

BORO, FOSFATOS E ÍNDICES DE SALINIDAD DEL SISTEMA HIDROGRÁFICO ZAHUAPAN-ATOYAC, MÉXICO

• David Vinicio Carrera-Villacrés • Héctor Manuel Ortega-Escobar •
• Jazmín Ramírez-García • Carlos Ramírez-Ayala •
• Carlos Trejo-López • Alberto Enrique Becerril-Román •
Colegio de Postgraduados, México

Resumen

Para satisfacer las necesidades agrícolas en los estados de Tlaxcala y Puebla, México, se utilizan aguas provenientes del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, las cuales derivan de escurrimientos de las sierras de Tlaxco y Calpulalpan, en la localidad de Panzacola del estado de Tlaxcala. Durante su trayecto, los ríos Zahuapan y Atoyac reciben afluentes de numerosas poblaciones de los valles de Tlaxcala y Puebla. Los objetivos de este trabajo fueron conocer la salinidad, los problemas de infiltración e iones tóxicos, para entender los efectos de estas aguas sobre las propiedades físicas de los suelos y cultivos. La investigación fue no experimental transversal descriptiva, con el muestreo a juicio en 42 estaciones en invierno de 2006 y 48 en primavera de 2007. Se determinaron trece mediciones en cada muestra de agua: cationes y aniones, pH, conductividad eléctrica (CE), presión osmótica (PO), fosfatos y boro. Se calcularon las diferentes modificaciones de la relación de adsorción de sodio (RAS), las cuales fueron RAS , RAS_{aj} y RAS^o . La conductividad eléctrica en los orígenes de estas aguas fue de 115 a 400 $\mu S\ cm^{-1}$ y cuando éstas recibieron afluentes urbanos industriales, sus valores fueron de 500 a 2 100 $\mu S\ cm^{-1}$. La concentración de bicarbonatos fue de 0.55 a 16.5 $mmol\ l^{-1}$; mayor que 50% con respecto a la suma de aniones. El pH varió de 6.5 a 9.3. Los valores máximos de fosfatos y boro fueron de 7.89 y 1.84 $mg\ l^{-1}$, respectivamente. Así, la salinidad sódica del sistema hidrográfico aguas abajo se debe a la contribución antropogénica.

Palabras clave: intercambio catiónico, eutrofización, sodicidad, RAS y PSI.

Introducción

El agua se agota en todo el mundo y su principal destino es la agricultura, con el 70% del total del agua utilizada (Metcalf, 2000). La red hidrográfica Zahuapan-Atoyac riega cultivos en los valles de Zacatelco-Tlaxcala y, parcialmente, en el valle de Tepeaca-Tehuacán. El monitoreo de la calidad del agua es importante para controlar y detectar puntos de contaminación en los ríos (Hahn *et al.*, 2006). La presencia de Na^+ en las aguas de riego conduce a que, de manera paulatina, éste aumente en la solución del suelo y se tengan cambios en las relaciones catiónicas de los sitios de intercambio (Ruiz y Wu, 2006).

Existen varios estudios sobre los procesos de intercambio catiónico $Na^+-Ca^{2+}-Mg^{2+}$, en condiciones de equilibrio químico, y éstos se han explicado en términos termodinámicos, aplicando la ley de acción de masas, la teoría estadística termodinámica y la teoría de la doble capa eléctrica. Las ecuaciones obtenidas de estos estudios se aplicaron para describir la relación entre los cationes solubles en la solución de los suelos y aquellos cationes que se encuentran adsorbidos en la fase sólida de los suelos. La ecuación de Gapon, utilizada ampliamente en el manejo de las aguas y suelos salinos, ha mostrado resultados bastante satisfactorios (Endo *et al.*, 2002). En trabajos de investigación

se encontró que el RAS de las aguas de riego está altamente correlacionado con el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) en los sitios de intercambio cuando el suelo está en equilibrio con el agua de riego (Parker y Suarez, 1990).

Debido a que la concentración de Ca^{2+} varía sensiblemente como consecuencia de los procesos de precipitación o disolución, las formulaciones del RAS que se utilizan con más frecuencia en el manejo de aguas y suelos salinos son RAS y relación de adsorción de sodio ajustado y corregido (RAS_{aj} y RAS°). En este trabajo, para evaluar la calidad del agua del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac se utilizaron estos tres estimadores. Por lo general, las aguas urbano-industriales contienen cantidades altas de fósforo (P-PO_4), que modifican considerablemente los niveles de eutrofización de estas aguas. Por otra parte, como en los valles de Zacatelco-Tlaxcala y Tepeaca-Tehuacan se cultivan áreas de hortalizas, se determinaron las concentraciones de boro, ya que es un micronutriente esencial para el crecimiento de las plantas y potencialmente tóxico (Goldberg *et al.*, 2000).

Aspectos teóricos

Cuando las aguas de riego, sobre todo las urbano-industriales, contienen concentraciones apreciables de bicarbonato (HCO_3^-), es de preverse que algunas cantidades de éste se precipiten, juntamente con el Ca^{2+} , en forma de carbonato de calcio (CaCO_3), de acuerdo con la ecuación siguiente:



Este proceso de precipitación, en principio, causa una disminución de las sales solubles en las soluciones salinas; al mismo tiempo se aumenta la proporción de Na^+ en la solución de los suelos y, por consiguiente, en el complejo de intercambio catiónico (Manahan, 2007).

Para considerar la precipitación o la disolución del CaCO_3 en condiciones de CO_2 constantes, se utiliza el índice de saturación

(IS) de Langelier (Ribeiro *et al.*, 2005), el cual se define como el pH actual medido del agua (pHa) menos el pH teórico (pHc) que el agua debería tener en condiciones de equilibrio con el CaCO_3 .

$$\text{Índice de saturación} = \text{pHa} - \text{pHc}$$

Valores positivos de este índice indican que el CaCO_3 se precipitará en la solución, mientras que valores negativos indicarán que el agua disolverá fracciones de CaCO_3 . Para calcular el pHc , a partir de los análisis del agua, se utiliza la ecuación:

$$\text{pHc} = (\text{pK}'_2 - \text{pK}'_c) + \text{pCa} + \text{pAlk}$$

Los últimos dos términos de esta ecuación son los logaritmos negativos de la concentración molar de Ca^{2+} y la concentración equivalente de las bases titulables de $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$, respectivamente; mientras que pK'_2 y pK'_c son los logaritmos negativos de la segunda constante de disociación del H_2CO_3 y la constante de solubilidad del CaCO_3 , respectivamente, ambas constantes corregidas por fuerza iónica. Los valores que se pueden adquirir de pHc de cualquier conjunto de aguas de riego serán los estimadores de la tendencia de la precipitación del CaCO_3 . El RAS_{aj} se presenta como sigue:

$$\text{RAS}_{\text{aj}} = \text{RAS}[1 + (8.4 - \text{pHc})]$$

En el RAS° , la concentración de los iones de calcio en el agua de riego está en equilibrio con el suelo, tomando en cuenta el efecto del CO_2 y la concentración de HCO_3^- . Se considera que la concentración parcial de CO_2 es de 70.93 Pa. El RAS° puede utilizarse para predecir mejor los problemas de infiltración en ciertas condiciones de aguas de riego, que tienen concentraciones relativamente altas de Na^+ y bajas cantidades de Ca^{2+} (Velázquez *et al.*, 2002).

El RAS que se calcula sin tomar en cuenta la precipitación de Ca^{2+} en presencia de cantidades considerables de HCO_3^- se determina de

acuerdo con la ecuación de Gapon (Sposito y Mattigod, 1977):

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}}$$

La concentración está expresada en mmol L⁻¹ o meq L⁻¹, ambas equivalentes.

En la evaluación de la calidad del agua se relacionan las concentraciones de diferentes factores físicos y químicos, su efecto favorable o adverso en las comunidades acuáticas; sin embargo, su estudio debe ser práctico y económico (López *et al.*, 2007). Un especialista en manejo de aguas y suelos salinos debe calcular los tres estimadores del RAS, para visualizar qué fracciones de Na⁺ intercambiable se van a tener en el complejo de intercambio catiónico del suelo.

El objetivo del presente trabajo se relaciona con conocer la salinidad, los problemas de infiltración y la toxicidad por iones específicos de las aguas de los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac, así como establecer la distribución de iones desde las formaciones de los cauces hasta los valles de aprovechamiento agrícola, en invierno de 2006 y primavera de 2007. En las clasificaciones más recientes sobre la calidad del agua de riego se toma en cuenta la concentración de HCO₃⁻, sobre todo si es mayor de 50%, con respecto al total de aniones. En irrigación es necesario estudiar la composición química de las aguas para determinar el tipo de salinidad dominante, sobre todo si éstas trasladan efluentes de zonas urbanas, ya que la salinidad puede afectar los suelos y el rendimiento de los cultivos a través del tiempo.

Materiales y métodos

El estudio se realizó en los estados de Tlaxcala y Puebla (figura 1). La investigación no experimental transversal descriptiva y el muestreo a juicio de acuerdo con Kerlinger y Lee (2002) se usaron para tomar muestras de agua en 42

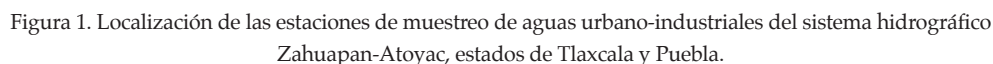
estaciones en el invierno de 2006 y en 48 en la primavera de 2007, para un total de 90. El recorrido inició desde los escurrimientos de las sierras de Tlaxco y Calpulalpan, en donde nacen los ríos Atoyac y Zahuapan, y terminó en los valles donde se aprovecha para irrigación. Se tomó en pozos y manantiales, antes de que el río pasara por las zonas urbanas y después de que pasara por las mismas, para conocer el incremento en la salinidad. En cada estación de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac se tomaron por duplicado muestras de agua con un volumen de 0.5 l. El envase de recolección de la muestra de agua se enjuagó varias veces, con el agua sujeta a muestreo. Los diferentes iones se determinaron analíticamente, utilizando los métodos citados en APHA (1995), que son: pH, conductividad eléctrica (CE), Ca²⁺ + Mg²⁺, Na⁺ y K⁺, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻ y SO₄²⁻ (métodos 4500-H⁺B, 2510 B, 3500 Ca D, 3500 Na K D, 2320 B, 4500 Ci B, 4500-SO₄ B, 2540 D y 2540 E). Para determinar la concentración de boro se utilizó el método de la azometina-H⁺, en el rango de 0.5 a 10 µg ml⁻¹ (Keren, 1996). La determinación de fosfatos se llevó a cabo de acuerdo con Rodier (1990); en medio ácido y en presencia de molibdato amónico, los fosfatos forman un complejo fosfomolibdico que, reducido por el ácido ascórbico, desarrolla una coloración azul, susceptible de una determinación colorimétrica.

