

CALIDAD DEL AGUA DE RIEGO EN SUELOS AGRÍCOLAS Y CULTIVOS DEL VALLE DE SAN LUIS POTOSÍ, MÉXICO

Irma Francisca SARABIA MELÉNDEZ, Rodolfo CISNEROS ALMAZÁN, Jorge ACEVES DE ALBA, Héctor Martín DURÁN GARCÍA y Javier CASTRO LARRAGOITIA

Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Facultad de Ingeniería, Avenida Manuel Nava No. 8, Zona Universitaria, C.P. 78290. email: hduran@uaslp.mx

(Recibido octubre 2009, aceptado marzo 2011)

Palabras clave: calidad de aguas para riego, diagnóstico de suelos y cultivos

RESUMEN

Debido a la poca disponibilidad de agua subterránea para el uso de riego, algunos agricultores de los municipios de San Luis Potosí y Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., México, desde hace tiempo usan para el riego de la zona agrícola periurbana, con una extensión aproximada de 5000 ha, por una parte pozos emplazados en los acuíferos profundo y somero del valle, y por la otra, aguas residuales provenientes de descargas domésticas e industriales. Esto provoca un panorama complejo de producción de cultivos y pudiera también ocasionar un riesgo de salud pública por la presencia de coliformes fecales. Mediante un muestreo aleatorio simplificado se analizó la calidad actual del agua de los niveles somero y profundo del acuífero, calidad del suelo agrícola y cultivos de hortalizas y forrajeros en la zona de estudio. Las muestras de agua, suelo y cultivos fueron analizadas para evaluar sus características químicas. En el caso del agua, se analizaron también sus características microbiológicas. Se detectó que algunas muestras de agua sobrepasaron el límite permisible de las normas oficiales mexicanas (DOF 1996) para uso agrícola en la concentración de sulfatos (SO_4^{-2}) y la conductividad eléctrica (CE), lo cual representa un exceso de sales en el agua. También sobrepasan las normas, en algunos casos, las concentraciones de coliformes fecales (NMP/100 mL) y los sólidos disueltos totales (SDT). Se encontró que los nitratos presentan altas concentraciones en el agua de riego. En el suelo se encontraron concentraciones de metales en niveles dentro de la norma. En el caso de los cultivos analizados, el análisis bromatológico no detectó un exceso de metales, dado que se encuentran en un grado de suficiencia. Sin embargo se recomienda realizar un análisis más amplio de elementos traza, tanto en agua como en suelos y cultivos para observar si existen otros elementos que pudieran causar un problema de salud pública.

Key words: irrigation water quality, evaluation of soils and crops

ABSTRACT

Due to the little availability of underground water for irrigation use, some farmers from the metropolitan area comprised by the municipalities of San Luis Potosí and Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., México, have opted from some time back to use on the one hand, wells that are located in the deep and shallow aquifers of the valley to irrigate the peri-urban agricultural zone, which has an approximate extension

of 5000 hectares, and on the other hand sewage waters from domestic and industrial discharging. This brings about a complex crop production panorama that could also lead to a health hazard due to the presence of fecal coliforms. By means of a random sampling, the current quality of the shallow and deep level aquifer water was analyzed as well as the agricultural soil and produces and forage crop quality at the zone under study. The water, soil and crop samples were analyzed in order to evaluate their chemical characteristics. In the case of water, its microbiological characteristics were also analyzed. It was detected that some water samples exceeded the permissible official Mexican standards (DOF 1996) for agricultural use regarding sulfate concentration (SO_4^{-2}) and electric conductivity, which represents an excess of salts in the water. Also exceeding the official standards, in some cases, are the concentration of fecal coliforms (MPN/100 mL) and total dissolved solids. It was observed that the nitrates are present at high concentrations in the water for irrigation. Metal concentrations in soil were found within the regulation levels. In the case of the crops analyzed, the bromatological analysis showed no excess of metals, since they are found in a sufficient degree. However it is advisable to carryout a wider analysis regarding tracer elements, in water as well as in the soil and crops to observe if other elements that could cause a public health problem exist.

INTRODUCCIÓN

El Valle de San Luis Potosí tiene una extensión territorial de 1,980 km² y está ubicado en la zona centro del estado de San Luis Potosí, México, con una población aproximada de 1100 000 habitantes (prácticamente el 47 % de la población total del estado) y comprende parcialmente varios municipios: la ciudad de San Luis Potosí y capital del estado, Soledad de Graciano Sánchez, Mexquitic de Carmona, Cerro de San Pedro y el municipio de Zaragoza. En el valle se concentran las principales actividades económicas las cuales generan el 71.5 % del PIB del estado (COTAS 2005).

Al pertenecer a la región semiárida del país, la importancia del agua subterránea se hace evidente debido a que todas las actividades económicas incluyendo la agropecuaria, consumen casi un 95 % del total requerido de los acuíferos profundo (sistema de flujo profundo) y somero (sistema de flujo somero).

Cerca de 20 % del total de los 125.57 Hm³ año⁻¹ extraídos de esos acuíferos, localizados en el valle, se destinan a actividades agropecuarias. Además, de acuerdo con diversos estudios de balance geohidrológico, existe una sobreexplotación estimada cercana a los 40 Hm³ año⁻¹ (COTAS 2005). Respecto a la calidad del agua de los acuíferos, se ha estudiado la diferencia entre el sistema de flujo somero y el profundo, los cuales varían entre sí considerablemente. En general, el acuífero somero está contaminado principalmente porque muchas de las descargas urbanas todavía se conducen a través de canales a cielo abierto, lo que fue confirmado al realizar las visitas

de campo. En el caso del acuífero profundo, estudios recientes demuestran que existe una contaminación por el ion fluoruro debido a la litología y mineralización de la zona (Carrillo-Rivera 2002, COTAS 2005, Trejo 2001, Hurtado 2005).

