

ÍNDICES DE CALIDAD DEL AGUA DEL ACUÍFERO DEL VALLE DEL YAQUI, SONORA

Water Quality Parameters of the Yaqui Valley Aquifer

Juan Manuel Cortés-Jiménez^{1‡}, Enrique Troyo-Diéguez², Bernardo Murillo-Amador²,
José Luis García-Hernández², Jaime Garatuza-Payán³ y Sang Suh Lee⁴

RESUMEN

En el valle del Yaqui, Sonora, México, la actividad agrícola depende del almacenamiento de agua en el sistema de presas construido en la cuenca del río Yaqui, el cual tiene una capacidad de almacenamiento de 7008.4 hm³. Sin embargo, para el ciclo otoño-invierno 2003-2004 no se autorizó la utilización de esta agua para uso agrícola, debido al bajo nivel de almacenamiento. En respuesta a esto, se extrajeron del acuífero aproximadamente 350 millones de m³ de agua. De acuerdo con estudios recientes, la mayor parte del acuífero contiene un intervalo de 1000 a 5000 mg L⁻¹ de sólidos totales disueltos. El objetivo de esta investigación fue estudiar la composición iónica de 224 muestras de agua y clasificarlas de acuerdo con los criterios más conocidos. Se seleccionaron 164 muestras que cumplieron con un error de balance iónico menor de 5% y se calcularon los parámetros necesarios para clasificar el agua desde el punto de vista agrícola. El valor promedio para las características evaluadas fue: pH, 7.25; conductividad eléctrica, 2.06 dS m⁻¹; cationes en meq L⁻¹: Na⁺, 8.5; Ca²⁺, 7.69; Mg²⁺, 5.08; aniones en meq L⁻¹: SO₄²⁻, 4.57; CO₃²⁻, 0.83; HCO₃⁻, 3.3; Cl⁻, 12.5; relación de adsorción de sodio (RAS), 3.91; RAS corregido, 4.44; RAS ajustado, 8.82; RAS corregido por HCO₃⁻/Ca²⁺, 4.38; salinidad efectiva, 14.8; salinidad potencial, 14.7; carbonato de sodio residual, 0.57; índice de permeabilidad, 53.3, y porcentaje de sodio intercambiable (PSI), 5.83. El agua extraída del acuífero

del valle del Yaqui muestra limitaciones para la irrigación de especies sensibles a la salinidad, además de que existen pozos que extraen agua, cuya calidad no es recomendable para uso agrícola y cuya utilización podría provocar un incremento en la salinidad del suelo. Por otra parte, la concentración de iones tóxicos como Na⁺ y Cl⁻ es alta, lo cual se considera una restricción adicional. Con relación al Na⁺, la mayoría de los pozos extraen agua con un riesgo bajo de sodificar el suelo, en lo cual coinciden la mayoría de los esquemas de clasificación utilizados.

Palabras clave: salinidad, RAS, sodicidad, aniones, cationes.

SUMMARY

In the Yaqui Valley, Sonora, Mexico, agriculture depends on the reservoir system built in the Yaqui River basin, which has a storage capacity of 7008.4 hm³. For the 2003-2004 autumn-winter crop cycle, water utilization was not authorized for agricultural use due to the low storage level. In response, 350 million cubic meters of water was extracted from the aquifer. According to recent studies, most of the aquifer contains 1000 to 5000 mg L⁻¹ total dissolved solids. The objective of this study was to assess the water quality of 224 samples and classify them according to the best-known criteria. 164 samples were selected that had an ionic balance error of less than 5%, and the necessary parameters were calculated to classify the water for agricultural purposes. The average values for the evaluated characteristics were the following: pH, 7.25; electrical conductivity, 2.06 dS m⁻¹; Na⁺, 8.5; Ca²⁺, 7.69; Mg²⁺, 5.08; SO₄²⁻, 4.57; CO₃²⁻, 0.83; HCO₃⁻, 3.3; Cl⁻, 12.5 meq L⁻¹; sodium adsorption (SAR), 3.91; corrected SAR, 4.44; adjusted SAR, 8.82; adjusted SAR HCO₃⁻/Ca²⁺, 4.38; effective salinity, 14.8; potential salinity, 14.7; residual sodium carbonate, 0.57; permeability index, 53.3; percentage of exchangeable sodium (PES), 5.83. Water

¹ Centro de Investigación Regional del Noroeste, INIFAP. 85000 Ciudad Obregón, Sonora, México.

[‡] Autor responsable (cortes.juanmanuel@inifap.gob.mx)

² Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste. 23090 La Paz, Baja California Sur, México.

³ Instituto Tecnológico de Sonora. 85000 Ciudad Obregón, Sonora, México.

⁴ Rural Research Institute KARICO. 426-170 Ansan-si, Gyeonggi-do, Korea.

extracted from the Yaqui Valley aquifer shows that its use for irrigation of saline-sensitive species should be limited. Moreover, some wells have water of a quality that is not suitable for agricultural use since it could provoke an increase in soil salinity. In addition, the concentration of toxic ions such as Na^+ and Cl^- is high and is considered to be an additional restriction. Regarding Na^+ , most of the water samples extracted indicate a low risk of sodifying the soil, coinciding with most of the classification schemes used.