La determinación de la presión osmótica se hizo con el equipo VAPRO 5520.

Resultados y discusión

La relación total de sales solubles (mg l⁻¹)-conductividad eléctrica (µS cm⁻¹) y su significado

La calidad del agua de riego está predeterminada por la concentración y composición de los iones constituyentes que se encuentran disueltos en dicha agua. Por este motivo, es importante la determinación analítica de las diferentes relaciones iónicas que se tienen en las aguas de riego en sus diferentes cauces, para comprender los procesos de salinización y



La función lineal expresa una proporcionalidad directa; es decir, que si se aumenta la cantidad de sales solubles, también se incrementa el valor de conductividad eléctrica. Esto se debe a que la solubilidad de los cationes y aniones de las sales solubles ocurre en forma equivalente. La suma de cationes es igual a la suma de aniones. El valor que puede adquirir a depende del tipo de sal soluble disuelto en la solución. El valor de a para todas las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac fue de 0.7145.

El valor de a depende de la composición cualitativa de la solución; por ejemplo, para composiciones bicarbonatadas, el valor de a es de 0.700–0.850. En la composición iónica de esta

Ciencias del Agua, vol. II, núm. 2, abril-junio de 2011

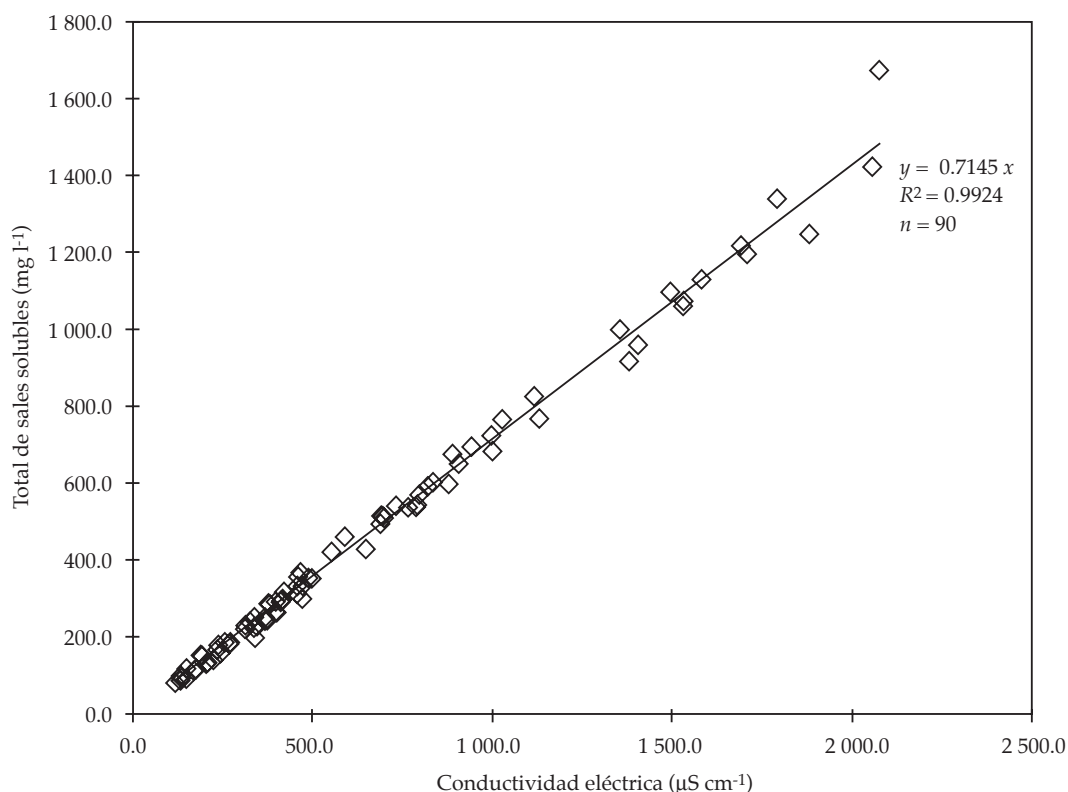


Figura 2. Relación entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la concentración de sales (mg l^{-1}) de todas las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico.

agua predominan HCO_3^- , Cl^- y SO_4^{2-} . En cambio, cuando la relación iónica $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 1.0$, el agua de riego es de composición clorhídrica. En el caso de composiciones sulfáticas, las relaciones iónicas son las siguientes: $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-} < 1.0$ y $\text{HCO}_3^-/(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}) > 1.0$; en estos casos, el valor de a está entre 0.900 y 1.300. La concentración de las aguas urbano-industriales del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac es, en su mayoría, de 100-500 $\mu\text{S cm}^{-1}$, para las aguas de origen inicial en su cauce o de origen de manantial, y de 500 a 2 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$ para aguas de cauces hacia donde fluyen corrientes urbano-industriales. Entonces se puede concluir que en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac predominan las sales del tipo bicarbonatadas sódicas; este tipo de sal afecta en el transcurso del tiempo la estructura del suelo y los rendimientos de los cultivos, lo

que hace indispensable tener obras de drenaje para mitigar dicho problema.

En la figura 3 se indica la distribución espacial de la salinidad con base en la conductividad eléctrica y la clasificación de acuerdo con los límites propuestos por Richards (1962). De 0 a 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$ corresponde a C1, un agua de baja salinidad; puede usarse para riego de la mayor parte de los cultivos en cualquier tipo de suelo, con poca probabilidad de que se desarrolle salinidad. De 250 a 750 $\mu\text{S cm}^{-1}$ corresponde a C2, un agua de salinidad media; puede usarse siempre y cuando haya un buen drenaje; sin necesidad de prácticas especiales, se pueden producir plantas moderadamente tolerantes a las sales. De 750 a 2 250 $\mu\text{S cm}^{-1}$ corresponde a C3, un agua altamente salina, no puede usarse en suelos sin drenaje y se deberán seleccionar cultivos muy tolerantes

a las sales. En la figura 3 se puede observar que en las sierras de Tlaxco y Calpulalpan, en donde se origina el sistema hidrográfico, se tienen aguas de baja salinidad C1; conforme avanzan a la zona media del sistema, las aguas se clasifican como C2, llegando a C3 en la zona baja. Sin embargo, en la región de Apizaco se debe tener especial cuidado, ya que las aguas son altamente salinas por las descargas urbano-industriales. Al final de la presa Manuel Ávila Camacho se tienen aguas C2, esto se debe al tratamiento primario natural de las mismas.

La presión osmótica. Una propiedad coligativa de las soluciones salinas

En la figura 4 se presenta la relación entre PO y CE de las soluciones que circulan en los suelos. Esto es importante, ya que la

tolerancia de los cultivos a las condiciones de salinidad se estima con base en la CE y PO, o potenciales osmóticos (Sánchez *et al.*, 2003; Flores *et al.*, 2005; Donoso y Latorre, 2006). La PO es una de las propiedades coligativas de las soluciones salinas. La CE y la PO dependen del número de partículas que se encuentran en la solución salina. El valor de la PO de las diferentes estaciones de muestreo del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac varió de 5.05 a 97.35 kPa, sin embargo, se encontró que la PO del agua de los manantiales y los cauces en los orígenes de los ríos Zahuapan y Atoyac presentó valores bajos, y solamente cuando los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac reciben aguas de descarga urbano-industriales, la PO de las mismas se incrementa, registrándose valores de 61.96 a 97.35 kPa. Las aguas del sistema Zahuapan-Atoyac riega la zona