Todo ello representa una confirmación a la preocupación y al análisis que se plantea en el presente estudio respecto al impacto que tiene la distribución, cantidad y calidad del agua, en relación con el suelo y los cultivos de una porción del área del valle de San Luis Potosí. Por otra parte, respecto al uso del agua y del suelo, existe una relación muy importante y directa con la producción y seguridad de los alimentos que se producen en la zona agrícola del valle, que ha ido disminuyendo notablemente a causa de un crecimiento no planeado de las áreas urbanas. Al incrementarse los volúmenes de agua para uso urbano se ha ido incrementando también lo ha hecho el volumen de agua residual para los cultivos. Debido a lo anterior las áreas de cultivo funcionan como filtros biológicos de las aguas residuales, sin embargo, no se ha estudiado a fondo el problema que genera el uso de este tipo de aguas sobre los suelos, cultivos ni en la población.

El aprovechamiento de aguas residuales para riego agrícola podría en principio presuponer una menor exigencia que el necesario para uso industrial. Sin embargo, deben considerarse los riesgos asociados para la salud y el ambiente (Scott 2004) debido a la presencia de microorganismos patógenos (Baccaro 2006) y otros elementos que pueden ocasionar problemas de contaminación de aguas subterráneas (Morris *et al.* 2003), tales como los nitratos, nutriente que más

comúnmente contamina los acuíferos (Muñoz 2004). Se han realizado múltiples estudios para determinar la calidad del agua subterránea, sin embargo, no se ha realizado alguno en la zona agrícola periurbana del valle de San Luis Potosí, en el que se analicen en conjunto los factores agua, suelo y cultivo. Así, el principal objetivo de este estudio fue analizar la calidad del agua de riego del Valle de San Luis Potosí, proveniente del acuífero somero y profundo su impacto de ésta en suelos agrícolas y en algunos cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo de agua

Derivado de un censo previo de 346 pozos, en el que se detectaron 120 pozos para uso agrícola, se realizó un muestreo aleatorio simplificado en el que se seleccionaron 20 puntos de muestreo de pozos profundos y someros (Fig. 1). Se utilizaron los siguientes criterios: 1) facilidad para el acceso dada la restricción para obtener información de los usuarios, 2) bombeo para extracción del agua y, 3) que el agua extraída se usara para el riego de cultivos.

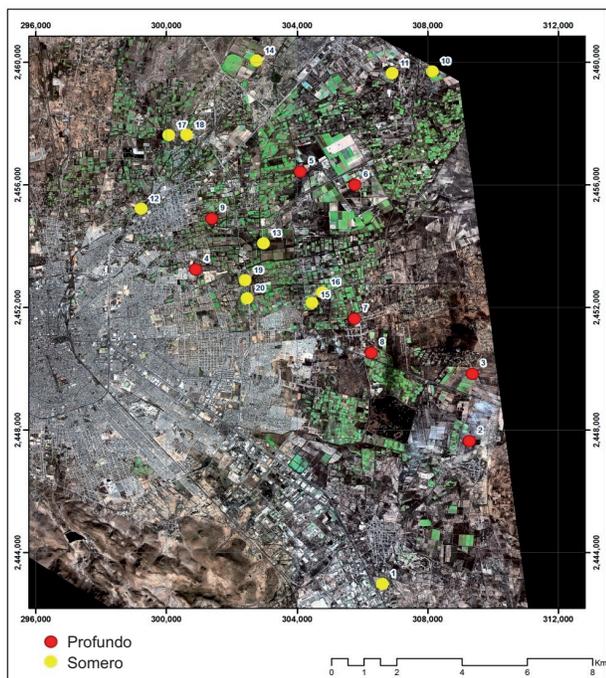


Fig. 1. Ubicación de los sitios de muestreo de acuerdo al tipo de acuífero

Las muestras de agua para el análisis de metales totales disueltos se colectaron en botellas de HPDE de 125 mL, para preservar los metales en solución se

agregó HNO_3 concentrado hasta llegar a un $\text{pH} \leq 2$. Para el análisis bacteriológico se utilizaron bolsas estériles de 500 mL. Se analizaron los siguientes parámetros: conductividad eléctrica (CE), sólidos disueltos totales (SDT), pH, aniones, cationes y contenido de boro. El análisis bacteriológico se hizo a través de coliformes fecales y totales. Respecto a metales se analizó arsénico, cobre, manganeso, plomo y hierro.

Muestreo en suelos y cultivos

El muestreo de suelos y sus respectivas veinte muestras, se realizó en las parcelas que estaban siendo regadas por el agua de los pozos seleccionados. Con una pala se obtuvo una muestra representativa de los primeros 30 cm de profundidad previa inspección de campo y elegido el sitio que representara características homogéneas y que a la vez estuviera cercano al cultivo que también sería muestreado. Para caracterizar cada una de las muestras de suelo se analizaron los siguientes parámetros: textura, pH, materia orgánica, conductividad eléctrica, nitrógeno total, fósforo y potasio. Los métodos utilizados para el análisis del suelo son: para determinar el pH, lectura de potenciómetro en solución acuosa relación 1:2.5; para conductividad eléctrica lectura del extracto saturado en el puente de "Wheatstone"; para textura se usó el método del hidrómetro de Bouyoucos; para materia orgánica, método de combustión húmeda Walkley-Black modificado; para el nitrógeno total, método Kjeldhal; en caso del fósforo se usó el método de Olsen y para determinar la presencia de potasio espectrofluorimetría de emisión. Con respecto al muestreo de cultivos, se seleccionaron aquellos que eran regados con el agua de los pozos, diversos y representativos de lo que siembran los agricultores del valle: alfalfa, acelga, pepino, nopal, lechuga, calabacita, apio, chile, perejil, cilantro, coliflor e higo.