Index words: *salinity, SAR, sodification, anions, cations.*

INTRODUCCIÓN

El valle del Yaqui, Sonora, México, está conformado por dos distritos de riego, el 018 que opera 22 794 ha de las comunidades yaqui, y el 041 que maneja 233 166 ha. La actividad agrícola del valle depende del almacenamiento de agua en el sistema de presas construido en la cuenca del río Yaqui, el cual tiene una capacidad de almacenamiento de 7008.4 hm³, de los cuales 3227 corresponden a la presa Álvaro Obregón, la cual constituye la principal fuente de agua para riego en el valle. A partir de 1997 se observó una drástica reducción en la captación promedio de agua en el sistema de presas, registrándose en junio de 2004 el nivel de almacenamiento más bajo en la historia, con un 13% en el sistema de presas y un 12.7% en la presa Álvaro Obregón.

Esto ha originado un cambio significativo en el patrón de cultivos del Valle del Yaqui, ya que se pasó de una rotación de dos cultivos por año, a un sistema de monocultivo donde el trigo es el cultivo dominante. Esta situación afecta la economía de la región, debido a que con un solo cultivo prácticamente no existe actividad agrícola durante la mitad del año. Ante estas circunstancias, para el ciclo otoño-invierno 2003-2004 no se autorizó la extracción de agua para uso agrícola de la presa Álvaro Obregón y sólo se extrajo agua para uso doméstico. Una opción que permitió subsanar la falta de agua en el sistema de presas consistió en la operación de una red de pozos profundos, mediante los cuales se extrajeron del acuífero aproximadamente 350 millones de m³ y con lo cual fue posible establecer un programa de siembra de alrededor de 70 000 ha.

Estudios recientes indican que la mayor parte del acuífero del valle del Yaqui contiene un intervalo de 1000

a 5000 mg L⁻¹ de sólidos totales disueltos (STD) (González *et al.*, 2003). La información anterior es consistente con lo reportado por Sharma y Minhas (2005), quienes indican que las zonas caracterizadas por la falta de agua también destacan por sus acuíferos de mala calidad. Las áreas con acuíferos salinos incluyen las zonas con mayor aridez, con nivel freático superficial, con condiciones de saturación y las regiones costeras. Hamdy *et al.* (1993) coinciden en señalar que en las regiones áridas y semiáridas existe disponibilidad de agua salina, la cual proviene del drenaje agrícola o como intrusión de agua de mar cerca de las áreas costeras.

Según Letey *et al.* (2003), la calidad del agua es definida como “las propiedades químicas, físicas y biológicas del agua que afectan su uso”. De acuerdo con lo anterior, la calidad del agua no puede ser definida hasta que su uso sea especificado. Desde un punto de vista agrícola, la calidad del agua se refiere al tipo y la cantidad de sales presentes en ella; su efecto sobre el suelo, y el desarrollo y crecimiento de los cultivos. Las características más importantes que determinan la calidad del agua para riego son la concentración total de sales solubles, la concentración relativa del sodio con respecto a otros cationes, la concentración de boro u otros elementos que puedan ser tóxicos como el sodio y cloro (De Pascale y Barbieri, 1995), y bajo ciertas condiciones, la concentración de bicarbonatos con relación a la de calcio y magnesio. Los principales iones que se evalúan en el agua son calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+), sulfatos (SO_4^{2-}), cloruros (Cl^-), carbonatos (CO_3^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-) (Richards, 1954; Ayers y Westcot, 1985; Rhoades *et al.*, 1992; Glover, 1993). La calidad del agua de riego se determina de varias formas, incluyendo el grado de acidez y alcalinidad (pH), conductividad eléctrica (CE), carbonato de sodio residual (CSR), relación de adsorción de sodio (RAS) (Richards, 1954; Ayers y Westcot, 1985; Glover, 1993), salinidad efectiva, salinidad potencial, índice de permeabilidad (Ortiz, 1997).

Aunque durante mucho tiempo el agua salina se consideró como una fuente no utilizable en la agricultura debido a su efecto sobre las características físicas y químicas de los suelos (De Pascale y Barbieri, 1995), se ha encontrado que los antiguos estándares pueden ser cambiados para adoptar nuevas prácticas. Se sabe, por ejemplo, que el uso de agua salina afecta más en la etapa de germinación que en el desarrollo de las plántulas, por lo cual se recomienda una aplicación secuencial de agua dulce durante las etapas sensibles y de agua salina

durante las etapas tardías. Sin embargo, es de vital importancia determinar guías de manejo que minimicen el efecto adverso del uso del agua salina sobre el suelo y las plantas (Hamdy *et al.*, 1993), ya que, en años recientes, la sequía y la falta de planeación del uso del agua han llevado a utilizar agua altamente salina cuyas consecuencias sobre la degradación de los suelos es aún incierta (Pérez-Sirvent *et al.*, 2003). El potencial de reutilización de las aguas salinas depende de la calidad del agua, el tipo de suelo, los cultivos y las condiciones agro-climáticas (Sharma y Rao, 1998). Para Sharma y Minhas (2005), el manejo del agua salina comprende todos aquellos métodos, sistemas y técnicas de conservación del agua, remediación, desarrollo, aplicación, uso y remoción, que promuevan un nivel de uso social y ambientalmente favorable al menor costo posible.