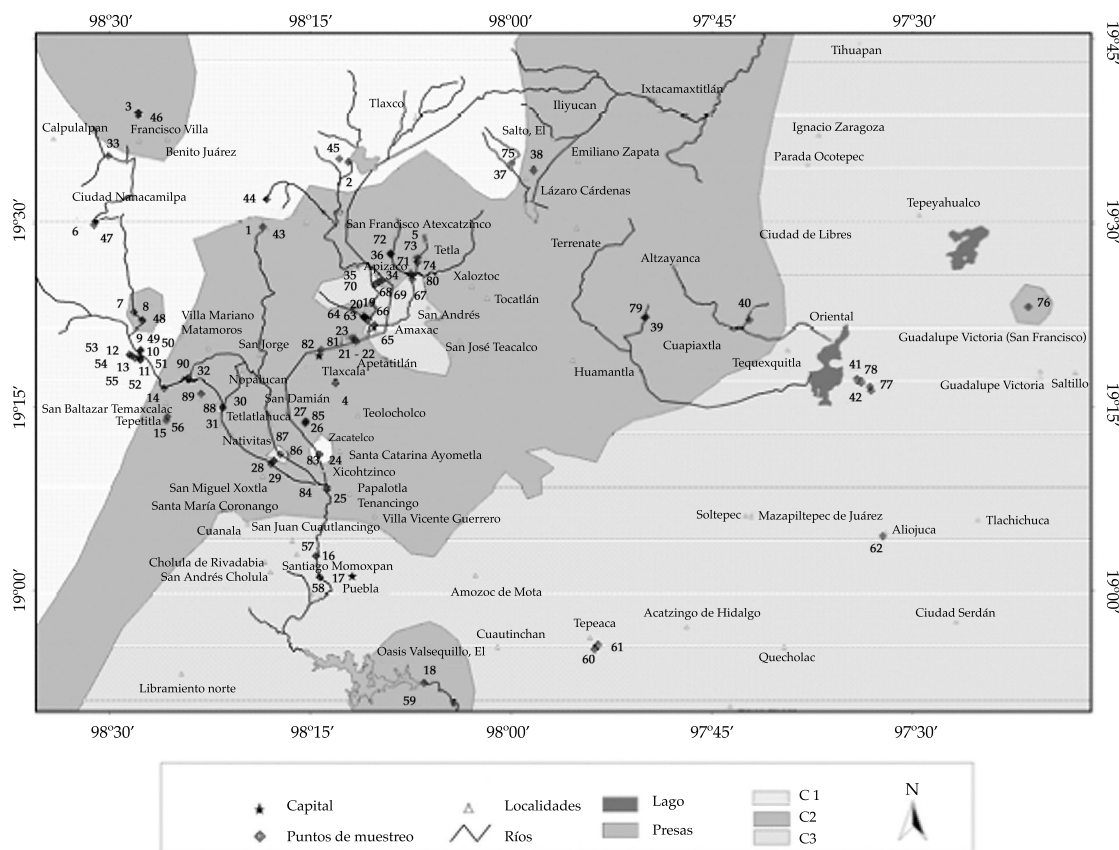


Figura 3. Distribución espacial de la salinidad con base en la conductividad eléctrica de las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico.

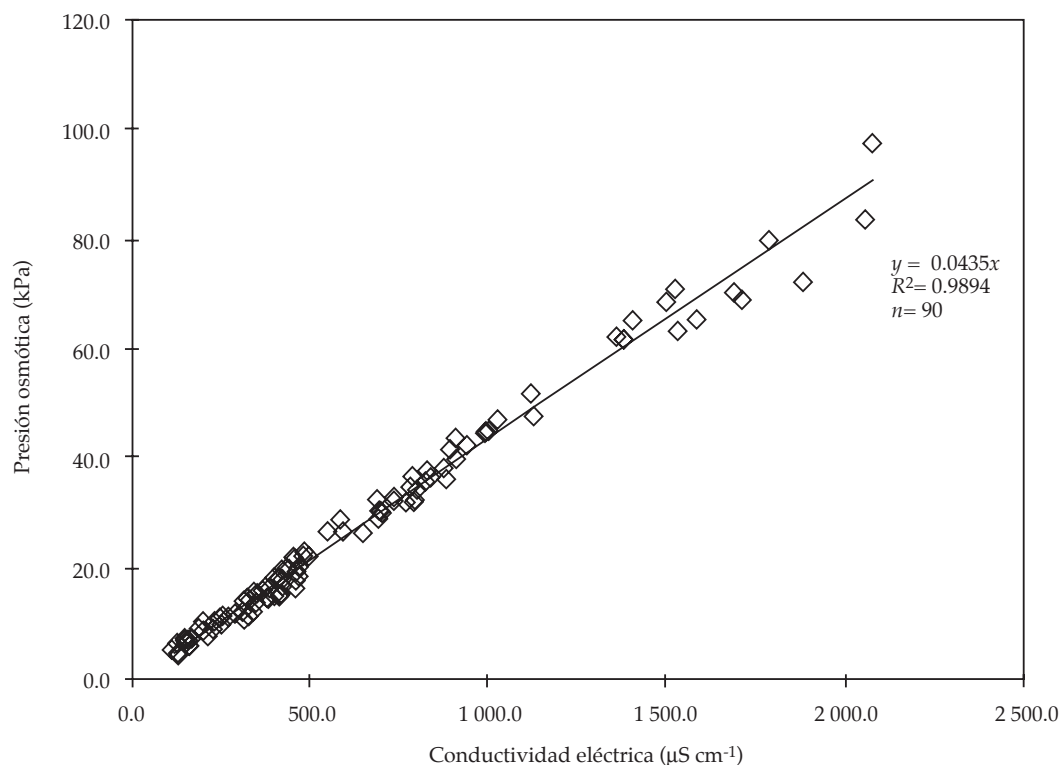


Figura 4. Relación entre la conductividad eléctrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) y la presión osmótica (kPa) de todas las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico.

agrícola de Tlaxcala-Zacatelco, transportando considerables concentraciones de sales, ya que éstas son bicarbonatadas, es decir, el bicarbonato representa más de 50% del total de aniones ($\text{HCO}_3^- > 50.0\%$), lo cual afecta los rendimientos de los cultivos.

Composición iónica de las aguas residuales

En los cuadros 1 y 2 se presentan las concentraciones de cationes y aniones de los muestreos de invierno 2006 y primavera 2007, respectivamente. Es importante explicar que los datos analíticos de estos cuadros se sometieron a las comprobaciones propuestas por APHA (1995) en lo concerniente a errores aceptables; al final del cuadro 2 se tienen los principales parámetros estadísticos de las 90 muestras. En estos mismos cuadros también se muestran las variaciones del pH, éste, en ambas fechas de muestreo,

tuvo variaciones de 6.5 a 9.3. En estas condiciones de pH del sistema, HCO_3^- - CO_3^{2-} permanece en el régimen físico-químico de HCO_3^- , la predominancia de este anión se tiene tanto en las aguas que corresponden a manantiales, como cuando los cauces reciben aguas urbano-industriales. Moore *et al.* (2008) investigaron el incremento en la salinidad a lo largo del río Grande, en Estados Unidos, que se localizó en áreas donde el agua se mueve desde los acuíferos geotérmicos hacia el río; también determinaron un aumento en las concentraciones por causa de las aguas antropogénicas. Lo mismo ocurrió en este trabajo; sin embargo, el incremento en la salinidad por aguas geotérmicas fue inferior, comparado con las descargas de aguas urbano industriales. Desde los orígenes del sistema hidrográfico, hasta el paso por las primeras poblaciones, en donde se derivan aguas residuales hacia estos cauces,

Cuadro 1. Composición iónica, pH, CE, RAS_{orig}, RAS_{aj}, RAS^o, PO, B y P del muestreo de invierno del 2006.

