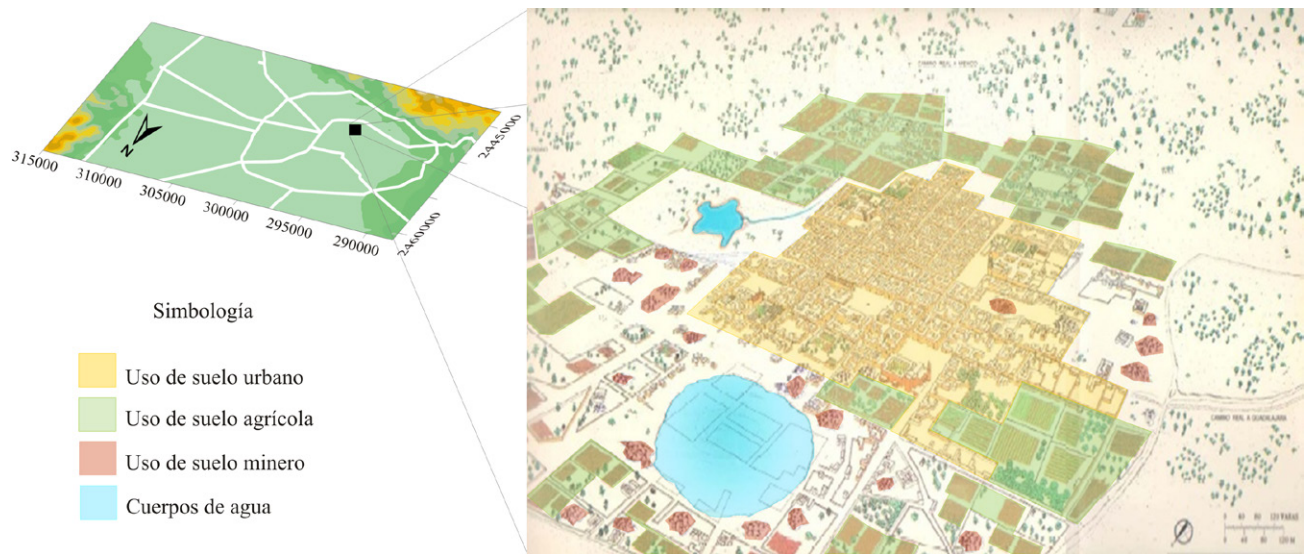


Figura 2. Primeros usos de suelo en la ciudad de San Luis Potosí en el siglo VXII.

San José.

El acueducto fue construido en 1831 llevando agua de la SSM a “las conservas”, obras construidas en 1835 destinadas a almacenar agua, sirviendo para el abastecimiento público y funcionaron hasta la primera mitad del siglo XX. La presa San José comenzó a funcionar en 1903 y en la actualidad es la principal fuente de abasto de agua superficial para la zona conurbada del VSLP, aprovechando las afluentes del Río Santiago.

En el siglo XIX, se dio inicio al uso activo de agua subterránea como fuente de abastecimiento. Desde inicios

de éste siglo las norias daban servicio a la población para uso doméstico e irrigación de pequeños huertos (Sheridan-Prieto, 2001).

Hasta mediados del siglo pasado los cambios sufridos en el VSLP habían sido relativamente paulatinos. Sin embargo, a cuatro siglos de la fundación de la ciudad de SLP se han experimentado cambios muy drásticos en los usos de suelo que a su vez han tenido un gran impacto en el sistema hidrológico en los últimos 50 años.

La zona conurbada del VSLP formada por los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez (SGS),

incrementó 15 veces su tamaño de 1959 a 2005 (Figura 3), registrándose el cambio de superficie urbana más importante entre 1970 y 1993 al cuadruplicarse (Noyola *et al.*, 2009). En cuanto a la población de estos dos municipios, para el año 2000 equivalían al 38% de la población total de estado. Con base en el último censo poblacional (INEGI, 2010), representan 40% de la población total estatal.

Este trabajo está enfocado a evaluar el impacto que ha generado la actividad antropogénica sobre el acuífero colgado del VSLP desde inicios de la fundación de la ciudad hasta la actualidad, utilizando la calidad del agua como

herramienta de análisis.

2. Descripción del área de estudio

2.1. Localización

El VSLP se encuentra limitado orográficamente al Norte por un conjunto de cerros llamados “Alto La Melada”, al Occidente y Sur por la SSM y al Oriente por la Sierra de Álvarez (Figura 1).

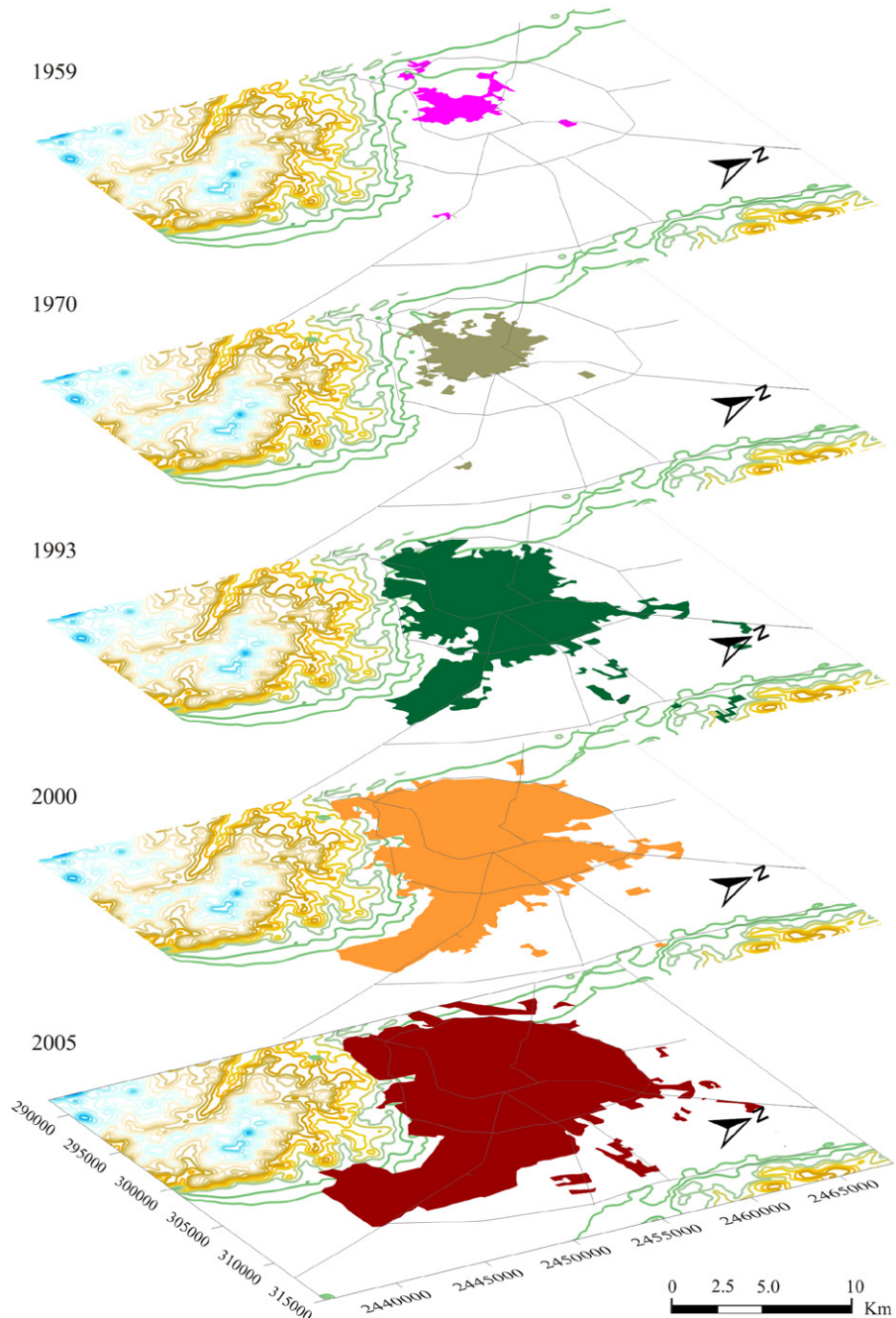


Figura 3. Crecimiento de la mancha urbana de 1959 a 2005, a partir de imágenes de satélite.

El sistema acuífero del VSLP forma parte de la cuenca hidrológica No. 37 denominada “El Salado” con coordenadas geográficas 21°54’54” a 22°28’15” de latitud Norte y 101°13’44” a 100°37’08”, en la porción Sur-Occidental del estado que lleva el mismo nombre.

Inmersa en el centro de esta cuenca hidrológica se encuentra la zona conurbada de los municipios de SLP y SGS que, en conjunto con los municipios de Mexquitic de Carmona, Cerro de San Pedro y Zaragoza, reúnen una población total de 1122502 (INEGI, 2010), y dependen del suministro del agua subterránea en un 95% para sus distintos usos (COTAS y CONAGUA, 2005).

La zona de estudio tiene un clima templado con verano cálido semiárido. La precipitación media anual es de 402.6 mm y una temperatura media anual de 17.5 °C. La evaporación potencial media anual es de 2038.7 mm.

2.2. Marco Hidrogeológico

En esta zona se ha identificado la presencia de dos acuíferos denominados tradicionalmente como somero (granular) y profundo (volcánico fracturado) (Cardona-Benavides, 1990; Carrillo-Rivera *et al.*, 1992; Carrillo-Rivera *et al.*, 1996) separados por un estrato de arena fina compacta de baja conductividad hidráulica. Como parte del acuífero granular se encuentra un acuífero de tipo colgado, siendo éste quien recibe directamente los efectos de la actividad humana.

2.2.1. Acuífero colgado

El acuífero colgado es muy superficial, tiene una profundidad de apenas 40 metros aproximadamente (COTAS y CONAGUA, 2005) y presenta una extensión limitada (en la zona urbana). Es un estrato de baja conductividad hidráulica, se recarga a partir de la precipitación en el valle y su comportamiento es muy dinámico. Tiene recarga inducida de tipo difusa (ocasionalmente por la fuga de agua potable y drenaje) y por retornos de riego.

Los flujos por retorno de riego son responsables del deterioro de la calidad del agua subterránea en un gran número de países, en particular en regiones semiáridas y áridas (UNESCO, 2004).

Debido a la poca profundidad a la que se encuentra, y que gran parte de los cultivos se irrigan con aguas negras municipales sin tratamiento, se ha detectado la presencia de contaminación en el agua subterránea por metales, contaminantes orgánicos, inorgánicos y bacteriológicos (Carrillo-Rivera y Armienta, 1989; Carrillo-Rivera *et al.*, 2008; Moran-Ramírez, 2010; IPICYT, 2010).

El material que compone este acuífero tiene variaciones texturales, de tal manera que hacia la SSM predominan conglomerados inmersos en un matriz areno arcillosa y hacia el noreste del valle este material se adelgaza y predominan limos y arenas.