Método de digestión ácida para determinación de elementos en suelos y cultivos

Las muestras de suelo fueron pulverizadas y se tomaron de 0.1 a 0.5 g para la determinación de elementos totales (Pb, Mn, Cu, Fe y As). Las muestras se colocaron en recipientes de teflón de 150 mL previamente lavados con HNO_3 al 10 % por 24 y enjuagados con agua desionizada. En el procedimiento de digestión se lleva a cabo a reflujo. Se utilizó una placa de calentamiento con control de temperatura. Se corrió un blanco de método además de una muestra de estándar certificado MESS-2 (NRCC, Nacional Research Council of Canadá) únicamente como muestra de referencia. Para la

parte comestible de los cultivos se usó el método de digestión ácida a temperatura ambiente, que incluye un sistema cerrado indicado para metales que se volatilizan a las temperaturas de ebullición de soluciones ácidas. El cultivo seco fue digerido en recipientes de teflón de 150 mL previamente lavados con ácido (HNO_3 al 10 % por 24 hr) y enjuagados con agua desionizada. El peso total (0.05 g) del cultivo liofilizado se colocó en los recipientes se añadió 100 μL de HNO_3 concentrado por cada 2 mg de muestra. Los recipientes se cerraron con su tapa correspondiente y se dejaron en reposo al abrigo de la luz y del polvo, durante cinco días a temperatura ambiente. Se adicionaron 40 μL de peróxido de H_2O_2 30 % por cada 2 mg de muestra para optimizar la oxidación de la materia orgánica y se continuó con la digestión un día más en las mismas condiciones, hasta que se observó un aspecto traslúcido de la solución. El volumen de las muestras se ajustó con agua desionizada para obtener una concentración final de HNO_3 grado ambiental (Anachemia) al 10 % v/v. Las muestras se digirieron por triplicado y se corrió un blanco de método. La cuantificación de As, Cu, Pb, Mn y Fe en las muestras de agua, suelo y cultivo, fue determinada por espectrofotometría de absorción atómica, con horno de grafito (AAHG; Perkin Elmer, Modelo 3110 y Varian, Modelo Spectra 220Z con horno GTA 110Z); se utilizaron lámparas de cátodo hueco multielemento y por flama (AAF; VARIAN Spectr AA 220 FS).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los análisis del agua, suelo y cultivos obtenidos en este trabajo, se discuten según el uso agrícola. Aunque en algunos casos se observó en campo que el agua del pozo era también utilizada para uso doméstico y pecuario sin cumplir con las normas correspondientes, dicho análisis queda fuera de la discusión del presente estudio.

Análisis de aguas

Para analizar la información obtenida de los estudios fisicoquímicos así como de algunos los metales más importantes en el agua, se compararon los resultados con diversos criterios de calidad del agua para consumo público urbano (sólo por estar contenidos en la misma normativa) y para uso agrícola según los criterios ecológicos (CNA 2009). Se comparó el contenido máximo, mínimo y promedio de todos los parámetros (**Cuadro I**) y se determinaron los valores de aquellos pozos que excedían los límites permisibles. También se clasificó el agua con criterios de riego agrícola de acuerdo con la clasificación de Richards (1982) (**Cuadro II**).

En general, los resultados de los análisis muestran que los parámetros de coliformes totales, fecales, sólidos disueltos totales (SDT), sulfatos, cloruros y conductividad eléctrica (CE) exceden en algunas muestras (máximo o promedio) el límite para uso agrícola. En el sitio de estudio sólo se analizaron los metales plomo,

CUADRO I. CONTRASTE DE LOS CRITERIOS DE CALIDAD DEL AGUA Y LA CONCENTRACIÓN DE ALGUNOS PARÁMETROS ANALIZADOS

Parámetro (mg L^{-1})	Criterios ecológicos CE-CCA-001/89		Ley Federal de Derechos de Agua, 2009.		Concentraciones medidas en este estudio (nivel somero)		
	Fuente de abastecimiento para uso público urbano	Riego agrícola	Fuente de abastecimiento para uso público urbano	Riego agrícola	Máximo	Promedio	Mínimo
Arsénico	0.05	0.10	0.05	0.10	0.01	0.003	0.001
Cobre	1.00	0.20	1.00	0.20	0.05	0.01	0.003
Manganeso	0.10	-	0.05	0.20	0.01	0.01	0.004
Plomo	0.05	5.00	0.05	0.50	0.02	0.01	0.002
Hierro	0.30	5.00	0.30	5.00	0.08	0.02	0.01
Coliformes fecales (NMP/100 mL)	1000.00	1000.00	1000.00	1000.00	2400.00	964.05	3.00
Coliformes totales (NMP/100 mL)					2400.00	1085.70	3.00
Sólidos disueltos totales	500.00	500.00	500.00	500.00	1020.00	588.10	145.00
Sulfatos	500.00	130.00	250.00	250.00	371.28	124.01	10.00
Nitratos (NO_3 como N)	5.00		5.00	-	32.30	14.50	3.00
Nitritos (NO_2 como N)	0.05		0.05	-	0.054	0.009	0.003
Cloruros	250.00	147.50	250.00	150.00	261.32	113.24	9.68
Conductividad eléctrica (dS m^{-1})		1.00			2.02	1.16	0.28

■ Sobrepasa límite uso público □ Sobrepasa límite uso agrícola

CUADRO II. MÁXIMOS, PROMEDIOS Y MÍNIMOS DE PARÁMETROS QUÍMICOS OBTENIDOS EN LAS MUESTRAS DE AGUA

Muestra	pH	CE ($\mu\text{mhos cm}^{-1}$)	SDT	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	CO ₃ ²⁻
Máximo	7.74	2020.0	1020.0	180.0	54.2	245.0	58.1	0.0
Promedio	7.06	1163.8	588.0	91.5	32.0	114.0	16.2	0.0
Mínimo	6.54	287.0	145.0	35.0	6.9	26.5	2.7	0.0

Muestra	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	N-NO ₂ ³⁻	N-NO ₃ ⁻	Boro
Máximo	571.7	261.3	371.3	0.05	32.3	0.45
Promedio	347.8	113.2	124.0	0.01	14.5	0.39
Mínimo	157.7	9.7	10.0	0.003	3.0	0.35

manganeso, cobre, hierro y arsénico, debido al registro que tienen otros estudios respecto a la presencia de estos metales en el nivel somero del acuífero. Se observó en este estudio que existen concentraciones semejantes a las que se tenían registradas en estudios anteriores (Cardona y Carrillo 1993), y que ninguno de estos contenidos de metales excede los límites para el uso agrícola de acuerdo a las normas referidas. Respecto a los niveles de nitratos y nitritos encontrados, no se consideran restrictivos para uso agrícola dado que el nitrógeno encontrado en cualquiera de sus formas, es transformado o absorbido directamente por las plantas para cumplir con sus funciones fisiológicas. Sin embargo, debe considerarse un riesgo de salud pública cuando el agua es utilizada para consumo humano debido a la toxicidad de los nitratos.