Núm.	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol _ε l ⁻¹										% error	RAS _{original}	RAS _{aj}	RAS ^o	PO kPa	mg l ⁻¹	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	Co ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	So ₄ ²⁻	Suma						B	P
1	6.7	421.00	1.60	1.40	0.50	0.71	4.21	0.00	2.91	1.30	0.12	4.33	1.45	0.41	0.65	0.43	18.96	0.00	0.16
2	7.0	264.88	1.00	1.00	0.10	0.37	2.47	0.00	1.51	0.70	0.34	2.55	1.77	0.10	0.11	0.09	10.61	0.00	0.12
3	6.8	465.31	1.40	1.04	1.50	0.81	4.75	0.00	3.10	1.20	0.62	4.92	1.78	1.36	2.13	1.43	22.05	0.00	0.28
4	7.0	400.62	1.40	1.50	0.40	0.63	3.93	0.00	0.80	1.65	1.60	4.05	1.50	0.33	0.33	0.27	15.64	0.00	0.33
5	8.1	191.43	0.60	1.00	0.30	0.28	2.18	0.00	1.12	1.00	0.11	2.23	1.23	0.34	0.25	0.29	9.40	0.00	0.00
6	7.2	264.01	1.00	1.00	0.10	0.42	2.52	0.00	1.25	1.20	0.14	2.59	1.50	0.10	0.10	0.09	10.78	0.00	0.09
7	7.0	331.20	1.10	1.90	0.25	0.23	3.48	0.00	2.13	1.40	0.05	3.58	1.56	0.20	0.26	0.20	14.78	0.00	0.03
8	7.1	460.79	1.10	3.00	0.50	0.28	4.88	0.00	3.52	0.90	0.60	5.02	1.41	0.35	0.52	0.36	20.80	0.00	0.05
9	8.0	254.61	0.80	1.50	0.20	0.19	2.69	0.00	1.50	1.20	0.07	2.77	1.63	0.19	0.19	0.17	11.34	0.00	0.24
10	8.5	344.65	1.00	0.40	0.70	0.62	2.72	0.00	1.10	1.30	0.41	2.81	1.71	0.84	0.79	0.67	12.27	0.00	2.45
11	7.5	147.94	0.70	0.80	0.12	0.05	1.67	0.00	1.06	0.55	0.10	1.71	1.30	0.14	0.12	0.11	7.01	0.00	0.24
12	8.7	134.14	0.60	0.50	0.11	0.05	1.26	0.00	0.58	0.60	0.12	1.30	1.67	0.15	0.08	0.10	5.21	0.00	0.00
13	8.1	178.52	0.60	1.10	0.14	0.05	1.89	0.00	0.75	1.10	0.09	1.94	1.30	0.15	0.09	0.12	7.63	0.00	0.14
14	7.9	453.98	1.30	1.00	1.75	0.38	4.43	0.00	1.57	1.80	1.20	4.57	1.54	1.63	2.01	1.50	19.21	0.00	3.25
15	8.5	343.74	1.00	1.80	0.60	0.21	3.61	0.00	1.24	1.60	0.68	3.52	1.25	0.51	0.51	0.46	14.22	0.00	0.35
16	7.9	1 495.06	3.00	3.40	8.00	0.98	15.38	0.00	6.38	5.30	4.07	15.75	1.20	4.47	9.48	5.21	68.34	0.72	3.88
17	8.0	1 355.24	2.50	2.90	7.60	0.88	13.88	0.00	5.85	4.50	3.86	14.21	1.18	4.63	9.18	5.30	61.96	0.45	3.67
18	7.1	783.87	1.60	1.63	4.05	0.48	7.76	0.00	2.83	3.70	1.42	7.95	1.22	3.19	4.85	3.30	34.56	0.00	2.17
19	8.0	554.57	0.55	1.50	3.25	0.47	5.77	0.00	2.82	2.00	1.11	5.93	1.39	3.21	3.54	3.12	26.47	0.00	2.99
20	8.0	586.94	1.80	1.10	2.90	0.46	6.26	0.00	3.39	2.00	1.03	6.42	1.23	2.41	4.09	2.65	28.45	0.00	3.62
21	7.7	1 407.65	1.70	1.40	10.60	0.58	14.28	0.00	4.42	9.40	0.76	14.58	1.02	8.51	14.32	9.41	65.00	0.00	3.58
22	7.5	310.55	0.90	1.20	0.50	0.25	2.85	0.00	2.30	0.24	0.41	2.95	1.78	0.49	0.60	0.48	11.00	0.00	2.45
23	8.0	906.30	1.70	1.60	6.00	0.47	9.77	0.00	3.81	4.80	0.81	9.42	1.82	4.67	7.57	5.07	43.44	0.00	3.45
24	7.7	241.24	1.10	1.20	0.10	0.09	2.49	0.00	1.63	0.70	0.23	2.56	1.46	0.09	0.11	0.09	10.41	0.00	0.18
25	8.0	688.54	1.50	1.20	3.70	0.55	6.95	0.00	3.66	2.30	1.20	7.16	1.49	3.18	5.24	3.44	32.06	0.00	3.95
26	7.9	253.15	1.30	0.80	0.25	0.05	2.40	0.00	1.14	0.90	0.43	2.47	1.48	0.24	0.26	0.21	9.83	0.00	1.21
27	7.8	373.11	1.40	1.70	0.25	0.05	3.40	0.00	2.15	1.00	0.36	3.51	1.65	0.20	0.28	0.20	14.18	0.00	0.13
28	7.6	890.22	1.60	1.90	5.15	0.55	9.20	0.00	5.57	2.10	1.30	8.97	1.24	3.89	6.92	4.36	41.70	0.72	4.01
29	7.9	693.98	1.20	1.30	3.65	0.56	6.71	0.00	3.99	1.90	1.05	6.94	1.75	3.26	5.56	3.48	31.43	0.65	2.79
30	7.4	1 025.16	1.60	2.00	5.65	0.57	9.82	0.00	7.04	1.70	1.30	10.04	1.11	4.21	7.88	4.80	46.51	0.00	2.90
31	7.6	689.54	1.20	3.40	2.10	0.34	7.04	0.00	4.49	1.60	0.77	6.86	1.33	1.38	2.21	1.44	30.06	0.59	2.09
32	7.6	468.72	1.10	1.60	1.05	0.39	4.14	0.00	2.56	1.30	0.39	4.25	1.35	0.90	1.22	0.90	18.34	0.00	2.48
33	7.5	329.01	1.30	1.70	0.15	0.05	3.20	0.00	1.97	0.60	0.71	3.28	1.18	0.12	0.16	0.12	12.96	0.00	0.00
34	7.3	360.67	1.50	1.70	0.18	0.05	3.43	0.00	2.46	0.90	0.15	3.51	1.09	0.14	0.21	0.15	14.44	0.00	0.01
35	6.9	1 790.22	5.56	2.30	10.20	0.39	18.45	0.00	8.90	2.20	6.88	17.98	1.29	5.15	12.55	7.29	79.30	1.48	1.58
36	7.0	320.38	1.00	1.80	0.18	0.05	3.03	0.00	2.35	0.60	0.16	3.11	1.26	0.15	0.19	0.15	12.84	0.00	0.06
37	7.1	135.45	0.60	0.75	0.10	0.05	1.50	0.00	0.68	0.60	0.26	1.54	1.22	0.12	0.08	0.09	6.04	0.00	0.12
38	6.9	836.13	0.84	2.00	4.48	0.68	8.00	0.00	5.88	1.60	0.32	7.80	1.26	3.76	5.86	3.96	37.49	0.00	5.06
39	7.2	332.43	1.40	0.90	0.52	0.32	3.14	0.00	2.10	0.70	0.26	3.06	1.34	0.48	0.67	0.48	13.47	0.00	0.04
40	7.4	377.75	1.50	1.10	0.82	0.29	3.71	0.00	3.00	0.60	0.20	3.80	1.28	0.72	1.15	0.76	16.80	0.00	0.01
41	6.9	2 074.01	8.50	11.30	2.85	0.25	22.90	0.00	16.50	4.50	2.56	23.56	1.42	0.91	2.59	1.13	97.35	0.86	0.00
42	7.0	1 705.63	7.80	6.00	2.05	0.17	16.02	0.00	11.71	2.70	2.17	16.58	1.71	0.78	2.14	1.05	68.66	0.85	0.00

Cuadro 2. Composición iónica, pH, CE, RAS_{orig}, RAS_{aj}, RAS°, PO, B y P del muestreo de primavera 2007.

