

Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera

Quality and suitability of the agricultural and domestic water use of the Sinaloa river aquifer, coastal zone

Héctor José Peinado-Guevara,^{1,6} Carlos René Green-Ruiz,² Jaime Herrera-Barrientos,³ Óscar Arnoldo Escolero-Fuentes,¹ Omar Delgado-Rodríguez,⁴ Salvador Isidro Belmonte-Jiménez⁵ y María de los Ángeles Ladrón de Guevara⁵

¹Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria, C.P. 04510 México, D. F.

²Inst. de Ciencias del Mar y Limnología, (UNAM), Av. Joel Montes Camarena s/n, Mazatlán, Sin. 82040 México

³Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), km. 107 Carretera Tijuana-Ensenada, Ensenada, B.C. 22860 México

⁴Instituto Mexicano del Petróleo, Eje Central Lázaro Cárdenas Norte 152, San Bartolo Atepehuacan, Gustavo A. Madero, 07730, Distrito Federal

⁵Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional (CIDIR) Oaxaca, Hornos 1003, Col. Noche Buena, Santa Cruz Xoxocotlan, Oaxaca, México

⁶Escuela de Ciencias Económicas y Administrativas Guasave, Universidad Autónoma de Sinaloa, Carretera a las Glorias S/N, Colonia San Joaquín 81101, Guasave, Sinaloa
e-mail: hpeinado75@hotmail.com

Peinado-Guevara H. J., C. R. Green-Ruiz, J. Herrera-Barrientos, O. A. Escolero-Fuentes, O. Delgado-Rodríguez, S. I. Belmonte-Jiménez y M. Á. Ladrón de Guevara. 2011. Calidad y aptitud de uso agrícola y doméstico del agua del acuífero del río Sinaloa, porción costera. *Hidrobiológica* 21(1): 63-76.

RESUMEN

El valle de Guasave, Sinaloa, es eminentemente agrícola y cuenta con comunidades rurales que se abastecen de agua para su uso doméstico mediante pozos ubicados en sus predios. La actividad económica y social de dicho valle demanda agua para ambas actividades, por lo que su extracción se ha desplazado hacia la zona costera, siendo importante conocer los mecanismos naturales que controlan la composición química del agua, su calidad, su variación temporal atendiendo a la aptitud de uso agrícola o doméstica. Para determinar el mecanismo que controla la composición química del agua se utilizó el diagrama de Gibbs, encontrándose que el mecanismo dominante es por evaporización-meteorización. Respecto al agua para uso doméstico se utilizó el índice de calidad PHASECH, encontrándose que el agua cumple con el mismo sólo en las proximidades del río Sinaloa. En cuanto a la aptitud de uso agrícola del agua se utilizó el diagrama de Wilcox, encontrándose que sólo el 48% del agua de la zona se clasifica como buena a admisible. En cuanto al riesgo de salinización o sodificación del suelo por el uso del agua de riego, se usó el diagrama de salinidad del Departamento de Agricultura de Estados Unidos de Norteamérica, encontrándose que el 35% del agua se ubica en la zona C_3S_1 . La relación obtenida entre los sólidos totales disueltos y la conductividad eléctrica del agua, fue $EC = 1.65$ STD. Se concluye además, que el acuífero del río Sinaloa es altamente sensible a la salinización por su carácter costero y presencia de cuerpos evaporíticos alejados de la línea de costa, por lo que, el peligro de intrusión salina ante un periodo de sequía es latente. La presencia del río Sinaloa es un elemento relevante de recarga que permite mantener el agua subterránea en condiciones aptas para la agricultura y muy cercanas a las requeridas para uso doméstico.