Como estrategia para el aprovechamiento sostenible del agua del acuífero del valle del Yaqui, se planteó la necesidad de evaluar la composición química del agua, la textura predominante de los suelos, la precipitación, la evapotranspiración y la capacidad de retención de agua de los suelos, así como la tolerancia a sales de los cultivos de mayor importancia en el valle del Yaqui, Sonora, para lo cual, la determinación de la calidad del agua y su clasificación constituyó el primer paso para lograr este propósito.

Los objetivos del presente trabajo fueron determinar los índices de calidad del agua procedente del acuífero del valle del Yaqui y compararlos con los criterios más conocidos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El valle del Yaqui se localiza en el sur del estado de Sonora, entre 108° 53' y 110° 37' O y 26° 53' y 28° 37' N. El clima predominante en la región corresponde al BW(h)hw que se define como muy seco cálido, y BS0 seco muy cálido. La precipitación anual es de 280 mm (promedio de 45 años) y la evaporación de 2005 mm (promedio de 20 años). Los tipos de suelo, de acuerdo con la clasificación FAO/ UNESCO modificada por la Dirección General de Geografía del Territorio Nacional (DGGTENAL), corresponden a Xerosoles, Vertisoles, Fluvisoles, Yermosoles y Solonchak (Jiménez, 1999). Aproximadamente un 12% de los suelos cultivables se clasifican como salinos, salino sódicos y sódicos. Un 33% de los suelos posee una textura franco limosa, un 5.6% son de textura franco arenosa, un 16.4% son de textura

franco arcillosa, y el resto (45%) son de textura arcillosa (Jiménez, 1999).

El diagnóstico de la calidad del agua se realizó en el Campo Experimental Valle del Yaqui-INIFAP, durante 2004 y 2005. Se estudió la composición química de 226 muestras de agua procedentes de pozos profundos ubicados en el valle del Yaqui, Sonora. Parte de la información fue aportada por la sociedad de usuarios del distrito de riego del río Yaqui, otra parte se obtuvo de trabajos realizados por el Instituto Tecnológico de Sonora, y el resto mediante muestreo directo de pozos en operación. Se seleccionaron 164 análisis que cumplieron con un error de balance iónico menor o igual al 5% de acuerdo con la función $e = (\Sigma \text{cationes} - \Sigma \text{aniones}) / (\Sigma \text{cationes} + \Sigma \text{aniones}) * 100$ (Soltan, 1998). Las variables estudiadas en el agua fueron el pH, la conductividad eléctrica (CE), la concentración de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} y HCO_3^- ; así como el cálculo de la salinidad efectiva (SE), la salinidad potencial (SP), el carbonato de sodio residual (CSR), el índice de permeabilidad (IP), el porcentaje de sodio intercambiable (PSI), la relación de adsorción de sodio (RAS), el RAS corregido (RAS_c), el RAS ajustado (RAS_{aj}), el RAS ajustado/2 ($\text{RAS}_{aj}/2$), el RAS corregido por la relación $\text{HCO}_3^-/\text{Ca}^{2+}$ (RAS_{ca}), y las clasificaciones reportadas por Wilcox (1948), Richards (1954), Ayers y Westcot (1985) y Ortiz (1997).

Los índices de calidad del agua de riego se determinaron a partir de las metodologías descritas por los autores mencionados anteriormente:

Salinidad efectiva (SE):

$$1. \text{ Si } [\text{Ca}^{2+}] > [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}] \\ \text{SE} = [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+] - [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]$$

$$2. \text{ Si } [\text{Ca}^{2+}] < [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}] \text{ y } [\text{Ca}^{2+}] > [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-] \\ \text{SE} = [\text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+]$$

$$3. \text{ Si } [\text{Ca}^{2+}] < [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-] \text{ y } [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] > [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-] \\ \text{SE} = [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Na}^+ + \text{K}^+] - [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-]$$

$$4. \text{ Si } [\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] < [\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-] \\ \text{SE} = [\text{Na}^+ + \text{K}^+]$$

Salinidad potencial

$$SP = [Cl^-] + \frac{1}{2}[SO_4^{2-}]$$

Carbonato de sodio residual

$$(CSR) = (CO_3^{2-} + HCO_3^-) - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

$$PSI = 1.475 RAS/1 + 0.0147 RAS \quad (\text{Tanji, 1990}).$$

$$RAS = Na^+ / \sqrt{\frac{1}{2}(Ca^{2+} + Mg^{2+})}$$

$$RAS \text{ corregida } (RAS_c) = 0.08 + 1.115 RAS$$

(Sposito y Mattigod, 1977).

$$RAS \text{ ajustada } (RAS_{aj}) = RAS[1 + (8.4 - pH_c)]$$

y $pH_c = (pK_2 - pKc) + p(Ca^{2+} + Mg^{2+}) + pAlk$

donde: $pK_2 - pKc = \text{Suma de } (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)$;
 $p(Ca^{2+} + Mg^{2+}) = (Ca^{2+} + Mg^{2+})$; y $pAlk = (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ en meq L⁻¹.

$$RAS \text{ ajustado}/2 (RAS_{aj}/2) \text{ (Suárez, 1981)}$$

$$RAS_{Ca} = Na^+ / \sqrt{\frac{1}{2}(Ca_x^{2+} + Mg^{2+})}$$

donde: Ca_x se calcula de la relación HCO_3^-/Ca^{2+} y la fuerza iónica (CE) del agua (Suárez, 1981; Ayers y Westcot, 1985).