La dirección de flujo del acuífero colgado va de Suroeste a Noreste. Su recarga depende de las condiciones

como la precipitación evapotranspiración, escurrimiento, vegetación, presencia de capa de suelo, pendiente del terreno y permeabilidad de las rocas. La principal recarga en el acuífero se efectúa en el flanco oriente del VSLP, así como al norte de la SSM hacia el Valle de Escalerillas (Ramos-Leal *et al.*, 2007). Hacia la localidad de La Palma, se ubica el límite del acuífero colgado, en esta región el material granular se acuña y su contacto con el material volcánico fracturado es más próximo, por lo cual el flujo de éste puede tener comunicación hidráulica con el acuífero del medio granular.

2.2.2. Acuífero granular

El acuífero somero o granular que rellenó las fosas tectónicas ha sido el más explotado. Las estructuras geológicas, como las fallas, controlan la distribución y espesor de esta unidad acuífera; está compuesto principalmente por materiales clásticos del Cuaternario. El acuífero es actualmente explotado por pozos que alcanzan profundidades de hasta 350 metros de material sedimentario. Su límite superior se encuentra aproximadamente de 100 a 150 metros de profundidad. Está confinado en el centro del valle por una capa sedimentaria poco permeable. Su espesor va de 100 a 200 metros (IPICYT, 2007).

2.2.3. Acuífero profundo

El acuífero profundo, formado por roca volcánica fracturada, tiene una distribución irregular debido a un sistema de fosas y pilares en el valle. Lo limita por un lado la SSM, la cual, aunque está formada por este mismo material, en la sierra las fracturas han sido selladas por actividad hidrotermal, dando condiciones de baja permeabilidad. Por el otro lado lo limita la SA, cuyo origen es roca caliza de muy baja permeabilidad. Ambas fronteras tienen capacidad reducida para transmitir y almacenar agua por lo que restringen la recarga lateral.

Las unidades geológicas que constituyen el acuífero profundo tienen una distribución espacial más extensa que los límites de la cuenca superficial. Es de tipo confinado en la mayor parte de la porción plana del VSLP. La profundidad a la superficie potenciométrica es mayor a 150 m, dependiendo de la ubicación dentro la planicie. La mayoría de los pozos perforados en este acuífero, tienen profundidades del orden de 350-450 m; aunque existen algunos de 800-1000 metros. Algunos pozos pueden atravesar 100-300 m de tobas e ignimbritas interestratificadas con el relleno granular, o alcanzar las rocas volcánicas que subyacen el relleno de la fosa tectónica.

3. Metodología

La campaña de muestreo hidrogeoquímico se realizó en octubre de 2008 con 47 muestras dentro del VSLP, 3 de ellas corresponden a manantiales y el resto a norias. El muestreo se realizó en el acuífero colgado a una profundidad

promedio de 8.6 m, teniendo un mínimo de 0.3 m y un máximo de 28 m.

Los parámetros físico-químicos como temperatura, pH, alcalinidad, conductividad eléctrica, sólidos totales disueltos y potencial redox fueron medidos en el sitio de muestreo. Las muestras tomadas para cationes y elementos traza se acidificaron con HNO₃ concentrado para llevarlo a un pH < 2. A las muestras para aniones no se les realizó este procedimiento. La preservación del total de las muestras se dio a una temperatura menor a 4 °C.

Los iones mayores y elementos traza fueron enviados a laboratorio de Geociencias de la Universidad Nacional Autónoma de México, los cuales fueron determinados por

ICPOES, los aniones (sulfatos y cloruros) por colorimetría en el IPICYT y la alcalinidad por titulación en campo. El balance iónico de los datos químicos tuvo un error menor al 10%. Los datos de nitratos (NO₃⁻¹), sulfatos (SO₄⁻²), cloruros (Cl⁻), conductividad eléctrica (CE), grasas y aceites (GA), coliformes totales (CT), fluoruros (F⁻), arsénico (As), estroncio (Sr), bario (Ba), hierro (Fe), níquel (Ni), aluminio (Al), cobre (Cu), mercurio (Hg), plata (Ag), plomo (Pb), manganeso (Mn), zinc (Zn), cromo (Cr), boro (B), cobalto (Co), cadmio (Cd), rubidio (Rb) y litio (Li) del agua subterránea fueron usados en diagramas distribución espacial para evaluar su comportamiento en el VSLP (Tabla 1).

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos medidos en el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí.

Punto	X	Y	pH	Eh (mV)	Na (ppm)	K (ppm)	Ca (ppm)	Mg (ppm)	NO ₃ (ppm)	SO ₄ (ppm)	HCO ₃ (ppm)	Cl (ppm)	CE (µS/cm)	CT (UFC)	GA (ppm)	F (ppb)	Hg (ppb)	Ba (ppb)
1	306326	2451142	6.7	63	89	40.2	215	25.2	25	276	270	126	126000	13.08	42.93	0.4	1.28	52.16
2	305775	2451778	6.5	56	64	39.4	217	26.9	37	190	279	132	132000	20.61	17.07	0.66	0.62	144.18
3	306017	2452049	6.7	226	58	40.9	207	24.2	2	40	510	114.4	114400	9.17	59.58	0.54	0.27	236.61
4	305308	2452724	6.3	62	102	35.2	299	29.2	8	120	474	212.8	212800	2.72	87.75	0.58	1.04	109.72
5	306154	2453563	6.5	0.68	81	31.7	247	19.3	7	60	435	131.2	131200	11.99	10.05	0.64	1.18	178.04
6	305982	2453724	6.5	53	83	27.4	177	15.2	10	56	405	94.05	94050	2.23	4.92	0.24	1.61	208.62
7	306481	2453867	7.1	98	140	21	136	6.2	5	52	315	134	134000	6.53	83.38	0.1	0.41	75.26
8	305348	2453467	6.6	134	78	37.1	209	25.5	7	145	276	134.4	134400	4.49	166.18	0.07	0.83	68.25
9	307305	2448872	6.9	0.58	126	22.6	89	6.2	4	52	345	73.2	73200	33.96	89.95	0.87	0.42	15.49
10	305791	2443680	6.2	130	115	17.4	66	8	9	115	186	46.4	46400	2.42	285.65	0.83	0.52	82.14
11	305957	2443942	6.1	138	191	37.1	153	17.5	24	240	225	160	160000	3.56	406.81	0.6	0.33	69.59
12	306134	2444605	6.8	100	38	17.4	110	10.7	6	80	111	78	78000	10.81	3.98	0.6	0.38	52.39
13	305642	2444615	6.7	5.17	81	28.7	91	11.8	8	140	135	72	72000	3.36	46.39	0.66	0.34	114.8
14	305450	2444826	5.7	177	237	83.3	405	59.8	54	250	36	152.8	152800	3.96	13.72	1	0.14	73.93
15	301791	2457014	6.4	100	122	32.7	197	28.9	58	116	255	130	130000	3.24	53.4	0.1	1.17	147.12
16	302758	2460264	6.2	148	24	22.8	90	9.4	6	60	210	38	38000	1.67	70.05	0.17	0.56	167.09
17	306303	2459562	6.2	212	38	26.4	89	8.6	23	92	120	44	44000	1.39	202.51	0.08	0.93	81.47
18	307442	2458220	6.5	191	61	29.8	135	15.9	27	56	330	77.6	77600	5.29	94.35	0.1	0.43	161.01
19	305507	2456042	6.1	156	45	29.9	189	18.6	16	196	225	100	100000	1.77	74.55	0.19	1.4	60.96
20	303754	2457371	6.4	161	53	31.8	255	24.2	52	84	300	196	196000	13.79	68.8	0.01	1.57	122.21
21	300041	2457828	6.4	147	61	22	175	15.3	23	76	330	104	104000	24.03	207.75	0.11	0.75	275.74
22	298584	2454733	6.4	158	81	46.6	134	21.8	24	96	285	91	91000	16.71	1.36	0.67	0.49	48.9
23	298654	2457394	6.6	326	43	38.3	165	16	6	14	450	70	70000	2.63	416.23	0.5	0.4	297.31
24	300910	2452763	6.8	259	95	22.3	75	8.2	12	46	225	64	64000	1.75	5.24	0.63	0.36	53.85
25	301150	2452968	6.7	241	174	40.2	130	18.8	32	114	360	120	120000	2.49	5.03	0.35	0.51	50.46
26	299511	2452943	6.8	342	200	91	210	29.8	45	196	411	164	164000	20.49	80.73	0.52	0.37	116.53
27	299108	2453004	6.4	328	165	70.9	205	28.8	34	204	381	218	218000	3.78	22.72	0.44	0.44	62.4
28	296606	2453527	6.7	334	64	85.8	167	19.4	14	200	345	65	65000	4.91	30.26	0.61	0.52	92.09
29	292058	2450938	7.3	44	81	39.7	175	33.8	12	194	513	52	52000	25.88	78.74	0.35	<0.1	136.63
30	296662	2450956	6.4	324	58	54.6	92	11.3	22	50	243	76	76000	2.16	88.59	0.4	0.27	88.89
31	296359	2450370	6.5	3.15	116	64.1	144	18.8	34	108	291	117.6	117600	80.95	7.33	0.29	2.27	114.4
32	294603	2450837	6.4	346	79	48.3	142	22.9	10	138	300	89.6	89600	26.24	8.9	0.32	0.89	115
33	295218	2453336	6.8	275	75	64.8	73	8.6	13	44	270	67.2	67200	18.48	4.4	0.57	0.57	72.86
34	293326	2455218	6.5	283	68	15.4	68	5.6	10	56	210	54	54000	1.68	10.37	0.3	0.43	72.46
35	293959	2452014	6.6	28.6	66	46	71	13.1	31	94	240	52	52000	1.96	70.68	0.48	1.68	76.4
36	291145	2454412	6.1	290	36	25.4	54	12.2	18	110	120	18.4	18400	16.67	3.77	0.38	0.75	96.03
37	295658	2455196	6.8	134	153	30.7	57	8.1	12	126	270	64	64000	27.85	423.98	0.52	0.96	37.44
38	287239	2452508	6.1	296	39	45.5	76	15	10	176	120	43.2	43200	24.32	2.83	0.33	0.85	87.62
39	289442	2454311	6.2	297	88	35.4	90	11.8	26	146	138	104	104000	12.15	135.18	0.35	1.14	56.04
40	295454	2446242	5.1	344	34	10.9	14	2.7	9	88	30	10.4	10400	6.52	57.17	0.01	0.47	33
41	296709	2447189	6.1	293	36	25.8	55	11.5	13	144	120	21.6	21600	8.12	13.93	0.19	0.7	88.35
42	297933	2445273	6	299	39	29.1	85	24.1	6	212	102	28.8	28800	12.86	2.51	0.17	0.23	50.85
43	299953	2444649	5.5	265	19	10.8	21	3.9	4	52	40	10.8	10800	11.54	40.84	0.03	0.47	73.46
44	303907	2432230	6.3	45	21	5.9	9	1.2	9	20	40	8.4	8400	7.09	109.63	0.01	0.13	7.99
45	304071	2434080	6.6	73	51	31	57	12.5	30	90	60	72.8	72800	12.13	29.21	0.2	0.29	111.12
46	302770	2438427	5.9	115	21	15.8	20	2.9	4	48	60	10.4	10400	13.79	60.1	0.01	0.39	40.58
47	303005	2441654	5.7	140	29	18.4	26	4.4	15	60	40	16.4	16400	10.9	165.45	0.01	0.69	80.67

Tabla 1. Parámetros fisicoquímicos medidos en el acuífero colgado del Valle de San Luis Potosí (continuación).