Palabras clave: índice de calidad, aniones y cationes, RAS, Wilcox, sólidos totales disueltos

ABSTRACT

The Guasave valley, Sinaloa is mainly agricultural. There are rural communities that supply water for domestic use from local wells. Economic and social activities occurring on this valley demand water, so that water extraction has shifted to the coastal zone. For this reason, it is important to know the natural mechanisms that control the water chemical

composition, its quality, its impact on the ground and its temporal variation in response to its suitability for agricultural or domestic use. To determine the mechanism controlling the water chemistry, the Gibbs diagram was used and it was found that the dominant mechanism is evaporation-weathering. Regarding the domestic use of water, PHASECH quality index was used, finding that water quality is only acceptable near the Sinaloa river. Concerning the suitability for agricultural water use, Wilcox diagram was employed and only 48% the water in the area was classified from good to admissible. Regarding the risk of soil salinization or sodification, the salinity diagram of the U. S. Department of Agriculture was used and it was observed that 35% of the water was located in the C3S1 area. The interrelationship between total dissolved solids and electrical conductivity of water was $EC = 1.65 \text{ TDS}$. In addition, it is concluded that the Sinaloa river aquifer is highly sensitive to salinity due its coastal character and the presence of evaporitic bodies far away from the coastline, therefore the threat of saltwater intrusion during a dry period is latent. The presence of the Sinaloa river is an important recharging element that keeps groundwater in suitable conditions for agriculture and very close to those required for domestic use.

Key words: quality index, anions and cations, SAR, Wilcox, total dissolved solids.

INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso importante y su cantidad y calidad juegan un papel importante en el desarrollo socio-económico de las comunidades (Jamrah *et al.*, 2008), por lo que es necesario establecer una evaluación de la situación en que se encuentran los acuíferos con objeto de implementar programas de explotación racional. Las necesidades urbanas, industriales y agrícolas han traído consigo una explotación intensiva de algunos acuíferos, manifestándose en un descenso de su nivel potenciométrico y, a veces, un incremento en la salinidad de sus aguas (Astier, 1982).

Más de 600 acuíferos están siendo explotados en México, aproximadamente diez son supervisados regularmente y el resto sólo esporádicamente. Muchos de ellos sirven como el principal suministro de agua potable para la población y el riego (Marín *et al.*, 1998).

En el estado de Sinaloa, a pesar de contar con once importantes ríos tributarios, en los periodos de escasez de agua superficial se aprovechan las subterráneas. En el municipio de Guasave, Sinaloa, las aguas superficiales y subterráneas se utilizan en labores domésticas, agrícolas, industriales y pecuarias. La agricultura es la actividad económica que consume los mayores volúmenes de agua, por lo que en el periodo de sequía existe un déficit para esta actividad y en consecuencia es necesario utilizar agua subterránea de forma que, del total anual, 17 % proviene de pozos y el resto es de origen superficial (83%).

El agua para uso y consumo humano por lo general proviene de pozos, por lo que es de interés para el presente estudio verificar las zonas que cumplen con los parámetros de calidad del agua conforme a diversas instituciones como la Organización Mundial de Salud (OMS, 2006) y la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (SSA, 1995). Aunque la tendencia de la población a ingerir agua "purificada" es creciente, en algunas comunidades rurales todavía es común consumir el agua extraída de los pozos, lo que puede poner en riesgo su salud.

La calidad del agua subterránea está regida por diversos factores, entre otros, los físicos, químicos, biológicos, rangos y periodos de explotación y tipo de acuífero. La regulación nacional e internacional establece una serie de requisitos que debe de cumplir el agua según su uso. Entre los parámetros vinculados con la calidad se encuentran el pH, dureza, concentración de sodio, sólidos totales disueltos y cloruros. Dependiendo de la calidad del agua su uso puede ser limitado, atendiendo a los estándares normativos oficiales.

Existen algunos estudios realizados al acuífero del río Sinaloa, por ejemplo, el de la compañía Servicios Geológicos, S.A. (1978), que realizó 120 sondeos eléctricos verticales (SEV), concluyendo que la mayor parte del subsuelo del área investigada se encuentra contaminada por agua de mala calidad en cuanto a la concentración de sales.