En general se encontró que existen algunos pozos en los cuales las concentraciones máximas sobrepasan los límites permisibles de algunos parámetros para consumo humano (**Cuadro II**), sin embargo, siguen operando para fines agrícolas con el riesgo de salud inminente, principalmente el relacionado con los coliformes totales. Por otra parte, en lo que se refiere a la CE que representa la salinidad del agua, más del 60 % de las muestras superan los 1000 $\mu\text{mhos cm}^{-1}$, es decir más de un 1 dS m⁻¹ y con un pH cercano a la neutralidad. En relación con la dureza y los contenidos de Ca y Mg (grados hidrotimétricos franceses), al estar relacionados entre sí, se observa que casi un 70% de las muestras son clasificadas como aguas duras al exceder de 180 mg L⁻¹ de CaCO₃. Con respecto a los nitratos, prácticamente un 75 % de las muestras superan el límite establecido para uso urbano, sin embargo, para uso agrícola no tiene restricción. En el caso del oxígeno disuelto, este no influye

en aspectos agrícolas. En general, se puede inferir que los datos no pueden ser correlacionados entre cada uno de los parámetros, dado que pertenecen a distintas zonas y con distintas influencias en sus aportes hídricos. Incluso, aún cuando las muestras fueran separadas de acuerdo a su procedencia de acuíferos, sus características químicas son también diferentes (**Fig. 2**).

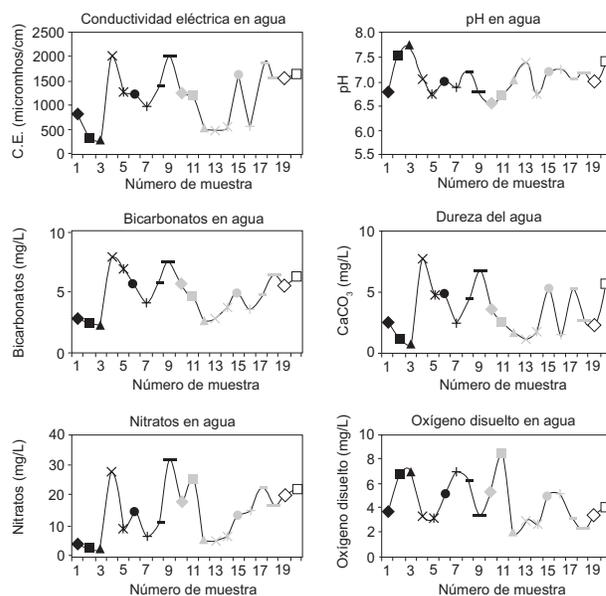


Fig. 2. Características hidroquímicas de las diferentes muestras

Así mismo, se puede observar mediante un mapa de ubicación espacial (**Fig. 3**), que para el caso de los SDT, existen zonas de mayor concentración en ambos acuíferos en los que se excede el límite para el uso de riego agrícola. Respecto al valor de

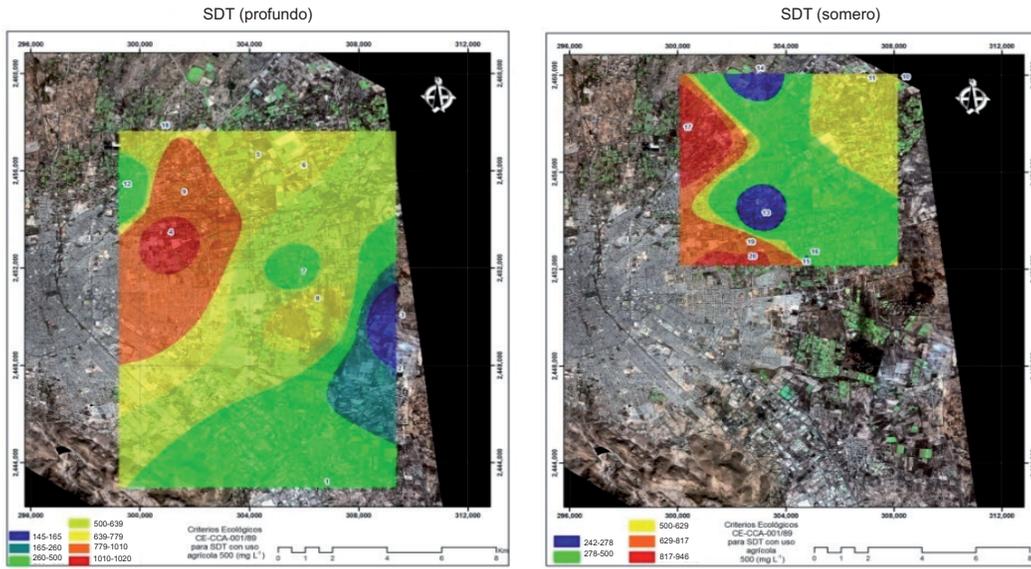


Fig. 3. Representación espacial de las características químicas del agua de mezcla muestras proveniente de los acuíferos profundos y someros en conjunto

la CE, los resultados igualmente no pueden ser correlacionados entre sí, sus características químicas proceden también de diferentes aportaciones (**Fig. 4**). Sin embargo, se puede observar que existen en ambos acuíferos, límites que restringen el uso de riego agrícola. Así mismo, la alta concentración de SDT puede ser explicada por la alta concentración de aniones y cationes expresada en términos de CE. Respecto al contenido de sulfatos, sus características químicas proceden también de diferentes fuentes y aportaciones (**Fig. 5**). Se puede observar que existen

zonas de mayor concentración en ambos acuíferos en los que se excede el límite para el uso de riego agrícola. En el caso de los coliformes fecales y totales, las muestras que excedieron los parámetros fueron obtenidas de pozos con agua proveniente del acuífero somero, lo que fue corroborado en campo. En este caso, el 60 % de dichas muestras presentan problemas de coliformes y en todas ellas se excede el límite (ausencia o no detectables) propuesto por la NOM-127-SSA-1994, lo que representa un problema potencial de salud.