Punto	X	Y	Sr (ppb)	Cd (ppb)	Pb (ppb)	Ag (ppb)	Rb (ppb)	Co (ppb)	Cu (ppb)	Fe (ppb)	As (ppb)	Li (ppb)	Ni (ppb)	Mn (ppb)	Cr (ppb)	Zn (ppb)	Al (ppb)
1	306326	2E+06	1126.66	0.82	2.64	0.13	106.63	0.16	0.24	33.37	12.6	6.53	7.55	1.16	0.59	3.34	<0.1
2	305775	2E+06	1419.26	0.55	2.86	<0.1	98.75	0.25	2.73	39.23	20.21	4.18	4.2	2.81	0.5	11.81	0.96
3	306017	2E+06	1241.37	0.29	0.54	<0.1	109.02	0.37	<0.1	52.86	10.45	5.18	3.42	800.54	0.39	2.84	<0.1
4	305308	2E+06	1576.74	2.51	1.91	0.19	104.13	0.36	0.25	46.06	10.25	4.59	5.07	0.99	0.55	18.71	2.46
5	306154	2E+06	1111.1	0.22	1.2	3.07	85.48	0.26	1.14	29.6	10.41	3.89	3.02	26.3	0.29	4.42	<0.1
6	305982	2E+06	904.44	0.35	0.47	1.74	79.45	0.19	<0.1	22.12	7.77	3.88	2.47	2.68	0.4	2.71	<0.1
7	306481	2E+06	391.95	0.13	0.72	<0.1	37.08	0.47	0.72	21.16	7.5	10.5	2.08	0.68	0.19	3.93	<0.1
8	305348	2E+06	1403.7	0.59	1	<0.1	103.93	0.36	1	29.97	8.04	5.48	3.4	43.97	0.35	29.73	<0.1
9	307305	2E+06	161.27	5.86	21.86	<0.1	41.52	0.43	62.67	77.12	9.84	90.36	15.45	179.61	1.23	301.9	27.97
10	305791	2E+06	314.76	0.87	3.13	<0.1	59.43	0.36	4.33	36.47	11.87	9.13	12.08	7.53	0.6	19.51	54.53
11	305957	2E+06	614.66	0.27	0.51	<0.1	105.05	4.84	0.1	25.43	9.89	14.88	5.95	3.78	0.41	4.26	<0.1
12	306134	2E+06	429.47	0.43	2.18	<0.1	43.91	0.27	1.78	31.25	63.72	6.18	2.86	86.65	0.14	35.95	3.19
13	305642	2E+06	449.4	1.88	1.69	<0.1	81.98	0.52	0.74	20.55	4.78	4.44	24.7	2.43	161.91	14.43	8.38
14	305450	2E+06	1010.01	3.97	8.03	<0.1	139.15	1.52	<0.1	<0.1	13.71	19.98	517.82	1529.97	2.97	10.61	3456.4
15	301791	2E+06	983.76	1.34	2.38	0.24	99.25	0.27	0.35	95.08	4.54	5.16	3.92	2.59	0.29	24.33	3.28
16	302758	2E+06	451.25	1.45	0.79	<0.1	66.5	<0.1	<0.1	21.26	4.32	3.99	1.29	1.18	0.37	2.32	<0.1
17	306303	2E+06	492.27	2.71	2.85	0.44	71.18	0.1	0.55	24.66	7.57	4.31	1.61	1.19	0.49	8.5	7.3
18	307442	2E+06	834.45	0.25	0.96	0.28	71.43	0.2	0.68	26.33	7.85	5.75	2.61	4.33	0.23	5.22	2.09
19	305507	2E+06	978.9	0.44	0.77	<0.1	83.95	0.15	<0.1	21.5	5.55	4.74	2.31	1.8	0.12	2.99	<0.1
20	303754	2E+06	1167.49	1.04	2.09	1.43	98.86	0.47	1.33	29.77	7.09	3.08	4.38	1.49	0.57	187.66	<0.1
21	300041	2E+06	975.01	0.21	0.49	0.1	64.24	0.28	0.29	26.45	5.05	4.25	3.41	3.31	0.14	3.25	<0.1
22	298584	2E+06	660.54	0.84	1.45	<0.1	165.76	0.21	0.86	26.5	5.25	5.47	2.22	0.99	0.29	8.05	55.89
23	298654	2E+06	1140.27	0.23	0.6	<0.1	72.52	0.63	<0.1	29.8	13.44	4.31	4.25	21.03	0.2	5.15	34.1
24	300910	2E+06	370.37	0.21	0.77	<0.1	59.8	0.1	221.8	19.56	11.62	3.6	1.68	0.6	0.33	8.67	6.13
25	301150	2E+06	768.64	0.31	0.44	0.1	95.05	0.17	<0.1	18.35	5.6	4.43	1.95	0.89	0.18	2.25	<0.1
26	299511	2E+06	1293.86	3.22	3.01	<0.1	288.11	2.9	2.47	40.57	48.93	30.95	9.46	970.38	1.4	15.43	8.36
27	299108	2E+06	1164.57	0.27	0.51	<0.1	185.67	0.3	<0.1	24.55	64.09	6.19	2.69	9.84	22.53	1.09	<0.1
28	296606	2E+06	856.9	0.96	1.1	<0.1	203.81	0.21	<0.1	25.91	40.07	5.36	2.81	2.13	0.31	4.61	<0.1
29	292058	2E+06	1165.54	0.27	1.25	<0.1	101.96	0.27	<0.1	29.93	10.86	6.91	4.24	1859.66	0.63	2.51	3.53
30	296662	2E+06	443.47	3.84	1.38	0.3	148.98	2.52	0.05	32.64	44.64	3.41	3.7	1.48	0.45	3.9	14.37
31	296359	2E+06	792.35	3.13	0.78	0.62	167.29	0.23	1.45	27	11.04	7.87	2.44	1.13	0.49	4.88	<0.1
32	294603	2E+06	723.14	0.9	1.48	<0.1	167.48	0.32	0.49	26.61	2.4	2.32	3.11	9.97	0.16	4.55	<0.1
33	295218	2E+06	447.55	1.72	0.49	0.81	105.22	0.22	<0.1	24.3	22.46	5.42	2.34	0.59	6.52	7.33	<0.1
34	293326	2E+06	317.58	0.81	1.64	0.17	42.45	0.09	2.58	33.36	10.45	5.07	1.27	1.12	0.35	15.44	1.25
35	293959	2E+06	498.68	2.44	0.96	1.13	91.99	0.11	<0.1	24.48	9.34	2.53	1.3	0.62	0.97	4.54	0.63
36	291145	2E+06	327.5	0.27	0.4	0.34	78.22	<0.1	<0.1	21.66	2.51	10.59	1	0.91	0.1	10.29	<0.1
37	295658	2E+06	383.78	0.47	1.26	0.13	64.42	0.1	0.25	119.87	17.92	4.9	1.53	20.7	0.2	3	3.28
38	287239	2E+06	405.36	0.32	1.17	0.23	90.12	<0.1	0.29	20.78	74.1	3.21	1.35	4.33	0.16	34.91	1.12
39	289442	2E+06	431.42	1.34	1.79	0.83	71.98	0.23	0.71	22.72	18.89	5.14	1.94	0.87	0.24	10.1	10.37
40	295454	2E+06	78.61	0.46	1.6	0.43	24.36	0.13	0.17	15.29	12.29	9.33	1.22	5.93	<0.1	4.18	9.18
41	296709	2E+06	294.54	0.56	1.15	<0.1	54.49	0.14	3.85	46.07	6.83	4.36	1.63	24.04	0.13	4.38	<0.1
42	297933	2E+06	508.21	1.63	0.69	<0.1	61.2	0.11	<0.1	13.39	5.71	11.67	2.07	16.68	0.2	5.77	<0.1
43	299953	2E+06	133.86	0.27	0.48	<0.1	23.99	0.1	<0.1	17.27	4.29	7.81	1.04	5.97	<0.1	3.13	<0.1
44	303907	2E+06	30.71	0.56	2.4	<0.1	32.23	<0.1	0.83	25.15	11.95	6.7	0.5	4.45	0.33	5.69	13.75
45	304071	2E+06	303.97	1.98	27.9	<0.1	47.46	0.14	10.85	13.1	12.91	8.55	2.19	4.39	0.36	38.17	18.22
46	302770	2E+06	94.77	2.34	6.65	0.11	31.01	0.1	3.05	143.3	9.53	10.16	1.46	4.05	0.53	15.2	540.97
47	303005	2E+06	139.5	0.86	5.62	0.29	33.08	0.11	2.6	73.33	5.45	9.45	1.47	3.62	0.36	11.28	218.47

canales abiertos.

Aunque la extracción de minerales se desarrollaba en el Cerro de San Pedro, el procesamiento de los minerales se llevaba a cabo en patios de beneficio en el centro de la actual ciudad de SLP (Figura 2), debido a que allí era donde existían los pequeños manantiales y corrientes como la del Río de Santiago. Los residuos que se generaban de esta actividad eran depositados en patios de beneficio dentro de la zona urbana sin algún tipo de manejo apropiado (Figura 2), generando la lixiviación de los residuos mineros (Keiser-Schlittler, 1992; Galván-Arellano, 1999; IMPLAN, 2009). La ciudad en constante crecimiento desplazó esta actividad

4. Resultados y Discusión

4.1. Evolución del uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí

Como consecuencia de los primeros asentamientos humanos en el valle a mediados del siglo XVI, se da inicio a los dos primeros usos de suelo (urbano y minero) en el actual VSLP. El uso de suelo urbano generó agua residuales domésticas que eran vertidas en corrientes naturales y

hacia la periferia, sin embargo, sus residuos quedaron en un principio abandonados, luego sepultados y/o distribuidos en la ciudad para ser ocupados principalmente como relleno de calles.