De acuerdo con datos geológicos y geofísicos realizados en la zona, la principal fuente de alimentación al acuífero proviene del río Sinaloa y conforme el agua subterránea circula hacia la costa, se va incrementando su salinidad, de forma que las partes más alejadas del río presentan un mayor contenido de sales disueltas. En la margen izquierda del río Sinaloa se estima que la mala calidad del agua se debe a que el agua del mar durante el Pleistoceno quedó atrapada en esa área, evaporándose y quedando así depositadas grandes cantidades de sal (CONAGUA, 2002).

Valle (2002) realizó una planeación regional bidimensional en función de la disponibilidad del recurso hídrico del acuífero de Guasave, Sinaloa; Elenes (2002) determinó el riesgo a la contaminación del sistema acuífero granular costero de Guasave, Sinaloa, a través de un sistema de información geográfico; Verdusco-Heredia (2003) determinó la calidad del agua subterránea y su vulnerabilidad a la contaminación del área de Tamazula, un poblado localizado aproximadamente a 20 km de la ciudad de Guasave; Norzagaray-Campos (2003) realizó un estudio del flujo regional en acuíferos, sus causas y efectos en la dispersividad hidrodinámica.

Respecto a la calidad del agua subterránea los objetivos de este estudio son: a) determinar la vocación de uso doméstico o agrícola del agua del acuífero en su porción oeste del río Sinaloa mediante diagramas de Wilcox, diagrama de salinidad recomendado por el Departamento de Agricultura de los E.U.A. y un índice de calidad propuesto en este trabajo denominado PHASECH, el cual considera los valores de pH, dureza, concentración de sodio, sólidos totales disueltos y cloruros; b) evaluar el impacto de la precipitación y recarga al acuífero proveniente del agua de riego, así como el cálculo de la relación conductividad eléctrica versus sólidos totales disueltos para el acuífero de la zona de estudio, y c) la determinación de los procesos geoquímicos que controlan la composición química del agua mediante el diagrama de Gibbs.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para determinar los índices de calidad se recurrió a información histórica disponible de pozos someros y profundos construidos

por Comisión Nacional del Agua, así como a la generada por muestreos realizados en el presente estudio. En la tabla 1, se señala el año de estudio con los respectivos análisis hechos a las muestras de agua. Las muestras de agua recolectadas en los años 2004 y 2008 corresponden a visitas a campo consideradas dentro del marco del presente trabajo. Las del año 2004, corresponden a pozos profundos y las recolectadas en el 2008 a pozos someros, cuyas profundidades varían de 10 a 14 m.

Las muestras se analizaron en el laboratorio de aguas subterráneas del Distrito 063 de Comisión Nacional del Agua. La ubicación de los pozos someros y profundos se observan en la figura 1. Para la recolección de las muestras, primero se bombea el pozo durante unos minutos, para así obtener agua representativa del acuífero, siendo ésta almacenada en un recipiente de polietileno de 500 ml y llevadas al laboratorio donde se realizó su respectivo análisis de acuerdo a los procedimientos establecidos en el Manual para Análisis de Suelos y Aguas (SARH, 1974).