Porcentaje de sodio posible

$$(PSP) = [Na^+/Salinidad \text{ efectiva}] * 100.$$

$$\text{Índice de permeabilidad (IP)} = [(Na^+ + HCO_3^-)/(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)] * 100$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del análisis químico de las muestras de agua se reportan en el Cuadro 1. El 81.7% de las muestras presentó valores de CE que se ubicaron dentro del intervalo reportado para aguas agrícolas (0 a 3 dS m⁻¹), mientras que el resto se ubicó en un promedio de 4.25 dS m⁻¹. En el caso del Na⁺ y el SO₄²⁻, todos los valores se ubicaron dentro del intervalo reportado para aguas agrícolas por Ayers y Westcot (1985) que son de 0 a 40 y de 0 a 20 meq L⁻¹, respectivamente.

En Mg²⁺, el intervalo para aguas agrícolas es de 0 a 5 meq L⁻¹ y un 39% de las muestras superaron los valores mencionados. En Ca²⁺, la proporción de muestras que se ubicaron dentro del intervalo para aguas agrícolas

(0 a 20 meq L⁻¹) fue del 95.1% y sólo un 4.9% rebasó el intervalo de referencia. Con respecto al CO₃²⁻, un 29.27% de las muestras rebasó el intervalo de referencia (0 a 0.1 meq L⁻¹) y en el resto no se detectó este ion. En el caso del HCO₃⁻, todos los valores (excepto uno que fue el valor máximo) estuvieron entre 0 y 10 meq L⁻¹, mientras que el ion Cl⁻ estuvo dentro del intervalo de 0 a 30 meq L⁻¹ en 90.3% de los casos.

En el caso del RAS, todos los valores excepto el máximo se ubicaron entre 0 y 15 para aguas agrícolas. Cuando el RAS se ajustó por su índice de saturación, un 23% de las muestras superaron el intervalo mencionado y presentaron una media de 19.54%; mientras que, al utilizar el valor de RAS ajustado, el valor de este parámetro se incrementó en promedio por un factor de 2.25. En este sentido, los nuevos criterios para la determinación del RAS han llevado a la sobreestimación del mismo, por lo cual Suárez (1981) propuso que el valor de RAS ajustado se dividiera entre dos; así, el valor del RAS se incrementó en un 12% con respecto al cálculo original.

Por su salinidad efectiva, un 4.27% de los pozos extraen agua de buena calidad (menos de 3 meq L⁻¹),

Cuadro 1. Indicadores de calidad de muestras de agua del acuífero del valle del Yaqui, Sonora.

Variable	Mínimo	Máximo	Media	DS [†]	EEx [‡]
pH	6.38	8.37	7.25	0.39	0.03
CE [§] (dS m ⁻¹)	0.34	6.8	2.06	1.29	0.101
Na ⁺ (meq L ⁻¹)	0.81	25	8.5	5.37	0.42
Ca ²⁺ (meq L ⁻¹)	0.6	33.6	7.69	6.22	0.486
Mg ²⁺ (meq L ⁻¹)	0.12	20.8	5.08	4.09	0.319
SO ₄ ²⁻ (meq L ⁻¹)	0.02	15.8	4.57	3.79	0.296
CO ₃ ²⁻ (meq L ⁻¹)	0.00	6.0	0.83	1.46	0.114
HCO ₃ ⁻ (meq L ⁻¹)	0.25	15.3	3.3	2.15	0.168
Cl ⁻ (meq L ⁻¹)	0.69	51.3	12.5	11.05	0.863
RAS [#]	0.37	15.6	3.91	2.77	0.216
RAS _c	0.49	17.5	4.44	3.09	0.241
RAS _{aj}	0.98	30.7	8.82	6.05	0.473
RAS _{aj} /2	0.49	15.33	4.41	3.03	0.236
RAS _{Ca}	0.50	16.48	4.38	3.07	0.24
PSI [¶]	0.60	23.2	5.83	4.13	0.322
CSR ^{††}	0.00	6.67	0.57	1.48	0.116
IP ^{**}	12.1	100	53.3	20.98	1.69
SE ^{§§}	1.51	51.5	14.8	10.07	0.786
SP ^{###}	1.28	58.5	14.7	12.09	0.945

[†]DS = desviación estándar; [‡]EEx = error estándar de la media; [§]CE = conductividad eléctrica; [#]RAS = relación de adsorción de sodio; [¶]PSI = porcentaje de sodio intercambiable; ^{††}CSR = carbonato de sodio residual; ^{**}IP = índice de permeabilidad; ^{§§}SE = salinidad efectiva y ^{###}SP = salinidad potencial.

54.27% condicionada (3 a 15 meq L⁻¹) y 41.46% de mala calidad (mayor de 15 meq L⁻¹); mientras que, por su salinidad potencial, los porcentajes correspondientes fueron de 12.2, 9.14 y 78.66 para los pozos que extraen agua de buena calidad, condicionada y de mala calidad respectivamente; lo anterior, considerando la interpretación para suelos mal drenados. Por el valor del CSR, 85.9% de las muestras se clasificaron como agua de buena calidad, 4.9% como marginales y 9.2% de mala calidad; mientras que el valor del PSP rebasó en un 67.1% de las muestras el umbral de 50, valor al cual el agua puede volver sódico a un suelo, por lo cual se recomienda mezclarlas con mejoradores y no aplicarlas en suelos arcillosos.