La agricultura desarrollada de manera importante en el siglo XVII, a través de pequeños huertos familiares (Figura 2), en sus inicios no representó un agente de alto impacto, sin embargo, se convirtió en un factor de alteración cuando comenzó a recibir las aguas residuales que generaba la ciudad. Un caso muy particular es el sitio conocido como Tanque Tenorio (ubicado al oriente de la ciudad) que originalmente era una depresión natural donde se formaba un cuerpo de agua intermitente. Desde los años setenta del siglo pasado se comenzó a usar para descargar aguas residuales industriales, y en menor medida domésticas, en forma continua (Medellín-Milán, 2003). Estas aguas han sido aprovechadas desde entonces para riego en la zona agrícola y por su origen impactan al acuífero colgado (Moran-Ramírez, 2010; IPICYT, 2010).

La industria surgió de manera importante en la segunda mitad del siglo XX, junto con éste, el crecimiento de la superficie urbana multiplicó su superficie rápidamente de 1760 hectáreas en 1960 a 14 mil hectáreas en el año 2000 (Figura 3), otro evento fue el auge de la diversificación e intensificación industrial (SEMARNAT, 2008).

La consecuencia inmediata del crecimiento industrial fue la instauración de nuevas áreas de vivienda para aquellas familias que llegaron a la ciudad en busca de fuentes de empleo. La mancha urbana se extendió principalmente sobre terrenos yermos y comenzó un desplazamiento importante de los cultivos periurbanos (Figura 3), generando aguas residuales domésticas que son utilizadas en la zona agrícola. En tanto que la industria genera aguas residuales industriales sin tratamiento y utilizadas en la agricultura.

El cambio de uso de suelo significó modificaciones al sistema acuífero en cantidad y calidad. De tal manera que la actividad agrícola demanda volúmenes de agua de forma cíclica, mientras que los nuevos usos del suelo (industrial, habitacional y comercial) demanda un volumen constante y abasto permanente (SEMARNAT, 2008).

Un indicador del impacto del cambio de uso de suelo es el origen del agua para abastecimiento de la ciudad. En 1960, el 59% del agua era de origen superficial y 41% subterráneo, pero para 2005 la proporción cambió drásticamente a 8% de origen superficial y 92% de origen subterráneo generando una dependencia creciente y acelerada del acuífero profundo (COTAS y CONAGUA, 2005).

En cuanto a calidad se refiere, en los primeros asentamientos humanos se utilizaba agua superficial de buena calidad acumulada en los pequeños manantiales. Posteriormente, en la primera mitad del siglo XX, una parte de la población se abastecía directamente de norias que eran utilizadas simultáneamente para el riego de huertas y el uso doméstico (Sheridan-Prieto, 2001); sin embargo, los cambios en el uso del suelo extinguieron los huertos que existían dentro de la ciudad, originando una competencia

por el agua de mejor calidad, convirtiendo a las norias en la fuente principal para la agricultura y las extracciones del acuífero profundo se destinaron principalmente a los usos doméstico, comercial e industrial.

En la actualidad, la agricultura recibe las descargas de aguas residuales domésticas e industriales que son conducidas por canales a cielo abierto contribuyendo con un impacto directo sobre el acuífero colgado (COTAS y CONAGUA, 2005; Moran-Ramírez, 2010).

4.2. Fuentes Contaminantes del Agua Subterránea en el Valle de San Luis Potosí

Aunque existe una gran cantidad de actividades humanas que generan cierta carga contaminante, un pequeño número de éstas se pueden considerar como tal (Ramos-Leal, 2002). Dependiendo de los mecanismos de control primario de cada actividad, éstas se pueden clasificar como fuentes potenciales y activas (Wilson, 1991), las primeras no están de hecho contaminando, pero representan un riesgo; las segundas son aquellas en las que los mecanismos de control primario han fallado y por lo tanto, representan una fuente contaminante activa.

Se considera como fuente de contaminación del acuífero al sitio que genera lixiviados o solutos y que al ser incorporados al sistema acuífero alteran la calidad natural del agua subterránea. La calidad del agua subterránea está definida por los valores de fondo de los elementos que de manera natural se incorporan al flujo subterráneo, estas concentraciones no necesariamente tienen que estar por debajo de la normatividad vigente para agua potable.

4.3. Tipo de fuentes potenciales de contaminación

En el Valle de San Luis Potosí las fuentes contaminantes pueden ser caracterizadas por su origen, geometría, actividad o temporalidad (Tablas 2, 3, 4 y 5).

4.3.1. Origen

La contaminación puede ser de tipo natural o antropogénica cuando está asociado a alguna actividad humana (Fetter, 1999).

El acuífero colgado puede ser categorizado como urbano debido a que una superficie importante del acuífero se encuentra debajo de los tres principales usos de suelo (urbano, industrial y agrícola), por lo tanto el origen de la contaminación está asociada a las actividades humanas y su condición estará directamente afectada por la dinámica y el tipo de crecimiento urbano (Peña, 2006).

Cuando la contaminación no está asociada con actividades humanas su origen es *natural*, como en el caso de la lixiviación de rocas y suelos (Fetter, 1999; Armienta-Hernández et al., 1996; Robles y Armienta, 2000). En el caso del agua subterránea, para el acuífero profundo, en el área de estudio se han reportado niveles de flúor por encima de la norma (Carrillo-Rivera et al., 2002; COTAS y

Tabla 2. Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su origen, geometría, actividad y temporalidad (Fetter, 1999).

Origen	Natural	Antropogénico	
Geometría	Puntual	Lineal	Difusa
Actividad	Activa	Potencial	Inactiva
Temporalidad	Pulso	Intermitente	Permanente

CONAGUA, 2005; Ramos-Leal, 2002; Cardona-Benavides, 2007), cuyo origen es asociado con las rocas volcánicas que forman el acuífero.

En el caso del acuífero colgado los niveles de fluoruros son bajos con respecto a la NOM-127 SSAI-1994.

Las anomalías encontradas pueden ser causadas, en primer lugar, debido a la disposición de residuos de flúor y en segundo a talleres de soldadura, en donde se emplea como fundente (Bateman, 1974).

Las anomalías de As, Li y los valores de F- que sobrepasan la NOM-127 SSAI-1994 en el acuífero profundo están asociadas al medio geológico (COTAS y CONAGUA, 2005; Cardona-Benavides, 2007; Carrillo-Rivera *et al.*, 2002), mientras que para el agua del acuífero colgado las concentraciones son bajas y las anomalías pueden estar asociadas a actividades antropogénicas.

4.3.2. Geometría

De acuerdo a su geometría, una fuente es *puntual* cuando, dependiendo de la escala a la que se trabaje, ésta puede ser representada por un punto en el espacio. En el área de estudio este tipo de contaminación es generada por los patios de beneficio minero en el siglo XVII en la zona urbana; en la actualidad algunos puntos en la zona industrial muestran este comportamiento.

Si la representación es una línea o una sucesión de puntos, será *lineal*, como en el caso los canales a cielo abierto en la zona agrícola de SGS y los ríos Santiago y Española en la zona urbana.

Si la fuente se encuentra dispersa en la zona de estudio o si la generación de lixiviaciones tiene lugar en más de dos puntos, por su geometría se le considera como *difusa*. Este tipo de geometría es la presentada por NO_3^{-1} , SO_4^{-2} , Cl⁻ y CE en la zona urbana y agrícola.

Otra fuente de contaminación, de tipo difusa, es generada por la dispersión de partículas atmosféricas, como las reportadas en la zona industrial; partículas con un metal pesado dominante (partículas ricas en hierro, cobre, plomo, arsénico, zinc, níquel, estaño, aluminio, molibdeno y bismuto), así como anomalías de partículas de fluorita, cuya abundancia se debe al manejo del mineral que es transportado hacia la zona industrial en donde se tritura y almacena al aire libre (Aragón-Piña *et al.*, 2006). Otro tipo de partículas reportadas por estos mismos autores, son de cobre metálico, sulfatos de plomo y trióxido de arsénico, relacionadas a la zona minero-metalúrgica, ubicada al NW de la ciudad.

4.3.3. Actividad

En caso de existir evidencias de la generación de lixiviaciones será activa, como es el caso de los usos de suelo actuales en donde la contaminación es permanente; un ejemplo de este tipo de actividad es la zona agrícola de SGS, a través de los canales y parcelas de riego. En la zona industrial es por medio de sus descargas.

Cuando existen o pueden existir elementos suficientes para que se generen lixiviaciones en un futuro inmediato o a largo plazo, será contaminación de tipo *potencial*. En zonas urbanas los tiraderos clandestinos y la disposición de residuos de flúor.

Las fuentes *inactivas* siguen representando un riesgo potencial. Tal es el caso de los patios de beneficio minero del siglo XVII en la zona urbana (Figura 2) y el antiguo Tanque Tenorio (Keiser-Schlittler, 1992; Galván-Arellano, 1999; Medellín-Milán, 2003; IMPLAN, 2009).

4.3.4. Temporalidad

Cuando la generación de lixiviados es continua en el tiempo, se le definirá como *permanente*, como es el caso de los canales a cielo abierto en la zona agrícola.

Si los lixiviados solo están presentes cuando las condiciones de humedad en el sitio lo permiten (lluvias e incremento de humedad) será *intermitente*, como es el caso de los ríos Santiago y Española. Otro caso son los residuos sólidos mineros sepultados en la zona urbana los cuales generan lixiviados en temporada de lluvias y, cuando el nivel freático se eleva, éstos son incorporados al acuífero.

Cuando los lixiviados ocurren en una ocasión, su carácter temporal será de *pulso*. Debido a que en el área de estudio el nivel freático está muy cercano a la superficie, el acuífero es muy vulnerable a la contaminación. Bajo estas condiciones en época de estiaje, los valores de contaminantes se incrementan y en época de lluvia son incorporados y diluidos en el acuífero.

Los cambios de uso de suelo en la zona de estudio y sus efectos se aprecian en la Figura 4, para el año 1989 la distribución de NO_3^{-1} era principalmente en la zona agrícola; para 1995, además del crecimiento del uso de suelo urbano, es apreciable el incremento de la marcha de este contaminante. En 2009 la distribución de NO_3^{-1} , permanece en la zona agrícola además de encontrarse de manera importante en la zona urbana, como producto de los desechos humanos.