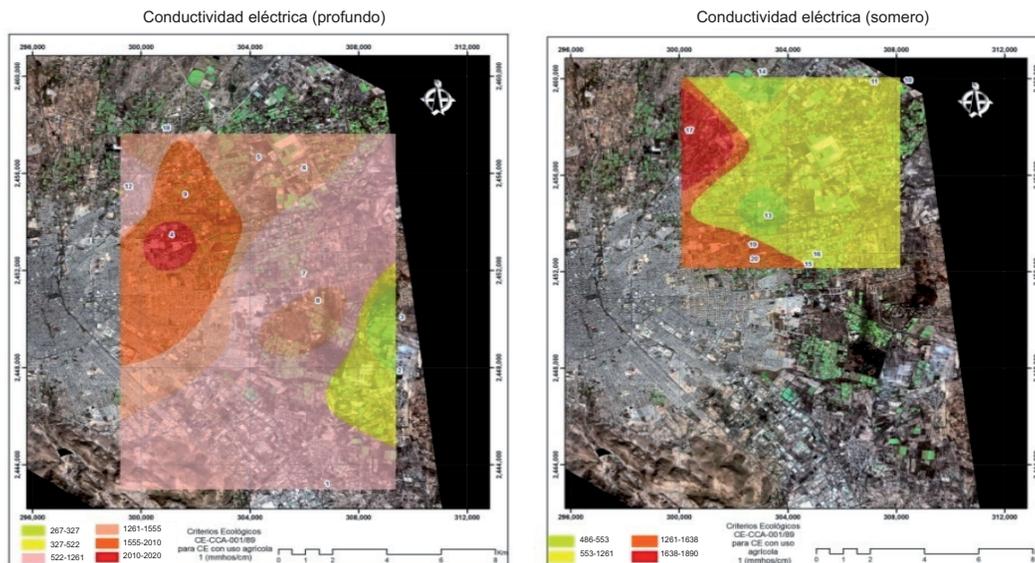


Fig. 4. CE del agua de mezcla proveniente del acuífero profundo y somero en conjunto

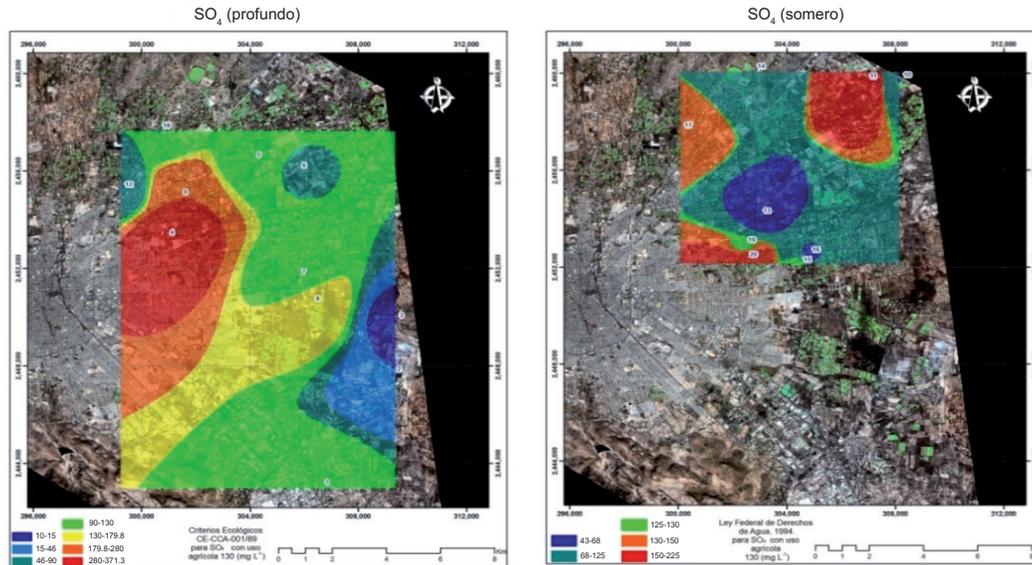


Fig. 5. Concentración de sulfatos del agua de mezcla proveniente del acuífero profundo y somero en conjunto

Calidad del agua para riego de acuerdo a las propiedades químicas

Con los parámetros obtenidos en los análisis de aniones y cationes, pH, CE y boro, se clasificó el agua de riego para uso agrícola según sus características químicas. La máxima, media y mínimo se presentan en la **cuadro II**. Dos de los parámetros más importantes para determinar la cantidad del agua para riego agrícola son los de CE y el Índice de la Relación de Adsorción de Sodio (RAS), con los que se establece una clasificación del agua para riego según las normas del Personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos (Richards 1982). De acuerdo con lo anterior se obtuvieron los índices más comunes y su clasificación para su uso agrícola (**Cuadro III**). Con base en los resultados anteriores, se consideran en su mayoría aguas altamente salinas y bajas en sodio, lo que restringirían su uso para la agricultura, aunque se pueden usar en cultivos tolerantes a la salinidad y con buenas condiciones de drenaje, también pueden ser usadas con sistemas de riego que permitan mantener continuamente un bulbo de humedad en el sistema de raíces. Es decir, su uso estaría condicionado al manejo del cultivo y con utilización de cultivos tolerantes o medianamente tolerantes a las sales. Sin embargo, Ayers y Westcot (1985), señalan en contraposición, que para los mismos niveles encontrados en este estudio, sólo existe un grado de restricción moderado para su uso en cultivos agrícolas. En general, en este trabajo no se encontraron restricciones por niveles de boro, cloruros ni sodio.