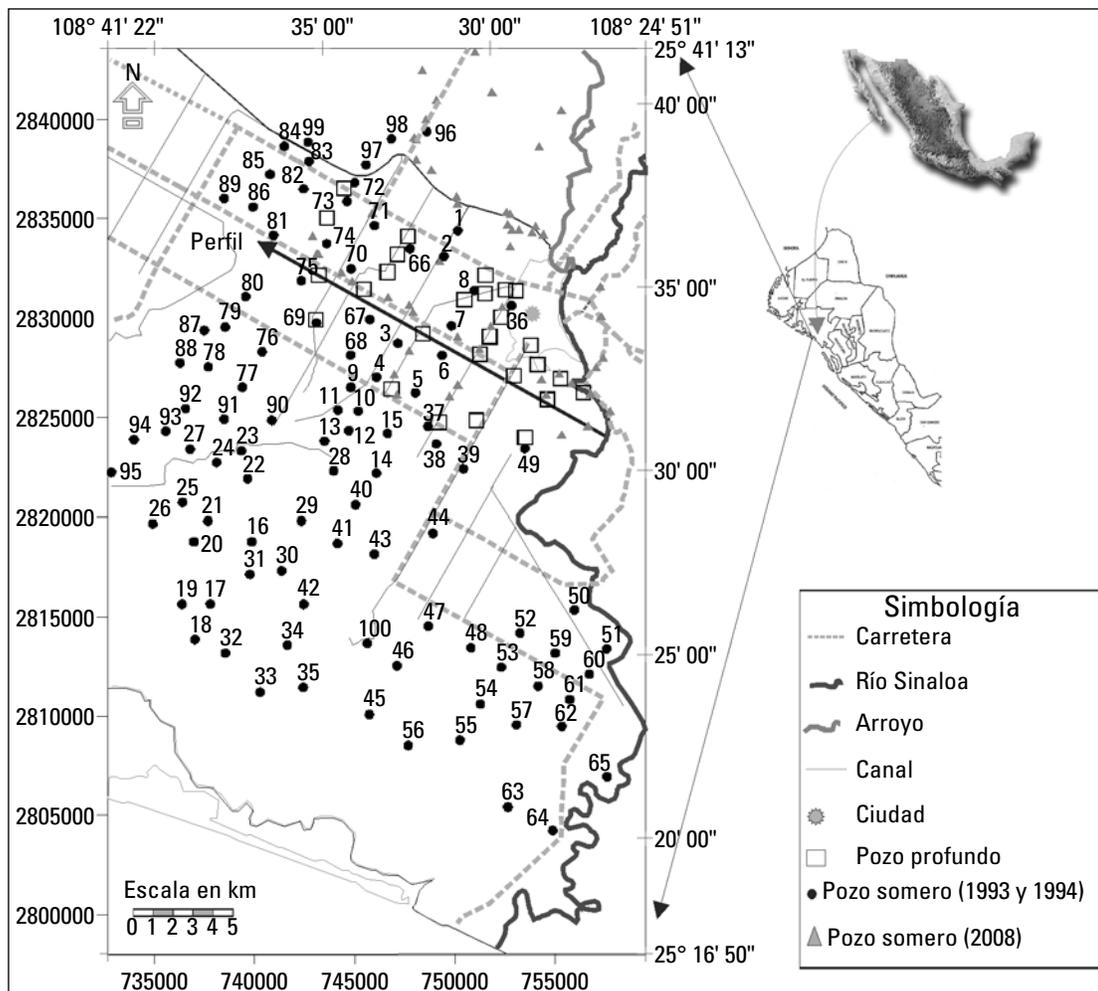


Figura 1. Área de estudio; se muestra la localización de los pozos someros y profundos.

Tabla 1. Descripción de las muestras de agua subterránea y los respectivos estudios químicos realizados.

Año	No. de muestras	Estudios realizados	Observaciones
1978	27	CE	Pozos Profundos (120 a 150 m)
1980-2002	550	CE, pH, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ y Cl ⁻	Pozos someros y profundos
1993	300	CE	Pozos someros: 100 en marzo, 100 en junio y 100 en octubre
1994	300	CE, pH, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ y Cl ⁻	Pozos someros: 100 en marzo, 100 en junio y 100 en octubre
2004	27	CE	Pozos Profundos
2008	78	CE, pH, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , K ⁺ , Na ⁺ , CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , SO ₄ ²⁻ y Cl ⁻	Pozos someros: 39 en marzo y 39 en octubre

La determinación de la conductividad eléctrica y pH se realizó en campo con un equipo Hanna HI98130, el cual fue calibrado previamente. En el laboratorio se determinaron diversos aniones y cationes, mediante métodos volumétricos (Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Ca²⁺), gravimetría (Mg²⁺) y Flamometría (Na⁺ y K⁺). La dureza (TH) se determinó en ppm con la ecuación $TH = 2.497 Ca^{2+} + 4.115 Mg^{2+}$.