Por su IP, donde se considera, además, el valor de la salinidad (en meq L⁻¹), la mayor proporción de los pozos extraen agua Clase I, es decir, que no representa peligro de sodificación; sin embargo, un 30.49% extraen agua condicionada donde puede esperarse una pérdida en la permeabilidad del suelo de 35 a 75% en suelos arcillosos, y 3.66% extraen agua no recomendada, ya que puede ocasionar una pérdida en la permeabilidad mayor de 75%. De acuerdo con la clasificación reportada por Wilcox (1948), un 7.32% de los pozos extraen agua de excelente a buena (Clase I), 34.15% de buena a aceptable (Clase II), 17.68% de aceptable a dudosa (Clase III), 22.56% de dudosa a inadecuada (Clase IV) y 18.29% inadecuada (Clase V).

De acuerdo con Richards (1954), quien aplica el criterio de interpretación más conocido, un 62% de los pozos extraen agua con un RAS clasificado como S1 (agua baja en Na⁺) y 32.9% son S2 (agua media en Na⁺). Un 43.3% de los pozos extraen agua clasificada como C3 o sea altamente salina. La mayor proporción de pozos correspondió a la clase C3S1 (Figura 1). La clase S3 y S4 corresponde al agua con alta y muy alta concentración de Na⁺, mientras que la clase C1 corresponde al agua de baja salinidad, C2 a salinidad media, C4 es muy altamente salina y C5 corresponde a una CE mayor de 5.0 dS m⁻¹.

Al utilizar la clasificación de Ayers y Westcot (1985), se encontró que por su CE la mayor proporción de los pozos extraen agua con una restricción en uso de ligero a moderado (Cuadro 2). Respecto a su efecto sobre la infiltración, el 76.83% de los pozos no presentó ninguna restricción en relación con esta característica (Cuadro 3). Para esta última evaluación se tomó en cuenta el valor de RAS propuesto por Richards (1954). Con relación a la concentración de elementos tóxicos,

un 14.02% de los pozos extraen agua con un riesgo de toxicidad bajo en Na⁺ (menor de 3 meq L⁻¹), 45.13% con un riesgo medio (3 a 9 meq L⁻¹), y 40.85% con un riesgo alto (más de 9 meq L⁻¹). Por otra parte, un 23.17% de los pozos extraen agua con riesgo bajo de toxicidad por Cl⁻ (menos de 4 meq L⁻¹), 31.71% con un riesgo medio (4 a 10 meq L⁻¹) y 45.12% de los pozos con un riesgo alto de toxicidad (más de 10 meq L⁻¹). De acuerdo con Rhoades *et al.* (1992) y Ayers y Westcot (1985), los frutales, lo mismo que la mayoría de las hortalizas y cultivos como frijol y maíz, requieren que la CE del agua de riego se ubique entre 1.0 y 1.8 dS m⁻¹, el cual es el intervalo de CE en que prosperan las especies sensibles a la salinidad. Con relación al Cl⁻, los valores obtenidos son altos para especies como el aguacate, para algunos patrones de cítricos, así como para algunas variedades de vid.

La correlación entre variables se reporta en los Cuadros 4 y 5, los mayores coeficientes se observaron entre la CE y la concentración de Cl⁻, Ca²⁺ y Mg²⁺. Xefteris *et al.* (2004) reportan alta correlación de la CE con Cl⁻ y Na⁺ e indican que una relación Ca²⁺+Mg²⁺/K⁺+Na⁺ menor de 1 es una evidencia de intrusión salina. En el caso del acuífero del valle del Yaqui, el valor promedio de la relación fue de 2.15; sin embargo, un 30.5% de las muestras tuvieron un valor menor de la unidad. En general, se observó una estrecha relación entre los índices calculados, pues destaca la correlación entre los diferentes valores de RAS obtenidos, y entre la CE, la salinidad efectiva y la potencial (Cuadro 5). De acuerdo con lo anterior, es factible estimar algunas de las variables y hacer más simple la clasificación del agua. Kalenhonkar *et al.* (2001) citan resultados donde el valor de PSI tuvo una alta correlación con la concentración de CO₃²⁻ + HCO₃⁻, seguido del CSR y la RAS del agua de riego. En el presente estudio, el PSI tuvo un coeficiente de correlación positivo más alto con la RAS que con el CSR.

La mayoría de los criterios utilizados coinciden en que, por su salinidad, el agua tiene restricciones en aproximadamente un 40% de los casos. Al considerar la composición iónica, la mayoría de las muestras se consideraron como de mala calidad (salinidad efectiva y potencial), criterios que coincidieron con los de Ayers y Westcot (1985), ya que la concentración de Na⁺ y Cl⁻ se clasificó como de alto riesgo en un 41 y 45% de los casos, respectivamente. Como estrategia de manejo de aguas salinas, el uso de agua de Clase III y Clase IV sólo puede utilizarse en el riego de suelos de