Núm.	pH	CE μS cm ⁻¹	mmol L ⁻¹										% error	RAS _{original}	RAS _{aj}	RAS°	PO kPa	mg L ⁻¹	
			Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Suma	Co ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	So ₄ ²⁻	Suma						B	P
43	6.8	349.68	1.90	0.90	0.20	0.46	3.46	0.00	1.84	1.40	0.15	3.39	0.95	0.17	0.24	0.17	14.55	0.00	0.25
44	7.6	135.36	0.60	0.45	0.05	0.23	1.33	0.00	0.80	0.45	0.05	1.30	1.14	0.07	0.05	0.05	5.68	1.24	0.27
45	8.2	255.60	0.95	0.70	0.33	0.25	2.23	0.00	0.92	1.00	0.26	2.18	1.13	0.36	0.31	0.29	9.53	0.00	0.20
46	8.6	315.84	1.20	0.60	0.91	0.43	3.14	0.20	1.16	1.10	0.61	3.07	1.06	0.96	2.04	0.81	13.16	0.00	0.20
47	8.9	225.60	0.80	0.90	0.28	0.20	2.18	0.50	1.03	0.50	0.20	2.23	1.13	0.30	0.31	0.25	8.76	0.00	0.10
48	8.5	417.36	1.10	1.95	0.95	0.12	4.12	0.17	3.09	0.70	0.07	4.03	1.08	0.77	1.13	0.79	18.38	0.00	0.04
49	9.0	270.72	0.95	0.98	0.60	0.09	2.62	0.15	1.65	0.80	0.08	2.68	1.04	0.61	0.70	0.56	11.34	0.00	0.18
50	9.3	236.88	0.90	0.99	0.40	0.06	2.35	0.25	1.02	0.90	0.13	2.30	0.91	0.41	0.40	0.34	9.32	0.00	0.50
51	7.0	338.40	1.30	1.20	0.68	0.16	3.34	0.00	1.76	1.00	0.50	3.26	1.12	0.61	0.77	0.58	13.83	0.00	2.67
52	8.4	203.04	0.70	0.80	0.40	0.11	2.01	0.20	0.90	0.62	0.25	1.97	1.04	0.46	0.38	0.37	8.08	0.00	2.16
53	8.3	157.92	0.70	0.56	0.25	0.02	1.53	0.05	0.93	0.50	0.09	1.57	1.14	0.31	0.27	0.25	6.50	0.00	0.03
54	8.5	157.92	0.70	0.54	0.30	0.02	1.56	0.08	0.73	0.60	0.11	1.52	1.45	0.38	0.30	0.28	6.30	0.00	0.14
55	8.4	157.92	0.70	0.53	0.30	0.04	1.57	0.10	0.74	0.60	0.09	1.53	1.30	0.38	0.30	0.28	6.37	0.00	0.15
56	8.1	473.76	1.37	1.50	1.55	0.27	4.69	0.00	2.71	1.10	0.78	4.59	1.06	1.29	1.93	1.33	20.20	0.00	0.12
57	8.6	789.60	1.80	1.20	4.31	0.50	7.81	0.12	3.03	2.90	1.59	7.64	1.10	3.52	5.66	3.75	34.28	0.00	4.52
58	8.6	789.60	1.82	1.31	4.00	0.52	7.65	0.15	3.17	2.90	1.60	7.82	1.12	3.20	5.24	3.44	34.31	0.00	4.86
59	8.7	648.60	2.30	2.00	1.84	0.28	6.42	0.40	2.68	2.00	1.18	6.26	1.22	1.25	2.21	1.33	26.17	0.00	2.96
60	6.6	1 579.20	10.78	3.20	1.35	0.23	15.56	0.00	11.16	3.00	1.01	15.17	1.26	0.51	1.47	0.83	65.13	0.69	0.00
61	6.5	1 692.00	11.80	3.22	1.40	0.24	16.66	0.00	12.15	3.10	0.95	16.20	1.39	0.51	1.50	0.85	69.82	0.72	0.01
62	7.4	1 128.00	1.49	5.40	3.75	0.50	11.14	1.20	6.95	2.10	0.61	10.86	1.28	2.02	3.84	2.14	47.20	0.00	0.16
63	7.0	822.50	2.50	1.70	3.58	0.35	8.13	0.00	4.57	1.50	1.89	7.96	1.01	2.47	4.61	2.89	35.57	0.00	7.10
64	7.2	763.75	2.20	2.50	2.53	0.33	7.56	0.00	4.35	1.50	1.52	7.37	1.29	1.65	2.99	1.84	32.30	0.00	4.96
65	7.3	1 380.63	3.40	1.60	8.25	0.39	13.64	0.00	5.58	7.20	0.57	13.35	1.08	5.22	10.95	6.58	61.71	0.00	7.89
66	7.2	399.50	1.05	1.10	1.62	0.19	3.96	0.00	3.05	0.70	0.11	3.86	1.26	1.56	2.23	1.60	18.08	0.00	0.13
67	7.3	1 527.50	2.10	2.00	10.65	0.38	15.13	0.00	7.78	6.40	0.63	14.81	1.06	7.44	14.94	8.83	70.66	0.00	3.99
68	7.6	329.00	0.90	1.10	1.12	0.14	3.26	0.00	2.37	0.70	0.11	3.18	1.24	1.12	1.38	1.09	14.54	0.00	0.01
69	7.2	493.50	0.95	1.20	2.50	0.24	4.89	0.00	2.91	1.10	0.78	4.79	1.03	2.41	3.28	2.42	22.00	0.00	2.48
70	7.3	1 527.50	6.45	1.80	6.60	0.25	15.10	0.00	6.43	2.30	5.99	14.72	1.27	3.25	7.94	4.69	63.08	0.38	4.77
71	7.4	340.75	0.80	0.95	1.40	0.15	3.30	0.00	2.48	0.80	0.10	3.38	1.20	1.50	1.82	1.46	15.46	0.00	0.18
72	7.3	411.25	1.10	1.40	1.39	0.18	4.07	0.00	2.74	1.10	0.14	3.98	1.04	1.24	1.73	1.26	18.03	0.00	1.31
73	7.0	387.75	1.05	1.25	1.38	0.16	3.84	0.00	2.91	0.70	0.13	3.74	1.32	1.29	1.80	1.31	17.24	0.00	0.14
74	8.0	329.00	0.85	1.05	1.11	0.17	3.18	0.00	2.32	0.80	0.14	3.26	1.31	1.14	1.37	1.10	14.64	0.00	0.03
75	8.1	117.50	0.30	0.40	0.46	0.02	1.18	0.00	0.55	0.50	0.10	1.15	1.29	0.78	0.19	0.51	5.05	0.85	0.00
76	8.3	793.13	1.20	1.30	5.21	0.12	7.83	0.12	4.59	2.80	0.38	7.89	0.41	4.66	7.29	5.05	36.91	0.00	0.05
77	7.1	1 880.00	8.17	8.50	1.85	0.09	18.61	0.00	8.62	3.80	5.72	18.14	1.27	0.64	1.65	0.80	71.95	1.84	0.05
78	7.0	2 056.25	8.65	9.10	1.95	0.15	19.85	0.00	13.20	4.70	2.46	20.36	1.26	0.65	1.81	0.84	83.66	1.22	0.05
79	7.5	317.25	1.10	1.00	0.74	0.21	3.05	0.00	2.27	0.70	0.16	3.13	1.41	0.72	0.93	0.71	13.82	0.00	0.02
80	7.4	734.38	1.70	2.10	2.92	0.35	7.07	0.00	5.33	1.50	0.42	7.25	1.28	2.12	3.89	2.37	33.00	0.43	5.83
81	7.3	998.75	2.20	1.70	5.65	0.32	9.87	0.00	4.61	3.90	1.14	9.65	1.12	4.05	7.29	4.64	44.27	0.00	5.17
82	7.3	881.25	1.90	2.00	4.50	0.30	8.70	0.00	4.13	3.30	1.04	8.47	1.34	3.22	5.46	3.54	38.46	0.00	3.17
83	7.3	235.00	0.95	0.70	0.59	0.02	2.26	0.00	1.54	0.60	0.18	2.32	1.42	0.65	0.71	0.58	10.01	0.00	0.00
84	7.3	822.50	1.60	2.00	4.15	0.38	8.13	0.00	5.08	1.60	1.24	7.92	1.26	3.09	5.38	3.42	36.61	0.00	3.69
85	7.1	329.00	1.10	1.15	0.85	0.06	3.16	0.00	2.28	0.70	0.27	3.25	1.36	0.80	1.04	0.79	14.09	0.00	0.31
86	7.60	998.75	2.60	2.10	4.85	0.32	9.87	0.00	6.66	2.10	0.87	9.63	1.25	3.16	6.50	3.83	44.83	0.35	6.46
87	7.4	940.00	2.40	2.05	4.16	0.47	9.08	0.00	6.40	1.80	1.08	9.28	1.11	2.79	5.58	3.33	42.26	0.41	4.20
88	7.5	705.00	1.20	1.30	4.16	0.31	6.97	0.00	4.24	1.60	0.96	6.80	1.23	3.72	5.85	4.00	31.99	0.00	3.77
89	7.5	458.25	0.80	0.95	2.54	0.24	4.53	0.00	2.99	1.05	0.36	4.40	1.44	2.72	3.58	2.71	20.89	0.00	1.70
90	9.3	1 116.25	1.10	1.40	8.02	0.51	11.03	0.20	6.39	2.12	2.25	10.96	0.30	7.17	11.97	7.90	51.80	0.26	4.08
Desv. est.	0.62	493.94	2.20	1.74	2.61	0.21	4.98	0.15	3.04	1.59	1.25	4.98	0.25	1.84	3.49	2.15	21.59	0.37	2.02
CV	0.08	0.77	1.13	0.96	1.11	0.70	0.78	3.46	0.83	0.88	1.38	0.78	0.19	1.05	1.16	1.11	0.77	2.25	1.20
Media	7.62	644.79	1.95	1.81	2.36	0.30	6.41	0.04	3.65	1.81	0.91	6.41	1.28	1.75	3.00	1.93	28.05	0.16	1.68
Mediana	7.50	437.49	1.20	1.36	1.39	0.26	4.17	0.00	2.83	1.30	0.47	4.29	1.26	0.90	1.69	0.97	18.67	0.00	0.28
Mínimo	6.50	117.50	0.30	0.40	0.05	0.02	1.18	0.00	0.55	0.24	0.05	1.15	0.30	0.07	0.05	0.05	5.05	0.00	0.00
Máximo	9.30	2 074.01	11.80	11.30	10.65	0.98	22.90	1.20	16.50	9.40	6.88	23.56	1.82	8.51	14.94	9.41	97.35	1.84	7.89
Moda	7.00	157.92	1.10	1.20	0.10	0.05	2.18	0.00	2.91	0.70	0.14	2.05	1.13	0.10				0.00	0.00

la concentración de sales totales de esta agua varió de 134 a 465 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y la concentración de los cationes y aniones fue de 1.26 a 4.88 $\text{mmol}_c \text{ l}^{-1}$; es necesario aclarar que meq l^{-1} y $\text{mmol}_c \text{ l}^{-1}$ son equivalentes. A partir de las estaciones 14-21 hasta la 84, la concentración de sales varió de 500-1 700 a 2 800 $\mu\text{S cm}^{-1}$. Cuando la concentración de los cauces de los ríos Zahuapan y Atoyac alcanzó 1 500-2 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$, en la parte norte de la zona agrícola Tlaxcala-Zacatelco se inicia el riego hacia el sur, por todo el valle de Tlaxcala-Zacatelco. En estas condiciones, las aguas se enriquecen con Na^+ y Mg^{2+} . En las aguas de las 90 estaciones de muestreo, la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ fue de 0.9 a 1.2. Obviamente, en condiciones de variaciones físico-químicas, como cambios de temperatura y presión parcial de bióxido de carbono P_{CO_2} , la concentración de Ca^{2+} tendrá fuertes variaciones (Manahan, 2007).

En estas condiciones, la relación $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$ es menor de 1. La irrigación del valle Tlaxcala-Zacatelco se hace con aguas urbano-industriales de concentraciones mayores de 1 500 $\mu\text{S cm}^{-1}$ y RAS mayor de 3. En esta agua, los valores del RAS° varían de 3.12 a 4.67 y 9.41. Las sales solubles más comunes encontradas en las aguas urbano-industriales del sistema Zahuapan-Atoyac fueron NaCl , NaHCO_3 , Na_2SO_4 , MgSO_4 y $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$. Características como tipo de flujo, velocidad de corriente, pendiente del terreno, así como las actividades antropogénicas y la incorporación de desechos al cauce, influyen en la dinámica físico-química y la desaparición de organismos (Donohue *et al.*, 2006).

Valores de RAS y problemas de infiltración

Durante la aplicación de las aguas de riego a los suelos, así como durante la recuperación de los suelos salinos y sódicos, es importante que el agua tenga fácil movilidad dentro del perfil de suelo. Los peligros de sodificación están asociados con el sodio intercambiable. Se ha reportado que la conductividad hidráulica de

los suelos disminuye cuando la concentración electrolítica de las aguas es baja y los valores de RAS son altos (Ayers y Westcot, 1987). También se ha establecido que durante los procesos de dispersión de las partículas arcillosas y su movimiento, los microporos de los suelos se tapan y sellan (Pereira *et al.*, 2008). Cuando en los suelos se tienen minerales arcillosos del tipo de la montmorillonita y altos valores de sodio intercambiable, debido a soluciones de RAS elevado, en los suelos se presentan procesos de hinchamiento. En algunas zonas agrícolas de Tlaxcala-Zacatelco se tienen suelos vertisoles. Cerana *et al.* (2006) investigaron el efecto del incremento del catión sodio, por medio del riego con aguas bicarbonatadas sódicas, y su relación con la conductividad hidráulica, en vertisoles, y demostraron que el aumento del sodio de intercambio provocó la dispersión de arcillas y la consiguiente inestabilidad estructural. Este proceso está ocurriendo en el sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, por el riego con aguas urbano-industriales. En la figura 5 se presenta la relación RAS-CE de las aguas urbano-industriales para las formulaciones de RAS, RAS_{aj} y RAS° (Ayers y Westcot, 1987) con la CE en dS m^{-1} .

La dispersión de arcillas y los procesos de hinchamiento afectan la infiltración de agua en los suelos (Shainberg *et al.*, 1997; Dontsova y Norton, 2002). A mayor valor de RAS, mayor potencial de expansión y dispersión de arcillas, y menor conductividad hidráulica del suelo (Pérez, 2002).