4.3.5. Contaminación en zonas urbanas

Entre las fuentes potenciales de contaminación que existen en la zona urbana y conurbada de SLP se encuentran panteones, jales mineros, descargas de aguas residuales, disposición de residuos sólidos (activos e inactivos), gasolineras y formaciones geológicas que aportan fluor a la región (Figura 1; Tabla 3). Derivado de estas fuentes potenciales de contaminación, en el acuífero colgado de la zona urbana se detectaron niveles importantes de NO_3^{-1} ,

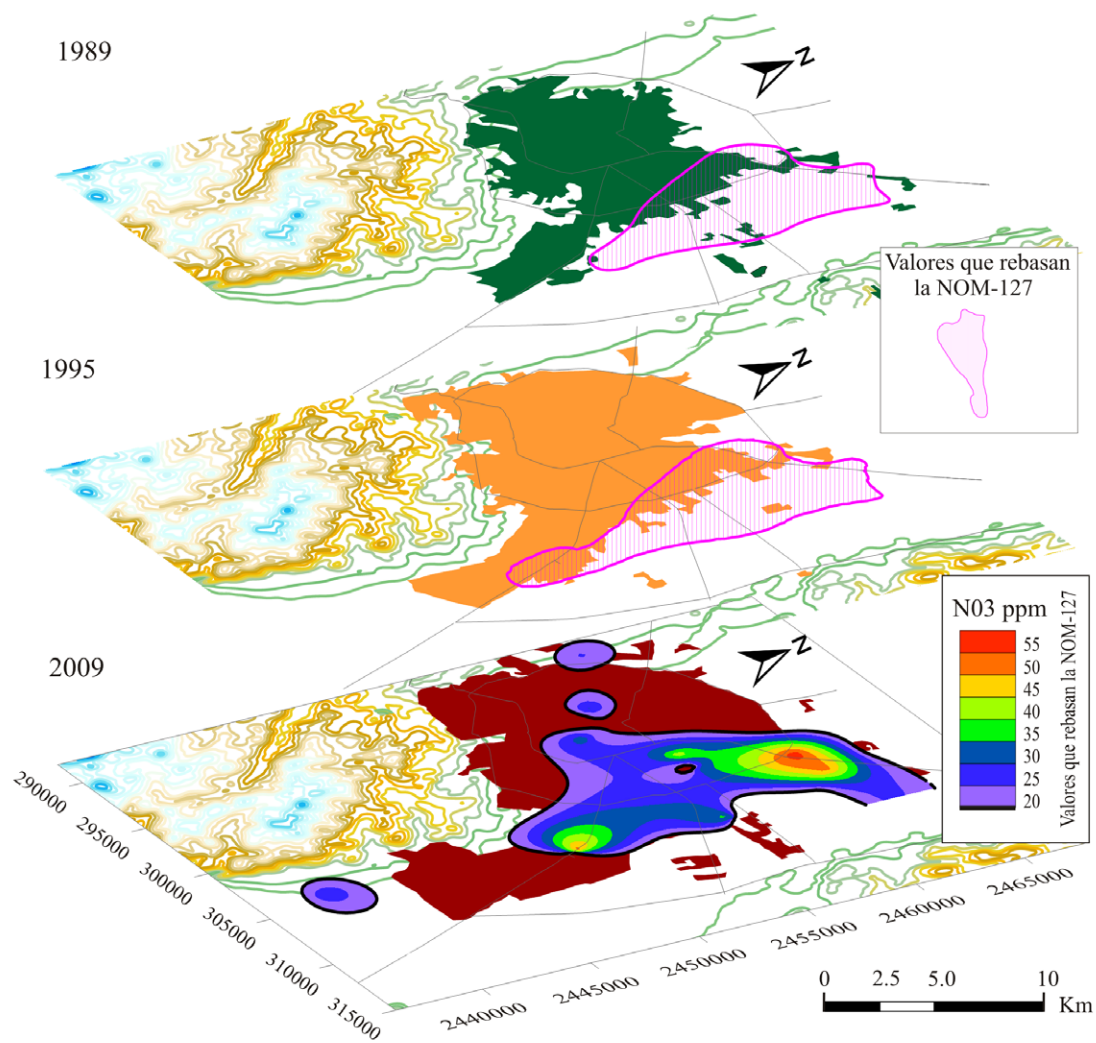


Figura 4. Distribución temporal de NO₃ en la zona de estudio, basados en datos de Moran-Ramírez, 2010; COTAS y CONAGUA, 2005).

Tabla 3. Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona urbana de San Luis Potosí.

Tipo de fuente	Actividad	Origen	Geometría	Temporalidad	Soluto	Uso de Suelo
Zona urbana	Activa	Antropogénico	Difusa	Permanente	Nitratos, SDT.	Zona Urbana
Panteones	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Aminas, Ca, P	Zona Urbana
Jales Mineros	Activa/ potencial	Antropogénico	Difusa	Intermitente	F	Zona Urbana
Descargas de aguas residuales	Activa/ potencial	Antropogénico	Puntual/ lineal	Intermitente	SDT, Cl, N, Comp. Org.	Zona Urbana
Disposición de residuos sólidos	Activa/ potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Metales	Zona Urbana Zona Agrícola
Formaciones Geológicas	Activa/ potencial	Natural	Difusa	Intermitente	Cr, F, As	Zona Urbana Zona Agrícola Zona Industrial
Gasolineras	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	BTEX	Zona Urbana Zona Agrícola Zona Industrial

SO₄⁻², Cl⁻, CE, CT, GA que por su amplia distribución en esta zona se considera que estas potenciales fuentes de contaminación son de tipo difusa (Moran-Ramírez, 2010). Anomalías importantes en la zona urbana se localizan en norias, en el caso de los NO₃⁻¹ y CT rebasa el límite

permisible para consumo humano de la NOM-127-SSA1-1994.

La principal área contaminada de estos parámetros se encuentra en las proximidades del panteón municipal de SGS; así como, en la zona centro de la ciudad (Figura 5).

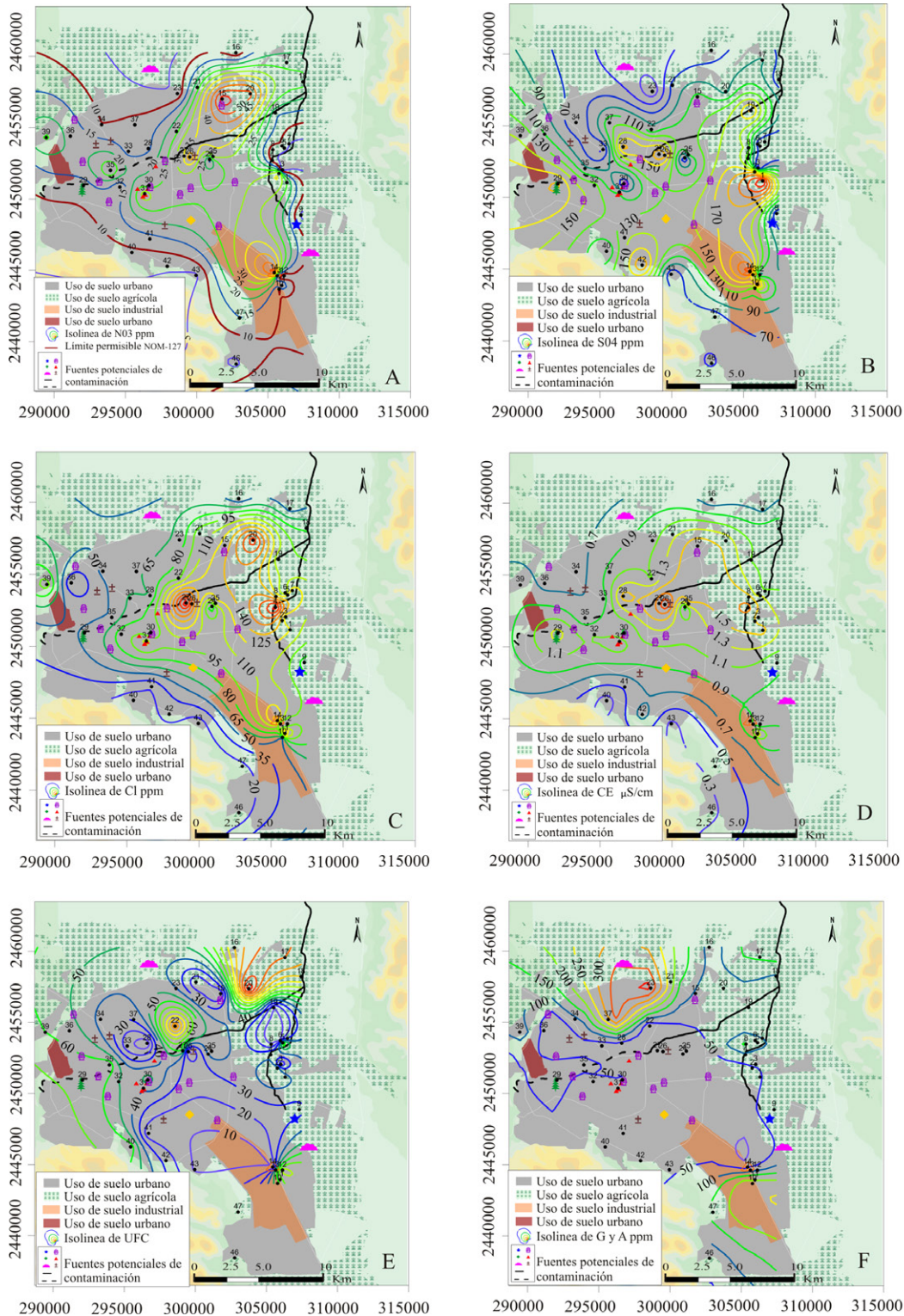


Figura 5. Distribución espacial de A: NO₃⁻¹, B: SO₄⁻², C: Cl⁻, D: CE, E: CT y F: G y A, basados en Moran-Ramírez, 2010.

El acuífero colgado en la zona urbana recibe una importante recarga inducida ocasionado por las fugas en las redes de agua potable y de drenaje (COTAS y CONAGUA, 2005), aportando cantidades significativas de estos contaminantes al acuífero.