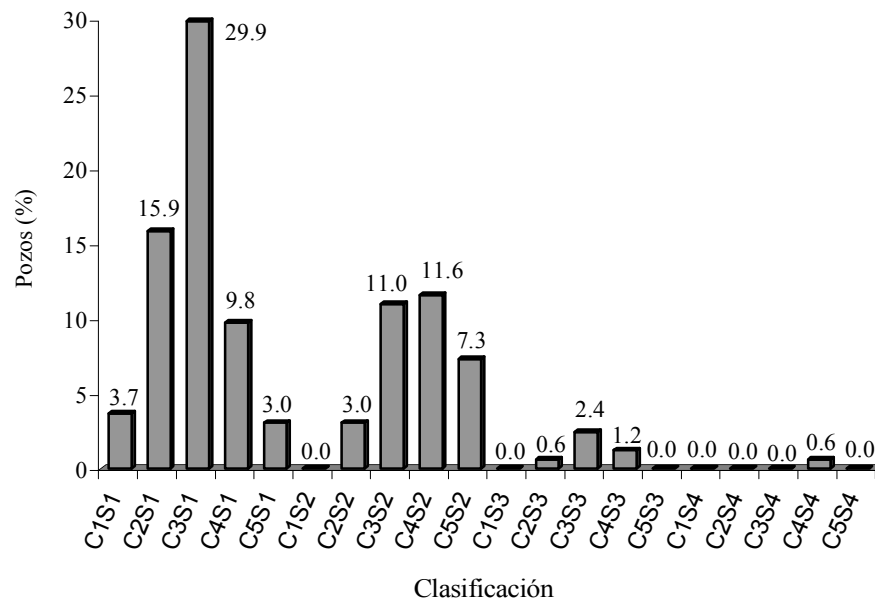


Figura 1. Clasificación del agua del acuífero del Valle del Yaqui, de acuerdo con Richards (1954).

buena permeabilidad. Al respecto, se debe considerar que más de la mitad de los suelos del valle del Yaqui se clasifican texturalmente como arcillas y presentan drenaje interno restringido (Jiménez, 1999). Debido a su efecto en la capacidad de drenaje del suelo, estas características son consideradas como factores de riesgo de degradación de suelos cuando se aplica agua salina (Miralles *et al.*, 2002). Sin embargo, los criterios utilizados coincidieron en que la mayor parte de las muestras no presenta un riesgo de sodificación para el suelo. No obstante, la utilización de aguas salinas en otras zonas de riego ha provocado el desarrollo de problemas de salinidad, sodicidad y toxicidad en el suelo, lo cual no sólo ha reducido la productividad, sino también ha limitado la elección de cultivos (Minhas, 1996).

En términos generales, la acumulación de sales como resultado de la irrigación con agua salina, es un serio problema en las regiones áridas y semiáridas.

Cuadro 2. Clasificación del agua del acuífero del valle del Yaqui por el valor de la conductividad eléctrica (CE).

CE	Pozos	Restricción en uso
--- dS m ⁻¹ ---	--- % ---	
Menor de 0.7	6.1	Ninguno
Entre 0.7 y 3.0	75.61	Ligero a moderado
Mayor de 3.0	18.29	Severo

El desarrollo de la salinidad está determinado por varios factores, dentro de los cuales se pueden mencionar: concentración total de sales y composición iónica del agua de riego, frecuencia de riego, características del drenaje, tipo de suelo, tipo y cantidad de arcilla, profundidad del suelo, presencia de estratos compactados o una capa arcillosa, profundidad del manto

Cuadro 3. Clasificación del agua del acuífero del valle del Yaqui por su efecto sobre la infiltración.

RAS [†]	CE [‡]	Restricción en uso	
	- - dS m ⁻¹ - -	%	
0 - 3	Mayor de 0.7	40.85	Ninguno
	Entre 0.2 y 0.7	4.88	Ligero o moderado
	Menor de 0.2	0	Severo
3 - 6	Mayor de 1.2	29.88	Ninguno
	Entre 0.3 y 1.2	6.1	Ligero o moderado
	Menor de 0.3	0	Severo
6 - 12	Mayor de 1.9	5.49	Ninguno
	Entre 0.5 y 1.9	10.36	Ligero o moderado
	Menor de 0.5	0.61	Severo
12 - 20	Mayor de 2.9	0.61	Ninguno
	Entre 1.3 y 2.9	1.22	Ligero o moderado
	Menor de 1.3	0	Severo
20 - 40	Mayor de 5.0	0	Ninguno
	Entre 2.9 y 5.0	0	Ligero o moderado
	Menor de 2.9	0	Severo

[†]RAS = relación de adsorción de sodio; [‡]CE = conductividad eléctrica.

Cuadro 4. Coeficientes de correlación entre las variables analizadas.

	CE [†]	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻
Na ⁺	0.571 0.000						
Ca ²⁺	0.907 0.000	0.268 0.000					
Mg ²⁺	0.894 0.000	0.270 0.000	0.868 0.000				
SO ₄ ²⁻	0.677 0.000	0.247 0.001	0.721 0.000	0.720 0.000			
HCO ₃ ⁻	-0.164 0.035	0.184 0.017	-0.219 0.004	-0.160 0.038	-0.150 0.052		
Cl ⁻	0.958 0.000	0.599 0.000	0.849 0.000	0.819 0.000	0.498 0.000	-0.270 0.000	
RAS [‡]	0.019 0.812	0.380 0.000	-0.246 0.001	-0.270 0.000	-0.105 0.178	0.366 0.000	0.043 0.582

[†] CE = conductividad eléctrica; [‡] RAS = relación de adsorción de sodio. El primer valor en la columna representa el coeficiente de correlación; el segundo, en orden descendente, la significancia.

freático y condiciones climáticas (Paliwal y Gandhi, 1973). La salinidad del suelo se incrementa en forma proporcional a la concentración de sales del agua de riego (Hamdy *et al.*, 1993; De Pascale y Barbieri, 1995;

Sharma y Rao, 1998; Pérez-Sirvent *et al.*, 2003), y tal incremento puede ser de dos a seis veces la conductividad del agua de riego (Hamdy *et al.*, 1993; Pérez-Sirvent *et al.*, 2003), lo cual sucede también con el valor del RAS (Sharma y Rao, 1998). Un incremento en el valor del RAS reduce el índice de estructura y la tasa de infiltración (De Pascale y Barbieri, 1995).