Cuando los valores de RAS no toman en cuenta las condiciones de alcalinidad de las soluciones y la precipitación de Ca^{2+} y Mg^{2+} , las aguas urbano-industriales del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac, en condiciones de equilibrio con los suelos, presentarán valores diferentes de PSI; sin embargo, cuando se consideran las posibles precipitaciones de Ca^{2+} y Mg^{2+} , los valores de RAS aumentan. Las aguas urbano-industriales de los ríos Zahuapan y Atoyac, en lo que se refiere a su capacidad de reducir la infiltración en los suelos, se disponen en el orden siguiente: sin reducción (RAS y RAS°)

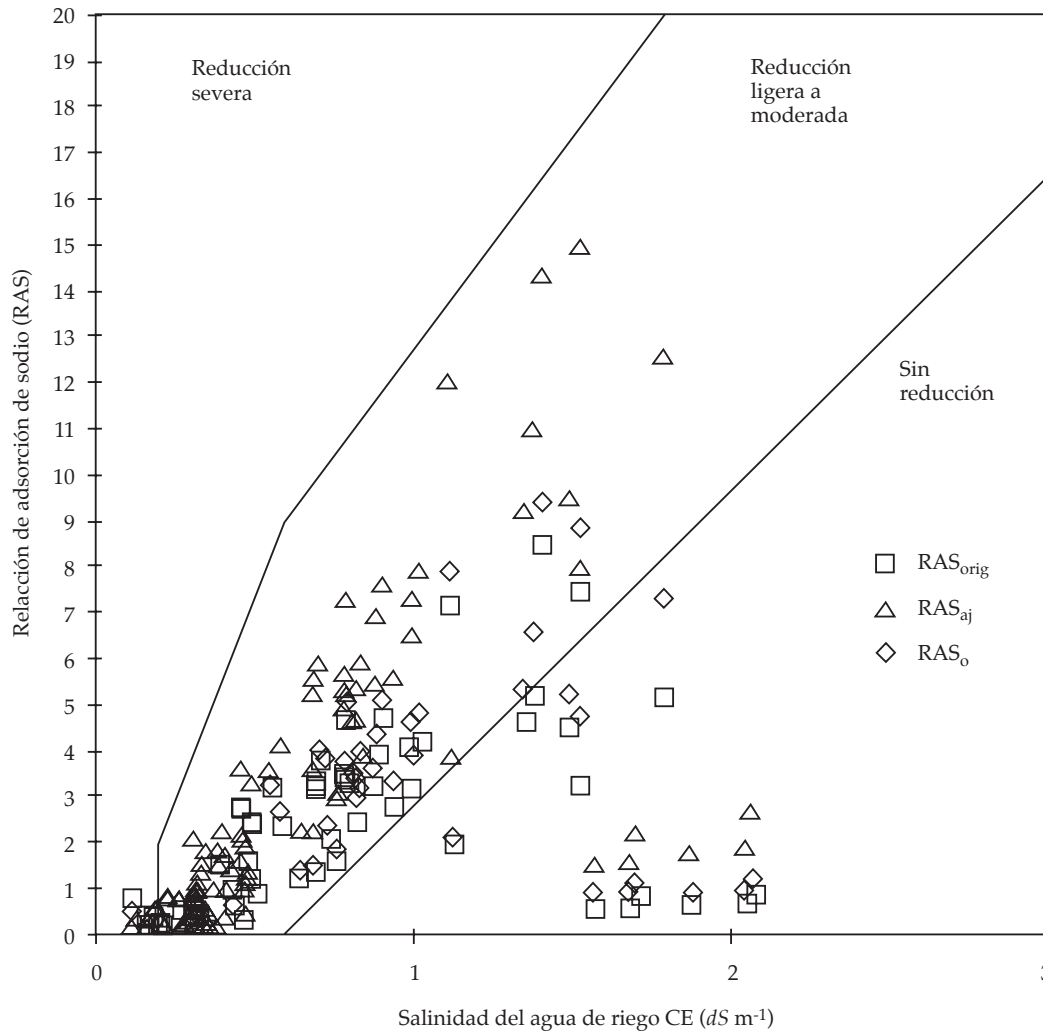


Figura 5. Reducción relativa de la infiltración de los suelos inducida por la salinidad y la relación de adsorción de sodio en el sistema hidrográfico.

y con reducción moderada (RAS_{aj}). Entonces se puede concluir que existe una tendencia a que las aguas de riego del sistema hidrográfico pasen de la zona de reducción ligera a reducción severa; en otras palabras, se están perdiendo las propiedades físicas de los suelos por efecto de la salinidad sódica; más aún, es evidente que el agua de riego no atraviesa la superficie del suelo a una velocidad aceptable para la renovación del agua consumida por el cultivo entre riegos. En resumen, existe una reducción en el suministro de agua en los cultivos desde la superficie hacia la zona radical.

En la figura 6 se tiene la distribución espacial de la sodicidad con base en RAS_{aj} , éste fue el más crítico, y la clasificación de acuerdo con los límites propuestos por Richards (1962), la relación entre los cationes solubles con los adsorbidos es la presencia del sodio intercambiable en los suelos por efecto del riego con aguas sódicas. Agua baja en sodio corresponde a S1, puede usarse para el riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de alcanzar niveles peligrosos de sodio intercambiable. Agua media en sodio corresponde a S2; en suelos

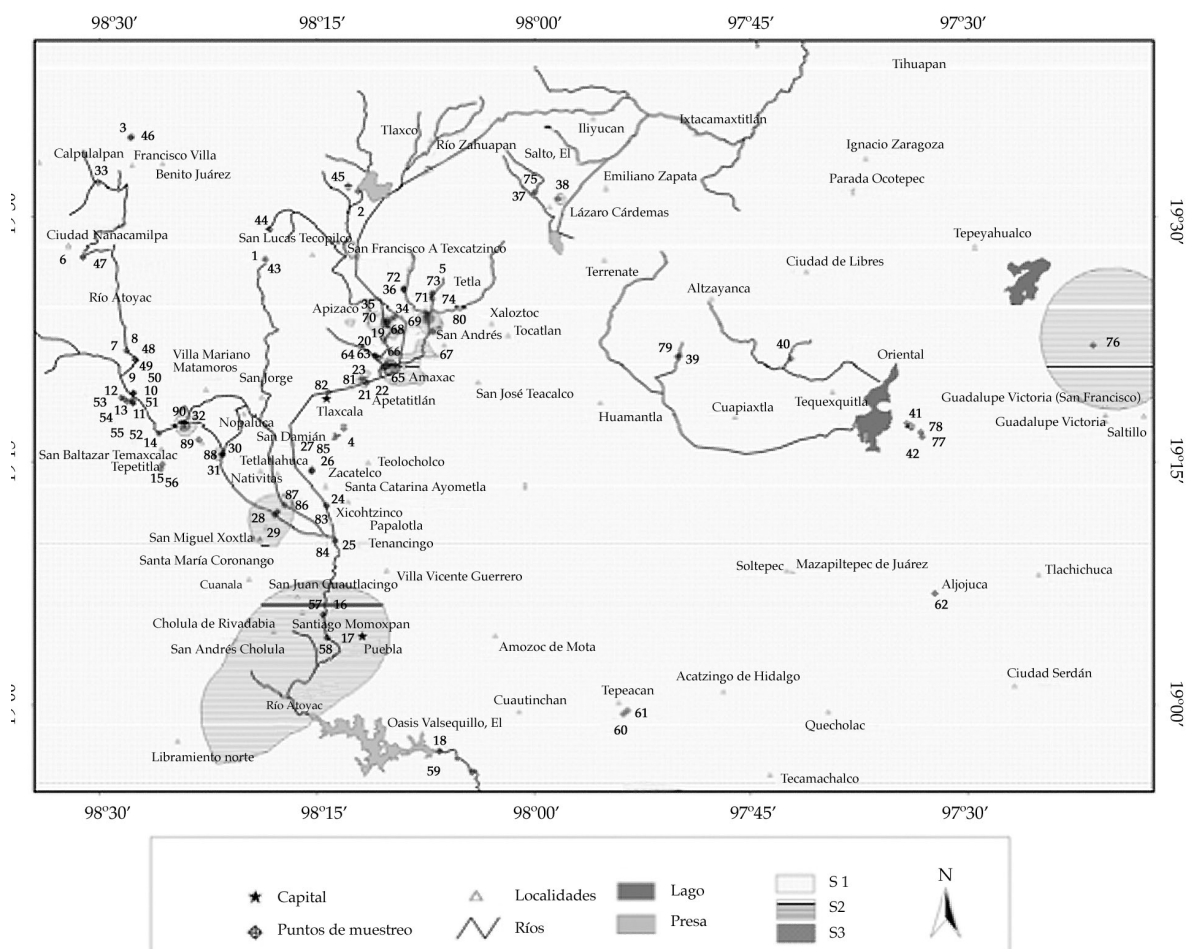


Figura 6. Distribución espacial de la salinidad con base en el RAS_{aj} de las estaciones de muestreo del sistema hidrográfico.

de textura fina, el sodio representa un peligro considerable, estas aguas sólo pueden usarse en suelos de textura gruesa y con un drenaje eficiente. Agua alta en sodio corresponde a S3, puede producir niveles tóxicos de sodio intercambiable en la mayor parte de los suelos, por lo que necesita prácticas especiales de manejo. En la figura 6 se observa que en la región de Apizaco, Apetatitlán y Amaxac, en el río Zahuapan, se tiene una clasificación S2, al igual que en la región de Atoyatenco, Puente Villa Alta, Santa Águeda y la zona baja del río Atoyac. Sin embargo, en las regiones anteriores se tienen estaciones en donde la clasificación llega a S3, lo que indica una tendencia a salinizar sódicamente los suelos del sistema hidrográfico.

Concentraciones de fósforo ($P-PO_4$)

En la figura 7 se presentan las concentraciones de fósforo. En ambos muestreos, las concentraciones de $P-PO_4$ en los orígenes de los ríos Zahuapan y Atoyac son bajas, de 0.3 a 0.5 mg l⁻¹.