Análisis de suelos

Con respecto a los suelos, estos se analizaron de acuerdo a su uso agrícola, se obtuvieron parámetros de propiedades físicas y químicas, que determinan el grado de fertilidad (**Fig. 6**). También se analizaron algunos elementos traza que desde el punto de riesgo ambiental pueden ser perjudiciales para los cultivos y para consumo animal, dado que dichos suelos han sido regados con aguas de muy baja calidad provenientes del acuífero somero cuyo origen en algunos casos son aguas provenientes de descargas industriales. De acuerdo al pH, se observó que el 95 % de los suelos tienen un nivel tendiente a la alcalinidad mayor de 8.0. No está claro el origen de la misma, dado que el pH del agua oscila entre 6.5-7.5, por lo que más bien puede estar referido a la composición mineral primaria del suelo. La importancia de este valor radica en que por encima del pH 7, la mayoría de los macro y micronutrientes es menor, lo que representaría una disminución en el rendimiento de los cultivos. Respecto a la conductividad eléctrica, se muestra que los suelos son no salinos, aún cuando en el agua de riego fue encontrado un alto contenido de sales. Esto puede deberse a que los suelos son en su mayoría migajón arenosos con un buen drenaje interno. La concentración de sales en los suelos analizados no representa un riesgo para que los cultivos se vean limitados por exceso de sales. De acuerdo con la materia orgánica analizada, el 95 % de los suelos están dentro del rango normal de materia orgánica (MO). Como se sabe la MO contribuye a que se presenten condiciones favorables de humificación en los suelos y que mejore la

CUADRO III. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS DE AGUA Y SU RELACIÓN CON LOS PARÁMETROS QUE DETERMINAN CALIDAD DE AGUA PARA RIEGO AGRÍCOLA

Nº Muestra	Parámetros, índices y calidad					
	CE (mmhos cm ⁻¹)	% HCO ₃	CSR	RAS	SE	Clasificación
1	0.836	39.93	0.00	2.03	5.48	C3-S1
2	0.327	80.83	0.79	1.48	1.79	C2-S1
3	0.287	81.45	1.04	1.83	1.79	C2-S1
4	2.020	42.13	0.00	2.12	9.99	C3-S1
5	1.273	59.94	0.00	1.28	5.23	C3-S1
6	1.261	57.49	0.00	1.25	4.43	C3-S1
7	0.977	47.69	0.00	0.91	4.68	C3-S1
8	1.403	48.31	0.00	2.47	8.04	C3-S1
9	2.010	43.26	0.00	2.64	10.80	C3-S1
10	1.261	60.68	0.00	1.92	5.13	C3-S1
11	1.216	47.27	0.40	3.59	7.15	C3-S1
12	0.522	57.09	0.00	1.59	2.66	C2-S1
13	0.486	73.94	0.94	1.80	2.60	C2-S1
14	0.546	68.68	0.72	1.30	2.74	C2-S1
15	1.638	38.63	0.00	1.36	6.45	C3-S1
16	0.553	60.75	1.38	2.72	4.10	C2-S1
17	1.890	34.54	0.00	2.66	8.96	C3-S1
18	1.555	55.53	2.30	3.74	8.33	C3-S1
19	1.578	50.46	2.01	5.14	8.77	C3-S2
20	1.638	41.56	0.00	2.66	11.11	C3-S1

CE: Conductividad eléctrica; RAS: relación de adsorción de sodio; %HCO₃: porcentaje de bicarbonatos; SE: salinidad efectiva; CSR: carbonato de sodio residual

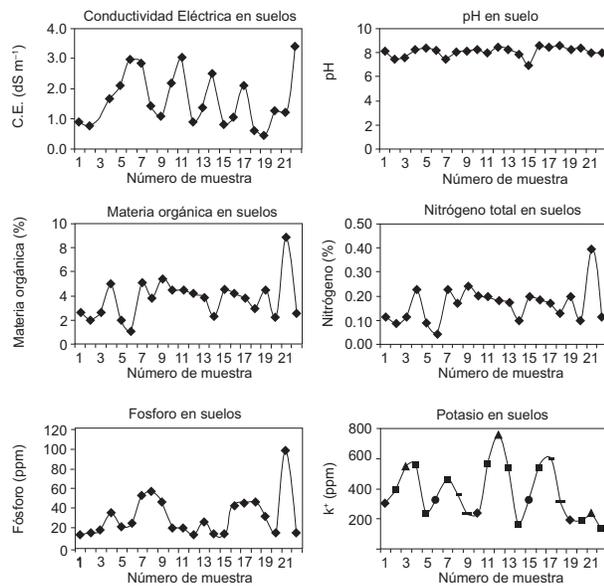


Fig. 6. Resultados de CE, pH, MO, N total, P y K del análisis del suelo

condición del medio de crecimiento de los cultivos. A partir de estos datos se estimó el N total, aunque este dato no es útil para diagnosticar la disponibilidad de este nutrimento en el suelo, representa un índice estimable y comparable. En general, el N favorecerá el desarrollo del cultivo debido a que se utiliza para la síntesis de clorofila además de ser un componente de las vitaminas y sistemas de energía al aumentar el contenido de proteínas de las plantas en forma directa (Reuter *et al.* 1986).

De acuerdo con los datos de Hall (2008) y Castellanos *et al.* (2000), las concentraciones de fósforo son favorables para el crecimiento de los cultivos en esta zona. La concentración de P es muy rica en más del 60 % de las muestras, con un valor mayor a 25 mg Kg⁻¹. En el caso del potasio (K), el rango está entre 500 y 1500 mg kg⁻¹. Esto significa que los resultados de K encontrados en el presente estudio, en su mayoría se encuentran en niveles suficientes en el suelo. Por lo tanto, en términos generales suelos presentan condiciones de suficiencia de elementos nutritivos para la práctica de la agricultura.