Respecto a la composición y calidad del agua se determinó:

a) Sólidos totales disueltos

Con 550 datos de conductividad eléctrica y concentraciones de sólidos totales de los aniones y cationes de agua subterránea determinados en el laboratorio (Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ y SO₄²⁻), correspondientes a pozos monitoreados por la CONAGUA en el período de 1980 a 2002, se estableció la siguiente relación mediante un análisis de regresión simple para determinar sólidos totales disueltos a partir de la conductividad eléctrica en pozos someros y profundos:

$$EC = 1.65 \text{ STD}$$

Dicha ecuación fue aplicada para obtener dicho parámetro en las muestras colectadas en los años 1978, 1993, 1994, 2004 y 2008. El error de balance iónico del análisis químico utilizado es menor al 10% y se expresa de acuerdo a la expresión (Cabrera *et al.*, 2002):

$$\% \text{ error} = \frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \times 100\%$$

b) Índice de calidad del agua PHASECH. Se consideran cinco parámetros (pH, dureza, sodio, sólidos totales disueltos y cloruros).

Los límites permisibles que recomienda la Organización Mundial de la Salud para estos cinco parámetros son los siguientes: pH de 6.5 a 8.5; dureza (como CO₃Ca) < 500 mgL⁻¹; sodio < 200 mgL⁻¹; sólidos totales disueltos < 1,000 mgL⁻¹ y cloruros < 250 mgL⁻¹ (OMS, 2006).

El índice PHASECH tiene un rango de valores de 0 a 5, y su valor depende del número de parámetros que cumplen con los criterios de calidad (cada parámetro que cumple con la norma se le asigna un valor de 1).

c) Diagrama de salinidad de Estados Unidos de América. Este considera los valores de la conductividad eléctrica del agua y la relación de adsorción de sodio (RAS). El diagrama de Wilcox (1955) relaciona el porcentaje de sodio y la conductividad eléctrica.

El peligro de la sodificación que entraña el uso del agua de riego se determina por las concentraciones absoluta y relativa de los cationes. Si la proporción de sodio (Na⁺) es alta, será mayor el peligro de sodificación; por el contrario, si predominan el calcio (Ca²⁺) y el magnesio (Mg²⁺), el peligro es menor. La RAS puede usarse como índice de sodio o peligro de sodificación (Richards, 1954) por la siguiente relación:

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

donde Na⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺ se expresan en meqL⁻¹.

d) En el diagrama de Gibbs se graficaron sólidos totales disueltos (STD) en función de la relación catiónica (Na⁺/(Na⁺ + Ca²⁺)) y aniónica Cl⁻/(Cl⁻ + HCO₃⁻) de las muestras de agua. Este diagrama brinda una orientación sobre los procesos geoquímicos que controlan la composición química de las aguas.

e) Efecto de riego sobre el acuífero. Para explicar el cambio de la concentración de sales en el acuífero se determinó el efecto de las precipitaciones y del riego a través de canales. Para ello los volúmenes de agua total y neto son determinados por personal de CONAGUA (aforadores) quienes, mediante medidas de la altura de la columna de agua y su respectiva conversión a volumen de agua, determinan el volumen de salida del canal de riego y el volumen neto correspondiente a la llegada a las parcelas de

cultivo. De esta forma, la diferencia entre el volumen de salida y el de llegada constituyen las pérdidas de agua, bien por evaporación o infiltración al acuífero.

Marco físico del área de estudio. El área de estudio se encuentra en el municipio de Guasave, Sinaloa, México, entre las coordenadas 25° 16' 38" y 25° 41' 13" de latitud norte y 108° 25' 02" a 108° 41' 22" de longitud oeste y comprende una superficie de 1097.5 km² (Fig. 1). El clima es seco, cálido, con una temperatura media anual de 25.1 °C, con mínima y máxima promedios de 2 y 44 °C, respectivamente. El régimen de lluvias es en verano, con un porcentaje de lluvias invernales entre 5 y 10.2 % del total anual. La precipitación media anual en la estación de Guasave es de 510.5 mm, de acuerdo a la serie 1971-1978 (CONAGUA, 2002).