En cambio, cuando los cauces de estos ríos ingresan por poblados urbano-industriales, las concentraciones aumentan considerablemente y varían de 1.0 a 7.89 mg l⁻¹.

Sharpley y Withers (1994) indican concentraciones críticas de fósforo disuelto para que se inicien los procesos de eutrofización; el límite del fosfato es de 0.05 mg l⁻¹. Las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac desarrollarán este proceso, lo cual es peligroso debido a su carácter irreversible,

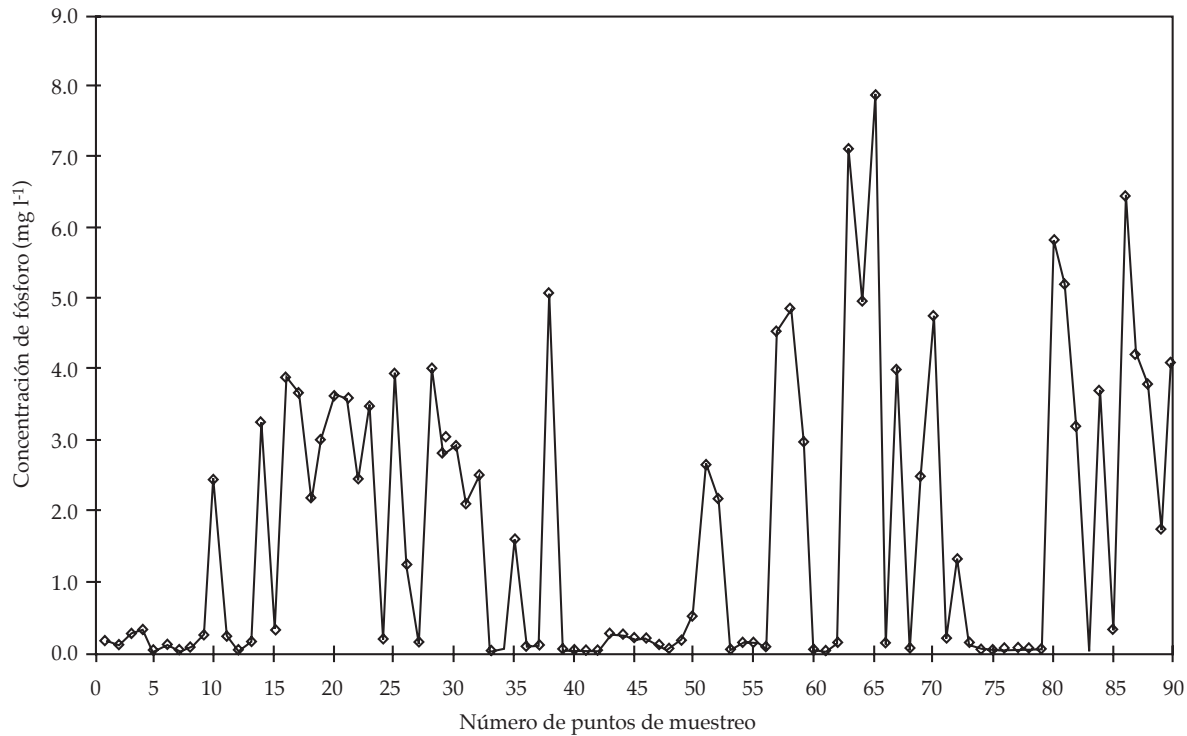


Figura 7. Distribución del fósforo en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

crecimiento excesivo de algas y materia orgánica que no se descompone totalmente y provoca emanaciones de gas carbónico, sulfuro y sales amoniacales (Mason *et al.*, 2005). El incremento de este elemento se debe a la agricultura intensiva y a la producción de ganado, además de los lodos provenientes de las aguas residuales. Altas concentraciones de fósforo indican contaminación de aguas por efluentes urbano-industriales. El máximo valor se tiene en la estación 65, en el poblado de Amaxac; esta zona es crítica, ya que el sistema hidrográfico, al pasar por Apizaco, recibe efluentes urbano-industriales con altas concentraciones.

Concentraciones de boro

En la figura 8 se presentan las concentraciones de boro. El B es un importante micronutriente de difícil manejo debido a que su

movilidad en el floema varía, marcadamente, entre las especies vegetales con síntomas de deficiencia y toxicidad en un rango bastante estrecho (Malave y Carrero, 2007). El cultivo de tomate con agua desalinizada y desborificada permite aumentar los rendimientos de este cultivo (Albornoz *et al.*, 2007).

González *et al.* (2001) estudiaron los manantiales aledaños al campo geotérmico de Los Humeros en el estado de Puebla. Indican que aguas de reciente percolación que han circulado a través de rocas de tipo volcánico tienen altas concentraciones de H_3BO_3 , esto explica su origen meteórico de reciente infiltración. Lo anterior se confirmó con las altas concentraciones de boro que se obtuvieron en las aguas subterráneas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

En el caso de la vid, si la concentración de B en las aguas es $< 1.0 \text{ mg l}^{-1}$, no presenta problemas de toxicidad; en concentraciones

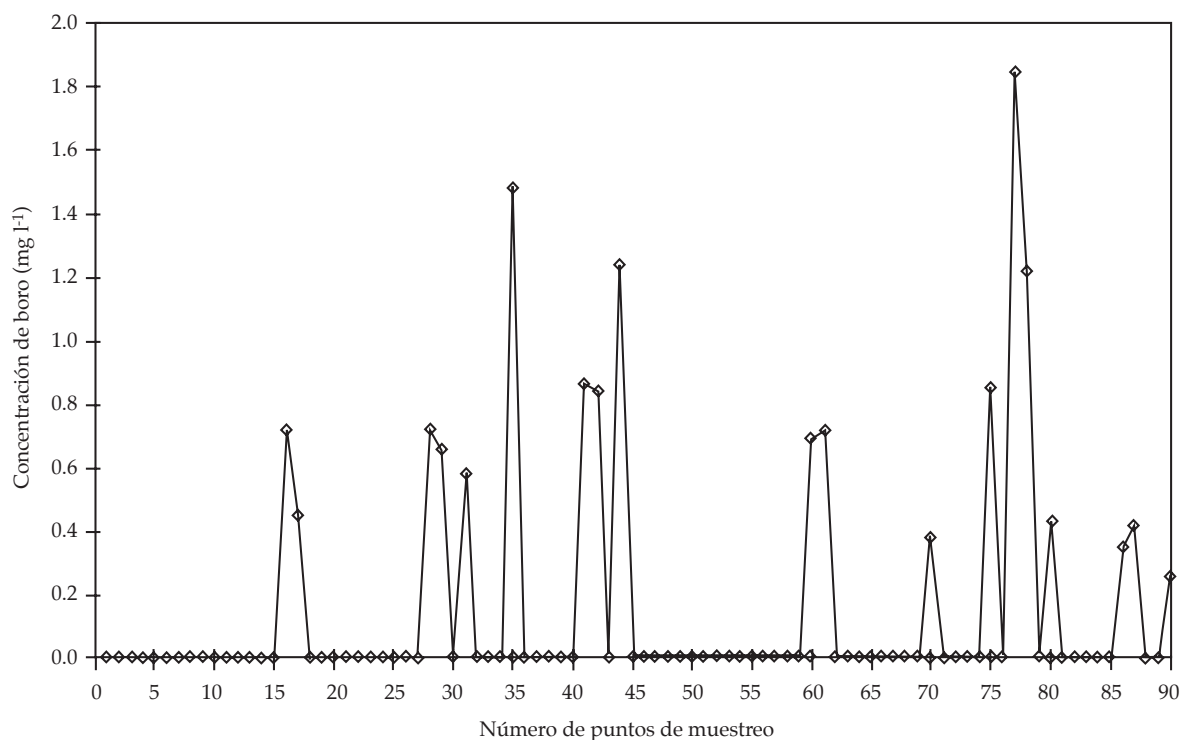


Figura 8. Distribución de boro en las aguas del sistema hidrográfico Zahuapan-Atoyac.

> 3.0 mg l⁻¹, los daños son muy severos (Ayers y Westcot, 1987). Las plantas pueden experimentar deficiencia o toxicidad del boro durante su ciclo vegetativo (Goldberg *et al.*, 2002).

Ayers y Westcot (1987) establecen tablas donde los cultivos muy sensibles, como limonero y zarzamora, toleran concentraciones de B < 0.5 mg l⁻¹. Aguacate y naranjo son cultivos sensibles, que toleran concentraciones de B entre 0.5 y 0.75 mg l⁻¹. Trigo, cebada, frijol, cacahuete y fresa son cultivos sensibles, que toleran concentraciones de B entre 0.75 y 1.0 mg l⁻¹. Pimiento, zanahoria y papa son cultivos moderadamente sensibles, que toleran concentraciones de B entre 1.0 y 2.0 mg l⁻¹. Lechuga, avena, calabaza y maíz son cultivos moderadamente sensibles, que toleran concentraciones de B entre 2 y 4 mg l⁻¹. Sorgo, tomate y alfalfa son cultivos tolerantes, que resisten concentraciones de B entre 4 y 6 mg

l⁻¹. Algodón y espárrago son cultivos muy tolerantes, que resisten concentraciones entre 6 y 15 mg l⁻¹.

Conclusiones

En los orígenes del sistema hidrográfico, las aguas tienen baja concentración electrolítica, de 100 a 480 µS cm⁻¹, sin embargo, cuando a estos cauces se vierten aguas urbano-industriales, éstas alcanzan valores de 480 a 2 100 µS cm⁻¹. Las aguas incrementan su concentración de Na⁺ de 0.05 a 10.65 mmol_c l⁻¹ y los HCO₃⁻ aumentan de 0.55 a 16.50 mmol_c l⁻¹. Los procesos de eutrofización se están desarrollando en la zona baja de los ríos Zahuapan y Atoyac. Por su origen geoquímico reciente, las aguas subterráneas tienen concentraciones de boro superiores a 0.8 mg l⁻¹. Así, la salinidad sódica del sistema hidrográfico aguas abajo se debe a las aportaciones antropogénicas.