Metales en suelos, agua y cultivos

Por otra parte, los metales pesados, están presentes naturalmente en los suelos, pero en los últimos años actividades industriales y residuos de todo tipo han contribuido a una acumulación de estos elementos en este medio (Giuffré 2005). Con base en la NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y vanadio, no se encontraron en el presente estudio concentraciones que excedieran la NOM de 22 mg kg⁻¹ para el caso del As ni la de 400 mg kg⁻¹ para el caso del Pb. Las concentraciones de los metales detectadas en suelos de los sitios que se muestrearon se presentan en el **cuadro IV**. De acuerdo con estos datos, se puede observar que para el caso del As, Pb y Cu, los valores encontrados se encuentran dentro de rangos máximos aceptables y no se consideran fitotóxicos con base en Pais y Jones (1997) y Kabata-Pendias (1993), quienes señalan que las concentraciones máximas aceptables en el suelo oscilan para el As entre 15 y 50 mg kg⁻¹, Pb entre 50 y 100 y para el Cu entre 50 y 100. Para el Mn, un elemento esencial para las

plantas, se encuentra en el suelo en diversos niveles que van de 20 hasta 3000 mg kg⁻¹ y con un promedio de 600 mg kg⁻¹. Su disponibilidad variará según la forma en la que esté químicamente presente lo que afectará su disposición y absorción por las plantas. También el pH afectará su disponibilidad, cuanto mayor sea éste menos disponible se encuentra. Por último, el Fe, que representa el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre, se puede encontrar como reserva total desde 0.7 %, en promedio de 4 a 7 % (70 000 mg kg⁻¹) o incluso mucho más en función del origen del suelo, lo que significa que todas las muestras analizadas en el presente estudio se encuentran dentro de este rango. Finalmente, la concentración de algunos metales también analizados en agua y suelo, muestran que la absorción de los mismos por los cultivos puede ser muy variable en función de la especie. Cada cultivo tiene requerimientos específicos de cada elemento y la forma en la que se traslocan los elementos y son utilizados para sus funciones metabólicas también son distintos. En el **cuadro V**, se presenta la concentración encontrada de As, Pb, Mn, Cu y Fe en cada uno de los cultivos y puede ser contrastada con valores generales proporcionados por Jones (1998), quien señala que para el

CUADRO IV. CONCENTRACIÓN DE METALES EN EL SUELO (mg/kg)

Muestra	As	Pb	Mn	Cu	Fe
1	0.849	18.01	260.74	88.16	11685.47
2	0.302	16.77	244.14	114.88	39550.51
3	0.541	13.56	265.46	84.27	23848.37
4	1.208	13.18	355.52	119.22	7794.26
5	0.973	13.17	362.25	66.8	8137.87
6	0.785	9.88	348.73	67.88	10111.84
6 ^a	0.856	17.94	343.59	59.84	10530.06
7	1.243	19.06	323.29	103.53	23846.47
8	0.458	10.31	440.39	69.21	15617.38
9	0.493	11.24	187.80	98.81	10086.61
10	0.969	22.09	248.49	66.07	9648.37
11	1.243	13.52	359.18	93.68	7546.39
12	0.771	10.83	223.02	51.75	<0.0064
13	1.174	15.25	393.03	49.66	14577.11
13a	0.946	12.75	280.08	65.36	8084.05
14	0.727	20.72	298.23	73.92	5308.57
15	0.699	11.25	353.20	91.15	15844.44
16	0.772	18.81	319.75	74.47	6961.62
17	1.033	10.72	98.17	70.49	4174.16
18	0.722	22.11	282.51	90.34	14031.86
19	0.505	15.04	324.3	65.8	9955.03
20	1.243	17.73	264.38	59.88	8966.87

CUADRO V. CONCENTRACIÓN DE METALES EN CULTIVOS

Cultivo	mgAs/kg	mgPb/kg	mgMn/kg	mgCu/kg	mgFe/kg
Acelga	0.37	8.23	159.14	63.42	150.76
Higo	1.11	1.93	7.12	9.59	0.006
Nopal	0.14	1.88	309.82	14.89	0.006
Lechuga	0.002	3.34	78.45	22.54	148.11
Calabacita	0.002	2.40	22.53	12.05	0.006
Pepino	0.002	2.56	25.55	12.08	0.006
Apio	0.002	3.15	25.22	8.78	0.006
Chile	0.002	1.22	10.91	0.006	0.006
Perejil	0.002	1.99	59.61	19.78	86.07
Alfalfa	0.08	1.84	46.67	29.83	193.82
Cilantro	0.002	2.80	35.93	17.89	83.91
Coliflor	0.002	1.61	23.53	10.65	35.17

As un nivel de suficiente a tóxico será entre 1 y 1.7 mg kg⁻¹. En el presente estudio no se encontraron niveles que excedan este valor; para el Pb los niveles son de 5 a 10 mg kg⁻¹, de igual forma no se exceden dichos límites; en el caso del Mn los niveles son de 20 a 300 mg kg⁻¹; para el Cu los niveles son de 5 a 30 mg kg⁻¹, en este caso sólo la acelga presenta un exceso de Cu, sin embargo está considerada como tolerante a este elemento; finalmente el rango normal generalizado para el Fe es de 100 a 500 mg kg⁻¹ lo que permite señalar que todos los niveles encontrados son normales para estos cultivos. Se advierte que las concentraciones varían de acuerdo a la especie, calidad de agua y condiciones del suelo, y que las plantas son receptoras pasivas de oligoelementos absorbidos por las raíces (Jones 1998), pero que para este estudio no representan un riesgo.