El valle del río Sinaloa es una planicie costera en cuyo subsuelo se encuentran cuerpos de agua dulce y salobre. La región está formada por un paisaje compuesto de lomas bajas con pendientes suaves de aproximadamente 0.5 m km⁻¹. El subsuelo de la planicie está formado por una gran acumulación de sedimentos clásticos que descansan sobre una superficie irregular de rocas volcánicas, sedimentarias y metamórficas.

Estos sedimentos alcanzan espesores superiores a los 500 m en la parte central del valle, que disminuyen en dirección hacia

la Sierra Madre Occidental. A menos de 200 m llegan a ser detectadas rocas volcánicas Terciarias. La llanura deltaica actual está compuesta de gravas, arenas, limos y arcillas depositados en deltas (CONAGUA, 2002).

En la figura 2 se muestra el modelo conceptual de la hidrodinámica del acuífero, el cual consta de geología, dirección de flujo del agua subterránea, sección estratigráfica y topográfica, estas últimas tres con información proporcionada por CONAGUA. Con respecto a la geología, se obtuvo información de la carta geológica del estado de Sinaloa (López-Ramos, 1970). Además, se observa en la figura 2 que el agua subterránea fluye hacia el río Sinaloa y hacia la costa. En cuanto a la sección estratigráfica se observa en profundidad una graduación de materiales, de forma que los más gruesos están abajo de los más finos, es decir, pulsos normales de sedimentación gobernados por la aceleración de la gravedad terrestre.

Anteriormente, el acuífero del río Sinaloa estuvo sujeto a una sobreexplotación que propició la intrusión salina, alterando la calidad del agua con un incremento en el contenido de sales, por tal razón a partir de 1958 se declaró en estado de veda de control (CONAGUA, 2002).