Recibido: 19/02/09
Aprobado: 26/10/10

Referencias

- ALBORNOZ, F., TORRES, A., TAPIA, M. y ACEVEDO, E. Cultivo de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) hidropónico con agua desalinizada y desborificada en el Valle de Lluta. Chile. *IDESIA*. Vol. 25, núm. 2, 2007, pp. 73-80.
- APHA. *Standard M. D. Methods for the examination of water and waste water*. 19th ed. Baltimore: American Public Health Association- Port City Pres, 1995.
- AYERS, R. y WESTCOT, D. *La calidad del agua y su uso en la agricultura*. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Traducido al español por J.F. Alfaro de Water quality and use in agriculture. Roma: FAO, 1987, 175 pp.
- CERANA, J., WILSON, M., DE BATTISTA, J., NOIR, J. y QUINTERO, C. Estabilidad estructural de los vertisoles de Entre Ríos en un sistema arrocerero regado con agua subterránea. Argentina. *RIA*. Vol. 35, núm. 1, 2006, pp. 87-106.
- DONOHUE, I., MC GARRIGLE, M., and MELLIS, P. Linking catchment characteristic and chemistry with the ecological status of Irish rivers. *Water Research*. Vol. 40, 2006, pp. 91-98.
- DONOSO, A. y LATORRE, B. Caracterización del moho azul causado por *Penicillium spp.* en uva de mesa almacenada en frío. *Ciencia e Investigación Agraria*. Vol. 33, núm. 2, 2006, pp. 143-155.
- DONTSOVA, K., and NORTON, L. Clay dispersion, infiltration, and erosion as influenced by exchangeable Ca and Mg. *Soil Science*. Vol. 167, 2002, pp. 184-193.
- ENDO, T., YAMAMOTO, S., HONNA, T. and ENEJI, A. Sodium-Calcium exchange selectivity as influenced by clays minerals and composition. *Soil Science*. Vol. 167, 2002, pp. 117-125.
- FLORES, J., BECERRIL, A., GONZÁLES, V., TIJERINA, L. y VÁSQUEZ, T. Crecimiento vegetativo y floral del crisantemo [*Dendranthema x grandiflorum* (Ramat) Kitamura] en respuesta a la presión osmótica de la solución nutritiva. *Revista Chapingo Serie Horticultura*. Vol. 11, 2005, pp. 241-249.
- GOLDBERG, S., LESCH, S., and SUAREZ, D. Predicting Boron Adsorption by Soils Using Soil Chemical Parameters in the Constant Capacitance Model *Soil Science Society American Journal*. Vol. 64, 2000, pp. 1356-1363.
- GOLDBERG, S., SHOUSE, P., LESCH, S., GRIEVE, C., POSS, J., FORSTER, H., and SUAREZ, D. Soil boron extractions as indicator of boron content a field-grown crops. *Soil Science*. Vol. 167, 2002, pp. 720-728.
- GONZÁLEZ, E., TELLO, E. y PAL, M. Interacción agua geotérmica-manantiales en el campo geotérmico de los Humeros, Puebla, México. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. 16, núm. 2, abril-junio de 2001, pp. 185-194.
- HAHN, F., MIRANDA, G., PÉREZ, F., MAYO, O., ROJAS, F. y CORAS, P. Monitoreo de la calidad del agua en el río Texcoco mediante sensores selectivos de iones. *Agrociencia*. Vol. 40, 2006, pp. 277-287.
- KEREN, R. Boron. *Methods of Soil Analysis*. Part 3. Chemical Methods. 3rd. ed. Madison, USA: SSSA, 1996.
- KERLINGER, F. y LEE, H. *Investigación del comportamiento*. Cuarta edición. Traducido al español por CONACYT. México, D.F.: McGraw-Hill, 2002, 810 pp.
- LÓPEZ, M., RAMOS, M. y CARRANZA, J. Análisis multimétrico para evaluar contaminación en el río Lerma y lago de Chapala. México. *Hidrobiología*. Vol. 17, 2007, pp. 17-30.
- MANAHAN, S. *Introducción a la química ambiental*. Barcelona: Reverté, 2007, 725 pp.
- MALAVE, A. y CARRERO, P. Desempeño funcional del boro en las plantas. Venezuela. *UDO*. Vol. 7, núm. 1, 2007, pp. 1-14.
- MASON, L., AMRHEIN, C., GOODSON, C., MATSUMOTO, M., and ANDERSON, M. Reducing Sediment and Phosphorus in Tributary Waters with Alum and Polyacrylamide. *Journal Environmental Quality*. Vol. 34, 2005, pp. 1998-2004.
- PEREIRA, R., HERPIN, U., FERREIRA, A., PITTOL, L., MONTES, C., and MELFI, A. Sodicity and salinity in a Brazilian Oxisol cultivated with sugarcane irrigated with wastewater. *Agricultural Water Management*. Vol. 96, 2008, pp. 307-316.
- METCALFE, E. Nor any drop to drink. *The Ecologist*. Vol. 30, No. 5, 2000, pp. 46-50.
- MOORE, J., BASSETT, R., LIU, B., WOLF, C., and DOREMUS, D. Geochemical tracers to evaluate hydrogeologic controls on river salinization. *Ground Water*. Vol. 46, 2008, pp. 489-501.
- PARKER, F. and SUAREZ, D. *Irrigation water quality assessment*. In agricultural salinity assessment and management. New York: ASCE, 1990.
- PÉREZ, O. Efecto de la aplicación de aguas residuales industriales en las propiedades físicas y químicas del suelo. *Agrociencia*. Vol. 36, 2002, pp. 279-290.
- RUIZ, V. and WU, L. Influence of sodicity, clay mineralogy, prewetting rate, and their interaction on aggregate stability. *Soil Science Society American Journal*. Vol. 70, 2006, pp. 1825-1833.
- RIBEIRO, T., AIROLDI, R., PATERNIANI, J. y DA SILVA, M. Variação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Vol. 9, 2005, pp. 295-301.

- RICHARDS, L. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. México, D.F.: Editorial Cultura, 1962, 172 pp.
- RODIER, J. *Análisis de las aguas: aguas naturales, aguas residuales, agua de mar*. Barcelona: Omega, 1990, 1059 pp.
- SÁNCHEZ, E., ORTEGA, M., GONZÁLEZ, H., RUELAS, G., KOHASHI, J. y GARCÍA, N. Tolerancia de tubérculos de papa cv. Alpha en etapa de brotación a condiciones de salinidad. *Terra*. Vol. 21, 2003, pp. 481-491.
- SHAINBERG, I., LEVY, G., LEVIN, J., and GOLDSTEIN, D. Aggregate size and real properties. *Soil Science*. Vol. 162, 1997, pp. 470-478.
- SHARPLEY, A. and WITHERS, P. The environmentally-sound management of agricultural phosphorus. Netherlands. *Fertilizer Research*. Vol. 39, 1994, pp. 133-146.
- SPOSITO, G. and MATTIGOD, S. On the chemical foundation of the sodium adsorption ratio. *Soil Science Society American Proceeding*. Vol. 41, 1977, pp. 323-329.
- VELÁZQUEZ, M., ORTEGA, M., MARTÍNEZ, A., KOHASHI, J. y GARCÍA, N. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del valle del Mezquital, Hidalgo, México. *Terra*. Vol. 20, 2002, pp. 459-464.

Abstract

CARRERA-VILLACRÉS, D.V., ORTEGA-ESCOBAR, H.M., RAMÍREZ-GARCÍA, J., RAMÍREZ-AYALA, C., TREJO-LÓPEZ, C. & BECERRIL-ROMÁN, A.E. Boron, phosphates, and salinity indexes from the Zahuapan-Atoyac hydrographic system, Mexico. *Water Technology and Sciences, formerly Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish)*. Vol. II, No. 2, April-June, 2011, pp 5-21.

Urban industrial water for irrigation—generated in the Zahuapan-Atoyac hydrographic system, located in the States of Tlaxcala and Puebla—is used to satisfy the requirements of irrigation for agricultural areas. This water originates from the overland flow of the mountains of Tlaxco and Calpulalpan, in the vicinity of Panzocola, Tlaxcala. The Zahuapan and Atoyac rivers receive affluents from numerous populations from the valley of Tlaxcala and Puebla. The aim of this work was to determine the salinity, the infiltration problems, and the toxic ions of the water in order to understand their effect on the physical properties of soil and crops. Non-experimental descriptive cross-sectional research and a sampling trial were used on 42 stations in the winter of 2006 and on 48 in the spring of 2007. Thirteenth measurements were determined in every water sample for: cations and anions, pH, electrical conductivity (EC), osmotic pressure (OP), phosphates and boron. The sodium absorption ratio (SAR) and its respective modifications (SAR, SAR_{af} and SAR^o) were calculated EC at the source was 115 to 400 $\mu S\ cm^{-1}$ and after receiving industrial urban flows, their values were from 500 to 2 100 $\mu S\ cm^{-1}$. Bicarbonate concentration went from 0.55 to 16.5 $mmol\ L^{-1}$ and accounted for > 50% with respect to total anions. pH values ranged from 6.5 to 9.3. Maximum phosphate and boron values were of 7.89 and 1.84 $mg\ L^{-1}$, respectively. Thus, the salinity of the hydrographic system is due to anthropogenic contribution.

Keywords: cation exchange capacity, eutrophication, sodic water, SAR, ESP.

Dirección institucional de los autores

David Vinicio Carrera-Villacrés
Héctor Manuel Ortega-Escobar
Jazmín Ramírez-García
Carlos Ramírez-Ayala
Carlos Trejo-López
Alberto Enrique Becerril-Román

Programa de Hidrociencias
Colegio de Postgraduados
km 36.5 carretera México-Texcoco, 56230
MÉXICO
villacres@colpos.mx