CONCLUSIONES

Para el caso del agua de uso agrícola, algunas muestras excedieron los límites de coliformes fecales, sulfatos, sólidos totales y salinidad (expresada como conductividad eléctrica). Exceptuando las aguas con coliformes, estas pueden ser utilizadas en cultivos forrajeros u hortícolas bajo condiciones de manejo de riego, suelos y cultivos normales. Esto se verá favorecido por las características del suelo, el cual tiene un buen drenaje interno. En general, sólo cultivos sensibles a las sales podrían verse afectado en el rendimiento. También en el caso de las muestras que excedieron el valor de 3 de la RAS, pueden tener problemas con el riego por aspersión, no así con el sistema de riego por goteo o de gravedad. Esto significa que dependerá en gran medida del cultivo, del manejo del agua o

del sistema de riego, del suelo y de su manejo para que pueda ser considerada una restricción el sistema agrícola actual. En el caso específico de las aguas encontradas con coliformes fecales, sólo se deberían utilizar en cultivos forrajeros con las restricciones sanitarias que marcan las normas. Respecto a las concentraciones de nitrógeno (como nitratos) en agua para usarse en riego agrícola, no existe inconveniente en que presente concentraciones altas ya que el nitrógeno es aprovechado por los cultivos en su desarrollo. Sin embargo, se deben de tener presentes estos valores cuando se utilicen fertilizantes, ya que se considera que al utilizar 700m³ ha⁻¹ de agua de riego, con una concentración de 25 mg L⁻¹ de nitratos aportaría 40 kg de N por ha al suelo, y puede ser factible un ahorro en el fertilizante y disminuir el riesgo de contaminación. Los cultivos del lugar de acuerdo con la información de este estudio, no están incorporando a sus tejidos un exceso de los metales analizados, dado que se encuentran en grados de suficiencia tanto a nivel de suelo como de cultivos. Es necesario realizar un análisis más amplio de elementos traza tanto en agua como en suelos y cultivos para observar si existen otros elementos que sí puedan causar un problema de salud. Esto es esencial para prevenir la acumulación excesiva de metales en la cadena alimentaria (Bahemuka y Mubofu, 1999). A partir de este estudio, puede darse la pauta para analizar todo el sistema agua suelo planta con mayor detalle en algunos de los elementos que hasta ahora sólo se han realizado al agua. Aunque se cuenta con la NOM-147 para suelos contaminados, es necesario contar con estándares de calidad así como de normas que dictaminen los límites permisibles para el uso de suelos agrícolas y calidad de cultivos para consumo humano, de tal forma que no se dificulte tomar decisiones.

REFERENCIAS

- Ayers R.S. y Westcot D.W. 1985. *Water quality for agriculture*. FAO. Irrigation and Drainage Series. Roma.
- Baccaro K., Degorgue M., Lucca M., Picone L. y Zamuner E. 2006. *Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del cinturón hortícola del Mar de la Plata*. INTA, Argentina. RIA, vol. 35(3).
- Bahemuka T. E. y Mubofu E.B. 1999. *Heavy metals in edible green vegetables grown along the sites of the Sinza and Msimbazi rivers in Dar es Salaam, Tanzania*. Food Chem. 66, 63-66.
- Benton, J.J. Jr. 1998. *Plant Nutrition Manual*. CRC Press.
- Castellanos J.Z., Uvalle B.J.X. y Aguilar S.A. 2000. *Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas*. Colección INCAPA. México.
- Cardona B. A. y Carrillo J.J. 1993. Elementos traza: contaminación y valores de fondo en aguas subterráneas de San Luis Potosí, México. Geofis. Int. 32, 277-286.
- Carrillo-Rivera J.J., Cardona A. y Edmunds W.E. (2002). Using extraction regime and knowledge of hydrogeological conditions to control high-fluoride concentration in obtained groundwater: San Luis Potosí basin, Mexico. J. Hydrol. 261, 24-47
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 2009. Ley Federal de Derechos en Materia de Agua. Diario Oficial de la Federación. 27 de noviembre de 2009. México.
- COTAS 2005. Estudio técnico del acuífero 2411, Comité Técnico de Aguas Subterráneas, San Luis Potosí. México. México. ftp://ftp.consejosdecuencia.org.mx/pub/downloads/CCA/E_T_SLP.pdf.
- Diario Oficial de la Federación. 2006. *NOM-147-SEMAR-NAT/SSA1-2004, Que establece criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio*. Secretaría de Salud. México. México, D.F. 26 de abril de 2006.
- Diario Oficial de la Federación. 1996. *Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización*. Secretaría de Salud. México. México, D.F. 18 de enero de 1996.
- Giuffré L., Ratto S., Marbán L., Schonwald J. y Romaniuk R. 2005. *Riesgo por metales pesados en horticultura urbana*. Cienc. Suelo 23, 101-106.
- Hall, R. 2008. *Soil essentials: managing your farm's primary asset*. Landlinks Press Series. CSIRO Publishing.
- Hurtado J.R. y Gardea T.J. 2005. Estimación de la exposición a fluoruros en Los Altos de Jalisco, México. Salud Pública México 47, 58-63.
- Jones J.B. Jr. 1998. *Plant nutrition manual*. CRC Press LLC. Boca Raton, Fl.
- Kabata-Pendias A. y Pendias H. 1993. *Biogeochemistry of trace elements*. Wyd. Nauk. PWN, Varsovia.
- Morris B.L., Laurence A.R.L., Chilton P.J.C., Adams B., Calow R.C. y Klinck B.A. 2003. Groundwater lands its susceptibility to degradation: A global assessment of the problem and options for management. Early warning and assessment report series, RS 03-3. Unites Nations Environment Programme. Nairobi, Kenia.
- Muñoz H., Armienta A., Vera A. y Cenicerros, N. 2004. Nitrato en el agua subterránea del valle de Huamantla, Tlaxcala. Rev. Int. Contam. Ambie. 20, 91-97.
- Pais I. y Jones B.J.Jr. 1997. The handbook of trace elements. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Reuter D.J. y Robinson J.B. 1986. *Plant analysis. An interpretation manual*. Inkata Press, Australia.
- Richards I.A. 1982. Diagnostico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual de agricultura número 60. USDA. Estados Unidos de America
- Scout Ch. y Raschid L. 2004. Wastewater use in irrigated agriculture. Confronting the livelihood and environmental realities. CAB International.
- Trejo V. R. y Bonilla P. A. 2001. *Exposición a fluoruros del agua potable en la ciudad de Aguascalientes, México*. Rev. Panam. Salud 10, 108-113.