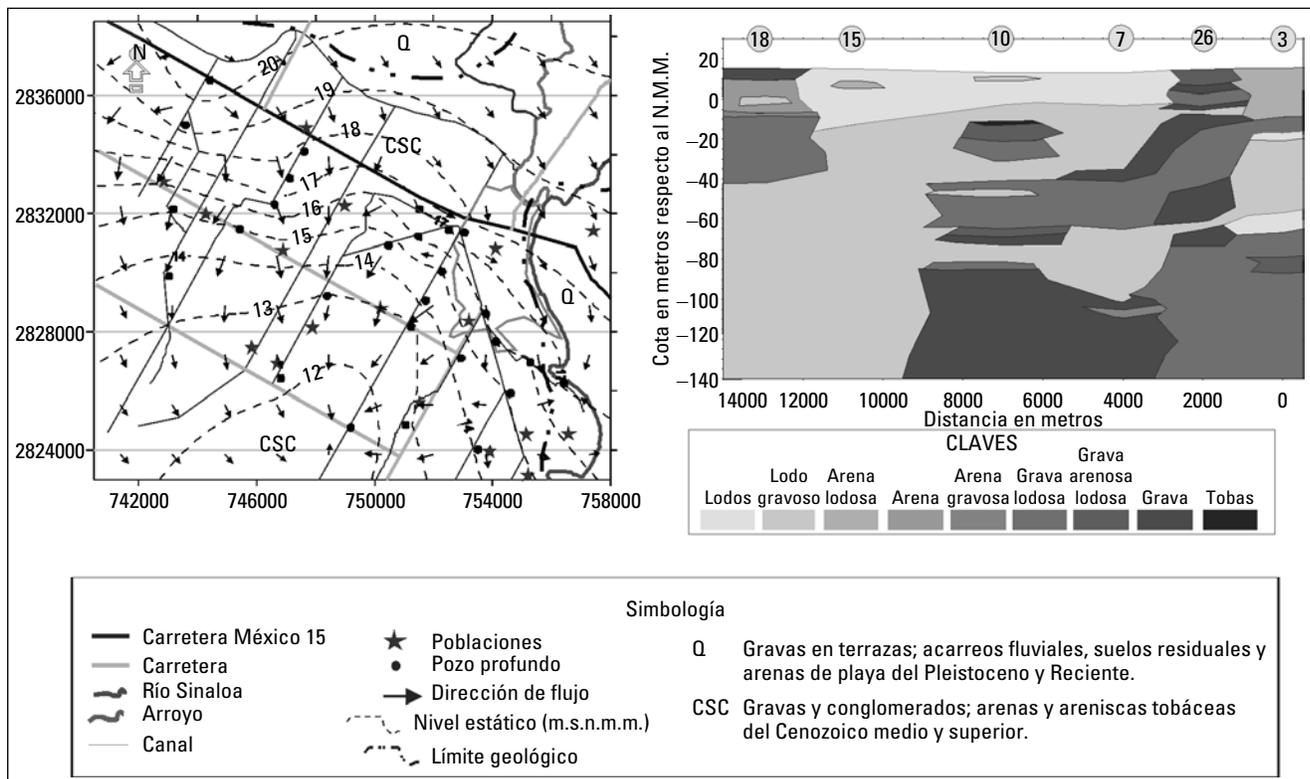


Figura 2. Mapa conceptual de la hidrodinámica del acuífero al oeste del río Sinaloa.

RESULTADOS

Efecto de riego y lluvias sobre el acuífero. La media aritmética de la conductividad eléctrica para los periodos de marzo, junio y octubre de 1993 y 1994, fue de 10.83, 14.58, 11.07, 10.89, 12.33 y 12.25 mScm^{-1} , respectivamente. En ambos años, el mes con mayor salinidad fue junio, justo antes del inicio de las lluvias. La variación de la conductividad eléctrica es influenciada por los periodos de lluvias a través de la recarga al acuífero y por los volúmenes de agua destinados para la agricultura. Durante junio, la conductividad eléctrica del agua del acuífero se incrementó, lo cual está relacionado con la disminución de los volúmenes de agua para riego y con la escasa precipitación (figura 3). Para los otros periodos, la calidad del agua no se modificó debido al aumento de las precipitaciones o por el aumento del riego en la actividad agrícola, lo que se traduce en una disminución en la conductividad eléctrica del agua subterránea, disminuyendo ésta en 3.51 mScm^{-1} . Las precipitaciones y volúmenes de agua para riego tomadas en cuenta en este análisis trimestral son las acumuladas en los periodos de enero a marzo, abril a junio, julio a septiembre y octubre a diciembre, todo lo anterior durante los años de 1993 y 1994.

En la tabla 2, se observa una serie de datos de 15 años proporcionados por la CONAGUA (distrito de riego 075). Con las columnas de volumen total y neto se calculó que la pérdida promedio anual de agua en 15 años ha sido de 111 millones de m^3 por evaporación e infiltración. Mediante un análisis de regresión lineal se determinó que:

$$\text{Volumen total concesionado} = 1.248 (\text{Volumen neto}) + 42.7811$$

La expresión obtenida es significativa ($r^2 = 0.94$, $p < 0.05$) y permite estimar el agua que se debe de concesionar a la región en base al volumen neto requerido de acuerdo a las expectativas de siembra y al tipo de siembra proyectada.

Clasificación del área de estudio mediante sólidos totales disueltos. Mediante 550 datos de conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos (proporcionada por CONAGUA) vía un análisis de regresión lineal se obtiene el siguiente modelo de regresión lineal simple.