Las correlaciones significativas entre CE, SE y SP, lo mismo que con la concentración de Cl⁻, SO₄²⁻, Ca²⁺, Mg²⁺ y Na⁺, permiten hacer una estimación de dichos valores a partir de la CE del agua. Con respecto al RAS, se observó que todos los valores obtenidos están correlacionados entre sí. En la actualidad, el método utilizado (Ayers y Westcot, 1985) difiere del de Richards (1954) en un 12%, con la ventaja de que por este último el cálculo es más fácil. Existe discrepancia entre estos dos métodos al relacionar el RAS con la CE, ya que, según los dos primeros autores, el riesgo de sodificación disminuye a medida que se incrementa la CE del agua, mientras que el criterio de Richards (1954) establece lo contrario.

Los criterios establecidos por Ayers y Westcot (1985) definen, de mejor manera, el riesgo de salinización y

Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre los indicadores calculados.

Indicador	CE [†]	RAS [‡]	RAS _c	RAS _{aj}	RAS _{aj} /2	RAS _{Ca}	PSI [§]	CSR [¶]	PSP [#]	IP ^{**}	SE ^{**}
RAS	0.019 0.812										
RAS _c	0.018 0.813	1.000 0.000									
RAS _{aj}	0.106 0.171	0.952 0.000	0.952 0.000								
RAS _{aj} /2	0.123 0.116	0.935 0.000	0.935 0.000	1.000 0.000							
RAS _{Ca}	0.043 0.587	0.960 0.000	0.935 0.000	0.965 0.000	0.965 0.000						
PSI	0.019 0.809	1.000 0.000	1.000 0.000	0.952 0.000	0.935 0.000	0.960 0.000					
CSR	-0.895 0.000	0.345 0.000	0.345 0.000	0.292 0.000	0.518 0.000	0.555 0.000	0.345 0.000				
PSP	-0.451 0.000	0.672 0.000	0.672 0.000	0.632 0.000	0.632 0.000	0.669 0.000	0.672 0.000	0.541 0.000			
IP	-0.510 0.000	0.717 0.000	0.717 0.000	0.635 0.000	0.636 0.000	0.703 0.000	0.716 0.000	0.747 0.000	0.852 0.000		
SE	0.949 0.000	0.206 0.007	0.206 0.007	0.291 0.000	0.314 0.000	0.242 0.000	0.207 0.007	-0.791 0.000	-0.334 0.000	-0.341 0.000	
SP	0.982 0.000	0.020 0.795	0.020 0.796	0.092 0.238	0.151 0.000	0.078 0.000	0.201 0.793	-0.900 0.000	-0.442 0.000	-0.490 0.000	0.961 0.000

[†] CE = conductividad eléctrica; [‡] RAS = relación de adsorción de sodio; [§] PSI = porcentaje de sodio intercambiable; [¶] CSR = carbonato de sodio residual; [#] PSP = porcentaje de sodio posible; ^{**} IP = índice de permeabilidad y ^{**} SE = salinidad efectiva. El primer valor en la columna representa el coeficiente de relación; el segundo, en orden descendente, la significancia.

sodificación del suelo, además de establecer el riesgo biológico de usar agua salina, ya que incorporan los umbrales y el rendimiento relativo de los cultivos asociado al incremento en la salinidad del agua.

Desde un punto de vista sostenible y en ausencia de prácticas de manejo que eviten una degradación irreversible de los suelos, es más seguro utilizar los criterios que recomiendan el uso de agua con menor salinidad, ya que la irrigación con agua de mala calidad tiende a incrementar la salinidad y, como consecuencia, la utilización de agua salina a largo plazo puede provocar una reducción en el crecimiento de las plantas y la degradación de los suelos. Estos problemas podrían minimizarse o evitarse a través de un cuidadoso manejo del suelo y del cultivo que ayuden a reducir el impacto del uso del agua salina en la agricultura; de manera adicional, los agricultores deben ser informados acerca del riesgo que conlleva utilizar aguas de mala calidad y el manejo adecuado de los suelos bajo dichas circunstancias, independientemente de que más investigaciones son necesarias para mejorar el proceso de toma de decisiones en el manejo sostenible de suelos y aguas.

CONCLUSIONES

- Todos los criterios de evaluación utilizados coincidieron en que el agua extraída del acuífero del valle del Yaqui muestra limitaciones para la irrigación de especies sensibles a la salinidad, principalmente en suelos arcillosos; además de que existen pozos de los cuales se extrae agua cuya calidad no es recomendable para uso agrícola, pues su utilización podría provocar un incremento en la salinidad del suelo. Por otra parte, la concentración de iones tóxicos, como sodio y cloro, es alta, lo cual se considera una restricción adicional. Con relación al sodio, la mayoría de los pozos extraen agua con un riesgo bajo de sodificación del suelo, en lo cual coinciden la mayoría de los esquemas de clasificación utilizados.