Como se ve en la Figura 6, de manera puntual se

identificaron fuentes de contaminación que generan Hg, Ba, Sr, Cd, Pb y Ag, siendo el primero de estos elementos el que sobrepasa el límite permisible para consumo humano de la NOM-127-SSA1-1994. En la Figura 7, también se detectaron valores importantes de Rb, Co, Cu, Fe y As, siendo este último el que sobrepasa el límite permisible para

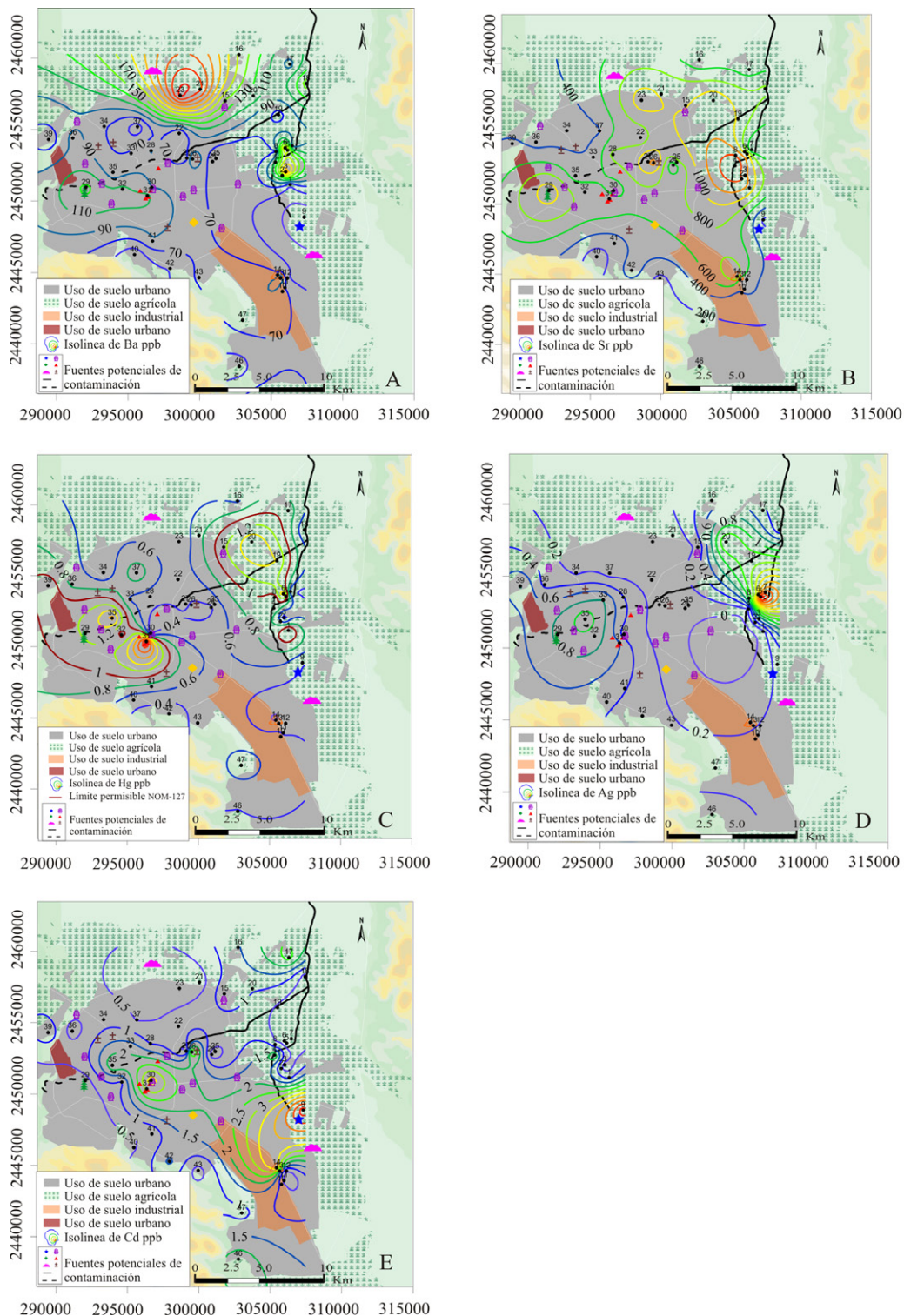


Figura 6. Distribución espacial de A: Ba²⁺, B: Sr²⁺, C: Hg²⁺, D: Ag⁺, E: Cd²⁺, basados en Moran-Ramírez, 2010.

consumo humano de la NOM-127-SSA1-1994.

Cabe mencionar que la presencia de metales pesados no es común en zonas urbanas; sin embargo, los niveles detectados en algunos sitios pueden estar relacionados a las actividades mineras realizadas a partir de la fundación de la ciudad en el siglo XVII (Keiser-Schlittler, 1992; Galván-

Arellano, 1999; IMPLAN, 2009).

Otra fuente de estos metales puede ser la presencia de talleres dentro de la zona urbana; así como la dispersión aérea de partículas. Lo cual explica la distribución de diferentes metales reportados en el presente trabajo. Cabe mencionar que el Ba y Sr, también son utilizados en la

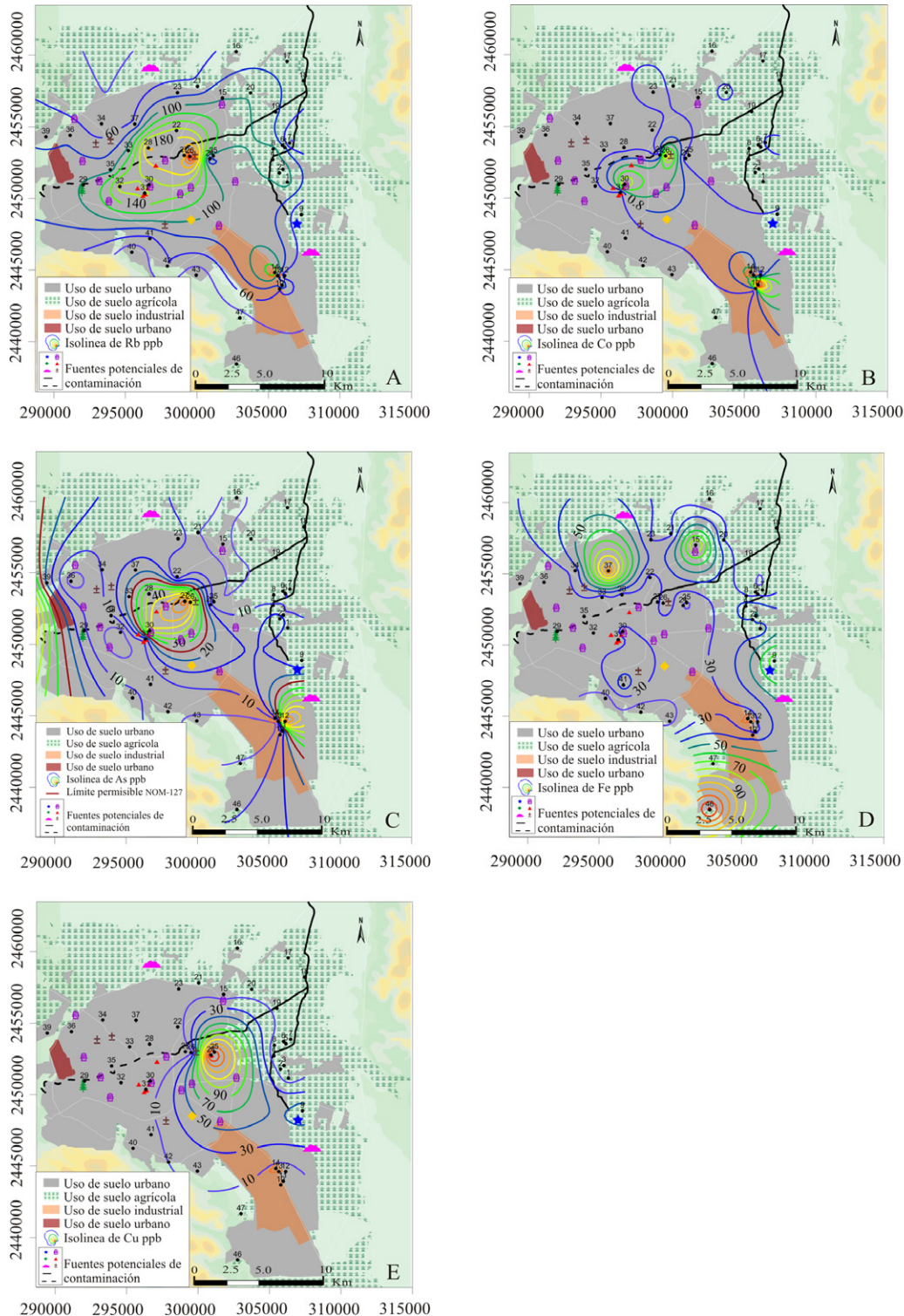


Figura 7. Distribución espacial de A: Rb⁺, B: Co⁺², C: As⁺³ D: Fe⁺³, y E: Cu⁺², basados en Moran-Ramírez, 2010.

pirotecnia, actividad que ha sido reportada en la periferia de SLP (IMPLAN, 2009).

El Mn se detectó en el Parque Morales (Figura 8), el cual se encuentra cercano a una zona de uso de suelo industrial minero que actualmente emite partículas al ambiente durante sus procesos.

En el área de estudio, el comportamiento de las fuentes de contaminación es complejo. Generalmente pueden estar sujetos a procesos de atenuación natural (Gutiérrez-Ruiz et al., 2005); pueden ser transportados vía aérea (Aragón-Piña et al., 2006) y también pueden ser transportados por la acción fluvial.

Una vez que estos se depositan pueden ser afectados por el dinamismo del nivel freático del acuífero colgado, el cual es de poca profundidad, la carga contaminante puede ser transportada por el flujo subterráneo que va de SO a NE (COTAS y CONAGUA, 2005; IPICYT, 2010), de tal manera que pueden encontrarse anomalías en áreas diferentes a su sitio de origen.

4.3.6. Contaminación en zonas agrícolas

Las fuentes potenciales de contaminación presentes en la zona agrícola de SGS son panteones, canales con aguas residuales, disposición de residuos sólidos (Figura 1; Tabla 4), debido a que el retorno de riego es un factor importante en la movilidad de los contaminantes en este uso de suelo. Su contaminación característica es de tipo difusa en los NO_3^- , SO_4^{2-} y materia orgánica. Derivado de estas fuentes potenciales de contaminación se detectaron niveles importantes de NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl⁻ y CE (Figura 5). Los valores más altos se presentan en las proximidades de los canales abiertos.

Este tipo de contaminantes son derivados del uso de aguas residuales, fertilizantes y agroquímicos en la actividad agrícola.

Algunos metales como Ba, Sr, Hg, Ag, Cd Pb, Zn y Li se presentan de manera puntual en sitios cercanos a canales abiertos, derivados del antiguo Tanque Tenorio (Figuras 6 y 9), cuyas aguas provienen de la zona industrial (COTAS y CONAGUA, 2005).