- La mayoría de los indicadores de calidad del agua evaluados, a excepción de la relación de adsorción de sodio (RAS), están correlacionados con la conductividad eléctrica (CE); mientras que los valores de RAS están correlacionados entre sí. De acuerdo con lo anterior, ambos indicadores son los más importantes en el diagnóstico de la calidad del agua. El valor de CE interpretado de acuerdo con la FAO, y el cálculo e interpretación del RAS, de acuerdo con Richards o Ayers

y Westcot, son los criterios más adecuados, suficientes y sencillos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Sociedad de Usuarios del Distrito de Riego del Río Yaqui por aportar gran parte de la información del acuífero del valle del Yaqui usada en este estudio, así como a Fundación Produce Sonora, A.C., INIFAP-CIRNO-CEVY Cd. Obregón Son., CIBNOR, y al Fondo Sectorial CONACyT-CONAFOR (Proyecto 034-C) por el apoyo económico y logístico brindado.

LITERATURA CITADA

- Ayers, R. S. and D. W. Westcot. 1985. Water quality for agriculture. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- De Pascale, S. and G. Barbieri. 1995. Effects of soil salinity from long-term irrigation with saline-sodic water on yield and quality of winter vegetable crops. *Sci. Hortic.* 64: 145-157.
- Glover, C. R. 1993. Irrigation water classification systems. Cooperative Extension Service. New Mexico State University. Guide A-116. Las Cruces, NM, USA.
- González, R., A. Canales y L. E. Marin. 2003. Salinización de suelos y acuíferos: el caso del Valle del Yaqui, Sonora, México. *Revista Contacto Ecológico.* H. Ayuntamiento de Cajeme 5: 19-23.
- Hamdy, A., S. Abdel-Dayem, and M. Abu-Zeid. 1993. Saline water management for optimum crop production. *Agric. Water Manage.* 24: 189-203.
- Jiménez, G. E. 1999. El campo experimental valle del Yaqui: su importancia en la producción agrícola en el sur de Sonora. Folleto informativo 1. Campo Experimental Valle del Yaqui-INIFAP. Ciudad Obregón, Sonora, México.
- Kalenhonkar, M. J., N. K. Tyagi, and S.E.A.T.M. van der Zee. 2001. Solute transport modelling in soil for irrigation field experiments with alkali water. *Agric. Water Manage.* 51: 153-171.
- Letey, J., E. R. Sojka, R. D. Upchurch, K. D. Cassel, R. K. Olson, A. W. Payne, E. S. Petrie, H. G. Price, J. R. Reginato, D. H. Scott, J. P. Smethurst, and B. G. Triplett. 2003. Deficiencies in the soil quality concept and its application. *J. Soil Water Conserv.* 58: 180-187.
- Minhas, P. S. 1996. Saline water management for irrigation in India. *Agric. Water Manage.* 30: 1-24.
- Miralles, I., R. Ortega, Y. Canton y C. Asensio. 2002. Degradación del suelo por exceso de sales y su relación con la topografía en un suelo del sur de España. *Agrochimica* 46: 270-279.
- Ortiz, O. M. 1997. La calidad de las aguas de riego. Universidad Autónoma Chapingo. Estado de México, México.
- Paliwal, K. V. and A. P. Gandhi. 1973. Some relationships between quality of irrigation waters and chemical characteristics of irrigated soils of the Nagaur District, Rajasthan. *Geoderma* 9: 213-220.

- Pérez-Sirvent, C., M. J. Martínez-Sánchez, and J. V. Sánchez. 2003. Efecto del riego con agua de mala calidad sobre la desertificación de zonas semi-áridas en Murcia, España. *Geoderma* 113: 109-125.
- Rhoades, J. D., A. Kandiah, and A. M. Mashali. 1992. The use of saline waters for crop production. Irrigation and drainage paper 48. Food and Agriculture Organization. Rome, Italy.
- Richards, L. A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. Handbook 60. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Sharma, B. R. and P. S. Minhas. 2005. Strategies for managing saline/alkali waters for sustainable agricultural production in South Asia. *Agric. Water Manage.* 78: 136-151.
- Sharma, D. P. and K.V. G. K. Rao. 1998. Strategy for long term use of saline drainage water for irrigation in semi-arid regions. *Soil Tillage Res.* 48: 287-295.
- Soltan, M. E. 1998. Characterization, classification and evaluation of some ground water samples in upper Egypt. *Chemosphere* 37: 735-745.
- Sposito, G. and D. V. Mattigod. 1977. On the chemical foundation of the sodium absorption ratio. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41: 323-329.
- Suárez, D. L. 1981. Relation between pH_c and sodium adsorption ratio (SAR) and an alternate method of estimating SAR of soil or drainage waters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45: 469-475.
- Tanji, K. K. 1990. Nature and extent of agricultural salinity. *In:* Tanji, K.K. (ed). *Agricultural Salinity Assessment and Management*. ASCE Manual No. 71. American Society of Civil Engineers. New York, NY, USA.
- Wilcox, L. V. 1948. The quality of water for irrigation. *Tech. Bull.* 962. US Department of Agriculture. Washington, DC, USA.
- Xeferis, A., P. Anastasiadis, and P. Latinopoulos. 2004. Groundwater chemical characteristics in Kalamaria plain, Halkidiki peninsula, Greece. *Fresenius Environ. Bull.* 13: 1159-1167.