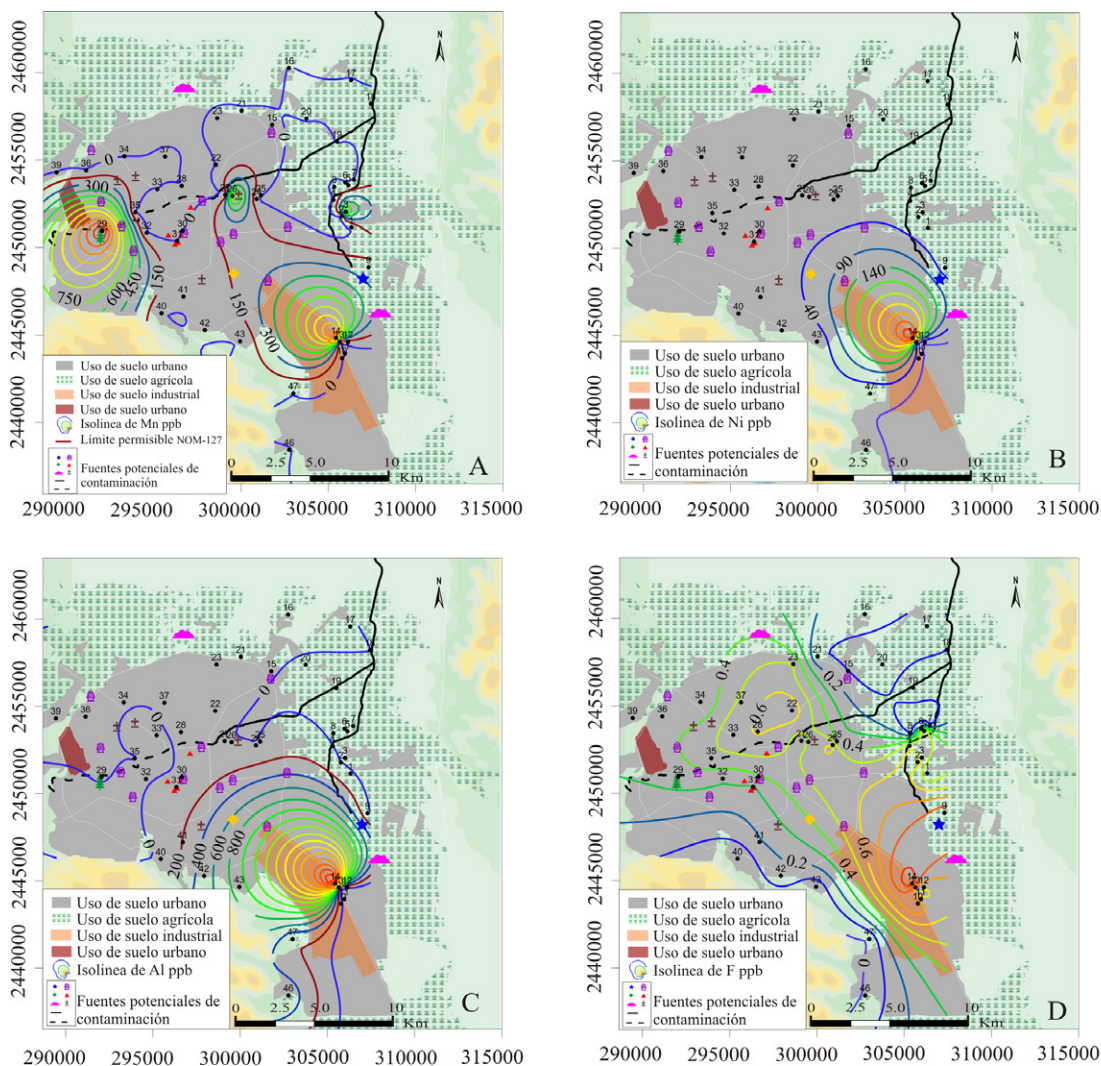


Figura 8. Distribución espacial de A: Mn^{2+} , B: Ni^{2+} , C: Al^{3+} , D: Cr^{3+} , E: B^{3+} y F: F^- , basados en Moran-Ramírez, 2010.

Tabla 4. Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona agrícola de San Luis Potosí- Soledad de Graciano Sánchez.

Tipo de fuente	Actividad	Origen	Geometría	Temporalidad	Soluto	Uso de Suelo
Terrenos agrícolas	Activa	Antropogénico	Difusa	Intermitente	Agroquímicos	Zona Agrícola
Basureros activos	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Nitratos STD, Comp. Org.	Zona Agrícola
Basureros clausurados	Activa/ potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Nitratos SDT, Comp. Org.	Zona Agrícola
Ríos y canales de aguas residuales	Activa	Antropogénico	Lineal	Intermitente	SDT, Cl, N, Cr	Zona Agrícola
Granjas	Potencial	Antropogénico	Difusa	Intermitente	Nitratos	Zona Agrícola
Disposición de residuos sólidos	Activa/ potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Metales	Zona Urbana Zona Agrícola Zona Urbana
Gasolineras	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	BTEX	Zona Agrícola Zona Industrial

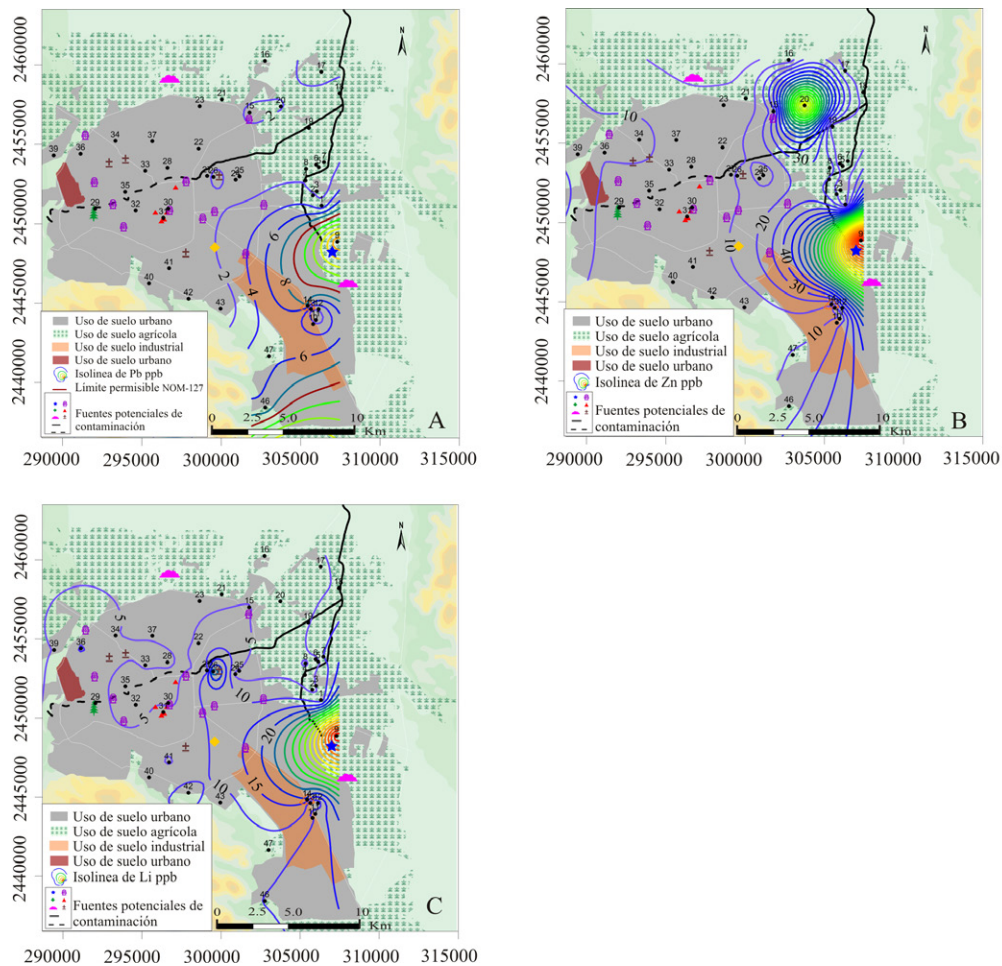


Figura 9. Distribución espacial de A: Pb²⁺, B: Zn²⁺ y C: Li⁺, basados en Moran-Ramírez, 2010.

4.3.7. Contaminación en zonas industriales

Las fuentes potenciales de contaminación que existen en la zona industrial de San Luis Potosí están asociadas a disposición de lodos industriales, confinamiento de residuos industriales, terrenos industriales activos, terrenos industriales inactivos, gasolineras (Tabla 5). Derivado de estas fuentes potenciales de contaminación en la zona

industrial se detectaron niveles importantes de NO₃⁻¹, SO₄⁻², Cl⁻, CE, CT y GA (Figura 5).

Con una distribución puntual (Figuras 5 y 9) se detectó Ba, Sr, Hg, Ag, Cd, Co⁺², Ni, Al y Fe. Es importante mencionar que el sitio ocupado por una bodega con uso industrial activo resulto anómalo en todos los parámetros analizados (Figuras 5 a 9).

Tabla 5. Tipos de fuentes potencialmente contaminantes de acuerdo a su actividad, origen, geometría, temporalidad y tipo de soluto en la zona industrial de San Luis Potosí.

Tipo de fuente	Actividad	Origen	Geometría	Temporalidad	Soluto	Uso de Suelo
Disposición de lodos industriales	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Comp. Orgánicos, metales, sust. corrosivas	Zona Industrial
Confinamiento de residuos industriales	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	Metales	Zona Industrial
Terrenos industriales activos	Activa/ potencial	Antropogénico	Puntual	Pulso/ intermitente	Metales, comp. orgánicos	Zona Industrial
Terrenos industriales inactivos	Potencial	Antropogénico	Puntual/ Difusa	Intermitente	Metales, comp. orgánicos	Zona Industrial
Gasolineras	Potencial	Antropogénico	Puntual	Intermitente	BTEX	Zona Urbana Zona Agrícola Zona Industrial

5. Conclusiones

La alteración al sistema hidrogeológico original desde el inicio de las actividades antropogénicas en el VSLP ha constituido un factor de alto impacto en la calidad actual del agua subterránea.

Los cambios hidrológicos al sistema natural en la región se habían dado de forma paulatina durante cuatro siglos a partir de la fundación de la ciudad; sin embargo, estos cambios han sido de forma drástica y en muy poco tiempo desde la segunda mitad del siglo veinte.

Así mismo, los cambios de uso de suelo en el valle desde los primeros asentamientos humanos hasta hoy en día, han propiciado un efecto de contaminación cruzada que vuelve más complejo el problema de contaminación en el agua subterránea.

Las fuentes potenciales de contaminación que existen en la zona industrial de San Luis Potosí están asociadas a disposición de lodos industriales, confinamiento de residuos industriales, terrenos industriales activos, terrenos industriales inactivos y gasolineras.

Las fugas de drenaje en la zona urbana alcanzan el nivel freático del acuífero colgado incrementando los valores de NO_3^{-1} , SO_4^{-2} , Cl^- , CE , CT y GA .

El origen de metales pesados (Hg, Ag, Ba y Sr) en el centro de la ciudad de San Luis Potosí, se debe a las actividades mineras en los patios de beneficio realizadas poco después de la fundación de la ciudad, que además se llevaron a cabo sin ningún tratamiento de manejo de los residuos.

El uso de agua residual y agroquímicos en las actividades agrícolas en la zona de Soledad de Graciano Sánchez impacta de manera importante al acuífero como lo demuestran los niveles de NO_3^{-1} , SO_4^{-2} , Cl^- , CE y CT .

La presencia de metales (Hg, Ag, Ba, Sr, Cd, Pb, Zn y Li) en la zona agrícola se asocia a sitios cercanos a canales abiertos derivados del antiguo Tanque Tenorio.

Otra fuente de aporte de metales pesados lo constituye

el transporte aéreo de partículas de la zona industrial.

La industria activa, actualmente inmersa en la zona urbana, también contribuye con importantes valores de metales (Hg, Ag, Ba, Sr y Mn) al acuífero colgado, como lo demuestra su presencia en la zona oriente de la ciudad.

En la zona industrial se detectaron grandes anomalías en casi todos los metales pesados; las anomalías son de tipo puntual y corresponden a un terreno industrial activo.

Como se estableció, la contaminación en el acuífero colgado del VSLP es compleja, debido al origen de las diferentes fuentes, por lo que su solución resulta también compleja. Los datos presentados en este trabajo son un diagnóstico de la calidad del agua del acuífero colgado; sin embargo, se propone iniciar un monitoreo que permita establecer la hidrodinámica de los contaminantes antes tomar cualquier acción para mitigar sus efectos.

Algunas propuestas de acciones para aminorar los efectos de contaminación al acuífero son la instalación de plantas de tratamiento para los diferentes usos de agua, la modernización de la red de drenaje de la zona urbana, la instalación de rellenos sanitarios adecuados y la depuración primaria del agua residual utilizada para la agricultura. Cabe mencionar que los resultados esperados de estas acciones no serían inmediatos, sino a largo plazo, por lo que es necesario iniciarlas en el menor tiempo posible.

Agradecimientos

Queremos dar las gracias al proyecto 151666, "Problemática socioambiental asociada al uso y manejo del agua en la cuenca del Valle de San Luis Potosí", el cual ha recibido financiamiento del Fondo de Ciencia Básica SEP-CONACYT, en su edición 2010. También agradecemos al Programa de Agua y Sociedad del Colegio de San Luis, A. C. y a la División de Geociencias Aplicadas, del Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A. C., por el apoyo otorgado.

Referencias

- Aragón-Piña, A., Campos-Ramos, A., Leyva-Ramos, R., Hernández-Orta, M., Miranda-Ortiz, N., Antoni Luszczewski-Kudra, A., 2006, Influencia de emisiones industriales en el polvo atmosférico de la ciudad de San Luis Potosí, México: *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 22, 5-19.
- Armienta-Hernández, M.A., Rodríguez-Castillo, R., Ceniceros N., Juárez F., Cruz O., 1996, Distribution, origin and fate soils in Guanajuato Mexico: *Environmental Pollution*, 9, 391-397.
- Barber, C., Otto, C.J., Bate, L.E., 1996, Evaluation of the relationship between land-use changes and groundwater quality in a water supply catchment, using GIS Technology: The GWELUP Wellfield, Western Australia: *Hydrogeology Journal*, 4, 6-19.
- Bateman, A., 1974, Yacimientos minerales de rendimiento económico: Barcelona, España, Ediciones Omega, 975 p.
- Cardona-Benavides, A., 2007, Hidrogeoquímica de sistemas de flujo regional, intermedio y local resultado del marco geológico en la Mesa Central: reacciones, procesos y contaminación: México, D.F., México, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis doctoral, 252 p.
- Cardona-Benavides, A., 1990, Caracterización físico-química y origen de los sólidos disueltos en el agua subterránea en el Valle de San Luis Potosí: su relación con el sistema de flujo: Monterrey, México, Universidad Autónoma de Nuevo León, tesis de maestría, 97 p.
- Carrillo-Rivera J.J., Armienta, M.A., 1989, Diferenciación de la contaminación inorgánica en las aguas subterráneas del valle de la ciudad de San Luis Potosí, S.L.P., México: *Geofísica Internacional*, 28, 763-783.
- Carrillo-Rivera, J.J., Clark, I.D., Fritz P., 1992, Investigating recharge of shallow and paleo-groundwaters in the Villa de Reyes basin, SLP, Mexico, with environmental isotopes: *Applied Hydrogeology*, 1, 35-48.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona-Benavides, A., Moss, D., 1996, Importance of the vertical component of groundwater flow: a hydrochemical approach in the valley of San Luis Potosí, México: *Journal of Hydrology*, 185, 23-44.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona-Benavides, A., Edmunds, W.M., 2002, Use of abstraction regime and knowledge to control high-fluoride concentration in abstracted groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico: *Journal of Hydrology*, 261, 24-47.
- Carrillo-Rivera, J.J., Cardona-Benavides, A., Huizar-Álvarez, R., Graniel-Castro, E., 2008, Response of the interaction between groundwater and other components of the environment in Mexico: *Environmental Geology*, 55, 303-319.
- Charbonneau, R., Kondolf, G.M., 1993, Land use change in California, USA: Nonpoint source water quality impacts: *Environmental Management*, 17, 453-460.
- Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS), Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), 2005, Estudio técnico respecto a las condiciones geohidrológicas y sociales del acuífero 2411 "San Luis Potosí" en el Estado de San Luis Potosí: Comité Técnico de Agua Subterránea del Acuífero del Valle de San Luis Potosí, reporte, 74 p.
- Cox, M.E., Hillier, J., Foster, L., Ellis, R., 1996, Effects of a rapidly urbanizing environment on groundwater, Brisbane, Queensland, Australia: *Hydrogeology Journal*, 4, 30-47.
- De la Rosa-Charcas, A. Llanas-Rivera, M. A., 2000, Los grandes retos del Valle de San Luis: Secretaría de estudios y programas del comité ejecutivo estatal del Partido Revolucionario Demócrata: Secretaría de Estudios y Programas del CEE del PRD, Keiser Ediciones, San Luis Potosí, México, 136 p.
- Dummer, M., Straaten, V., 1988, The influence of industrialization and hydrogeology on the quality of ground water and surface water in Bielefeld (case studies): Symposium on hydrological processes and water management in urban areas, 1988, Duisberg, FRG, 423-428.
- Fetter, C.W., 1999, *Applied Hydrogeology*: Estados Unidos de América, Prentice Hall 4th edition, 589 p.
- Galván-Arellano, A., 1999, Arquitectura y urbanismo de la ciudad de San Luis Potosí en el siglo XVII: Facultad de Hábitat, Universidad Autónoma de San Luis Potosí, San Luis Potosí, México, 268 p.
- Gutiérrez-Ruiz, M., Mario Villalobos, Romero, F., Fernández-Lomelín, P., 2005, Natural attenuation of arsenic in semiarid soils contaminated by oxidized Arsenic wastes, *en O'Day, P.A., Vlassopoulos, D., Meng, X., Liane G., Benning, L.G.*, (eds.), *Advances in Arsenic Research*: Washington D.C., Integration of Experimental and Observational Studies and Implications for Mitigation, American Chemical Society ACS Symposium Series, 915, 235-251.
- Instituto Municipal de Planeación (IMPLAN), 2009, Plan Parcial de Conservación del Centro Histórico de San Luis Potosí 2009-2012: San Luis Potosí, S.L.P., Proyectos Municipales, H. Ayuntamiento de San Luis Potosí, 221 p.
- Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática (INEGI), 2010, Censo de Población y Vivienda 2010: México, Instituto Nacional de Geografía, Estadística e Informática, disponible en <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?src=487&e=24>, consultado 27 de Junio de 2011.
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (IPICYT), 2007, Estudio hidrogeológico de la porción oriental del Valle de San Luis Potosí: San Luis Potosí, S.L.P., IPICYT, reporte técnico elaborado para el Gobierno del Estado de San Luis Potosí, 174 p.
- Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica A.C. (IPICYT), 2010, Diagnóstico del potencial del acuífero somero del Valle de San Luis Potosí como una fuente alternativa de abastecimiento: San Luis Potosí, S.L.P., IPICYT, reporte técnico elaborado para el Comité Técnico del Agua Subterránea (COTAS), 95 p.
- Keiser-Shlittler, A., 1992, Breve Historia de la ciudad de San Luis Potosí: Keiser Editores, 230 p.
- Liu, W.H., Zhou, J.Z., Ouyang, Z.Y., Soderlund, L., Liu, G.H., 2005, Impacts of sewage irrigation on heavy metal distribution and contamination in Beijing, China: *Environmental International*, 31, 805-812.
- Medellín-Milán, P., 2003, Tanque Tenorio, diez años después: San Luis Potosí, México, Pulso, Diario de San Luis, Sección Ideas, publicado el 22 de Mayo de 2003, 4p.
- Moran-Ramírez, J., 2010, Evaluación de la calidad química del agua en el acuífero somero de San Luis Potosí: San Luis Potosí, S.L.P., Universidad del Noreste, Área de Ciencias de Químico Biológicas, tesis de licenciatura, 68 p.
- Naik, P.K., Tambe, J.A., Dehury, B.N., Tiwari, A.N., 2008, Impact of urbanization on the groundwater regime in a fast growing city in central India: *Environmental Monitoring and Assessment*, 146, 339-373.
- Noyola-Medrano, M.C., Ramos-Leal, J.A., Domínguez-Mariani, E., Pineda-Martínez L.F., López-Loera, H., 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*, 24, 395-410.
- Peña, F., 2006, Abasto de agua a la ciudad de San Luis Potosí, *en Barkin, D.* (ed.), *La Gestión del Agua Urbana en México*: Guadalajara, México, Universidad de Guadalajara, 249-264.
- Ramos-Leal, J.A., López-Loera, H., Martínez-Ruiz, V.J., Aranda-Gómez, J.J., 2007, Sucesión de eventos y geometría de la parte central del acuífero del graben de Villa de Reyes (San Luis Potosí, México) inferida a partir de datos geoelectrónicos: *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 24, 31-46.
- Ramos-Leal, J.A., 2002, Validación de mapas de vulnerabilidad acuífera e impacto ambiental: caso Río Turbio, Guanajuato: México, D.F., México, Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, tesis de doctorado, 106 p.
- Robles, J., Armienta, M.A., 2000, Natural Chromium Contamination of Groundwater at Leon Valley, Mexico: *Journal of Geochemical Exploration*, 68, 167-181.
- Schmidt, K., Sherman, I., 1987, Effect of Irrigation on Groundwater Quality in California: *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1, 113.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2005, Informe sobre la situación del medio ambiente en México 2005, disponible en http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_04/07_agua/recuadros/c_rec2_07.htm, consultado el 2 de Mayo de 2011.

- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2008, Boletín del Archivo Histórico del Agua, 13, 40, 89 p.
- Sheridan-Prieto, C., 2001, "Indios madrineros" - colonizadores tlaxcaltecas en el noroeste novohispano: Estudios de Historia Novohispana, 24, 15-51 p.
- Tong, S.T.Y., Chen, W., 2002. Modeling the relationship between land use and surface water quality: Journal of Environmental Management, 66, 377-393.
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO), 2004, Groundwater contamination inventory: a methodological guide, Project 3.1 (IHP-V): Paris, France, UNESCO, 162 p.
- Wilson A.R., 1991, Environmental Risk: Identification and Management: Chelsea, Missouri, U.S.A., Lewis Publishers, 413 p.
- Manuscrito recibido: Junio 3, 2011.
Manuscrito corregido recibido: Junio 15, 2012.
Manuscrito aceptado: Junio 28, 2012.