$$\text{EC} = 1.65 \text{ STD}$$

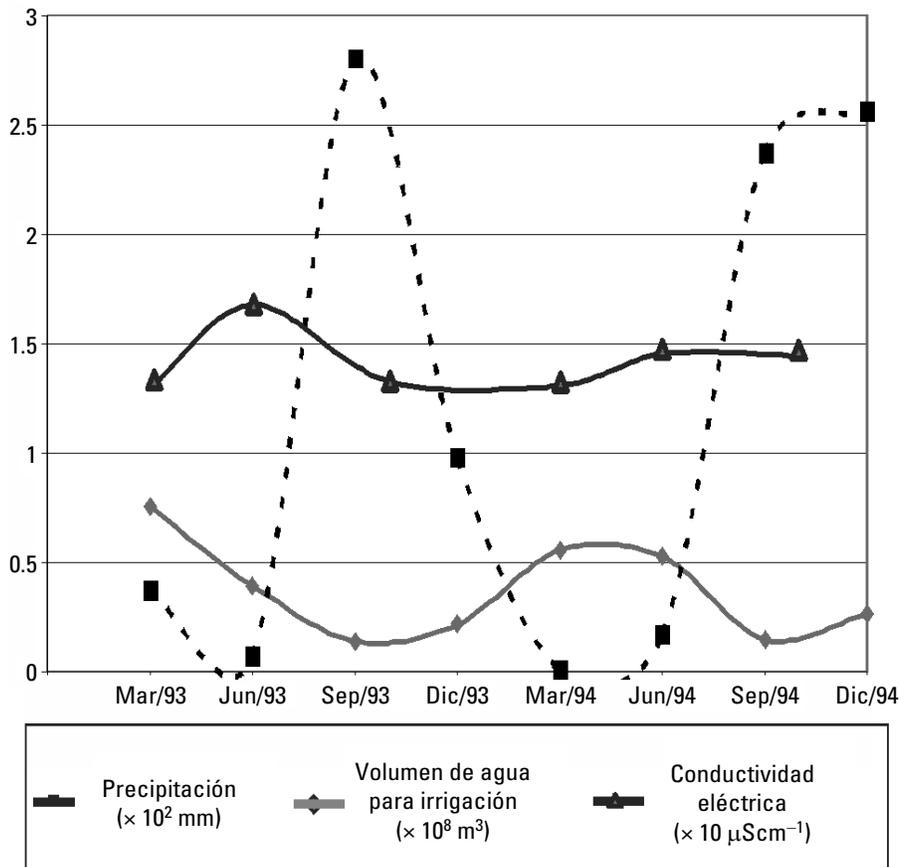


Figura 3. Comportamiento de la conductividad eléctrica del agua subterránea, precipitaciones y los volúmenes de agua destinados a la actividad agrícola.

El cual es significativo ($r^2 = 0.98$ y $p < 0.05$) y es similar al obtenido por Marin et al. (1998) quienes al estudiar la relación entre EC y STD en distintos acuíferos de México encontraron pendientes que van de 1.05 a 1.74, la cual depende de la génesis del acuífero y recomiendan utilizar en forma general $EC = 1.40 \text{ STD} + 18$ para acuíferos donde no se tiene determinada dicha relación. Por lo general, en equipos comerciales que determinan conductividad eléctrica, por cuestiones prácticas manejan un factor de conversión entre EC y STD, el cual varía de acuerdo a las características del análisis y es más fácil y rápido de manejar.

Una de tantas formas de clasificar el agua subterránea es atendiendo a su concentración de STD (Heath, 1983). La figura 4 muestra la clasificación del agua freática del acuífero durante los meses de marzo, junio y octubre de 1993 y 1994, respectivamente, donde se puede apreciar el incremento notable de sales en la medida que se aproxima a la línea de costa, siendo junio el mes con mayores concentraciones de STD.

La figura 5, muestra la clasificación del agua subterránea para los meses de marzo y octubre de 2008, donde se observa que el agua es más salina en el extremo oeste y en la parte inferior del área de estudio.

La figura 6, muestra la clasificación del agua subterránea considerando pozos profundos para los años 1978 y 2004. El agua es predominantemente dulce, observándose un enclave ligeramente salino que inició su desarrollo en 1978 en los pozos 19 y 25, para el año 2004 los pozos ligeramente salinos son el 19, 20, 24 y 25. El aumento fue más evidente en los pozos 20 y 24 al incrementarse de 563 a 1113 mgL^{-1} y de 576 a 1632 mgL^{-1} , respectivamente, de los cuales el pozo 24 ya ha sido inhabilitado.

El comportamiento de la salinidad en la zona de estudio es complejo, debido a la cercanía con la costa y la presencia de cuerpos evaporíticos. Aunado a esto, cabe destacar que la profundidad del nivel freático es de sólo algunos centímetros hasta

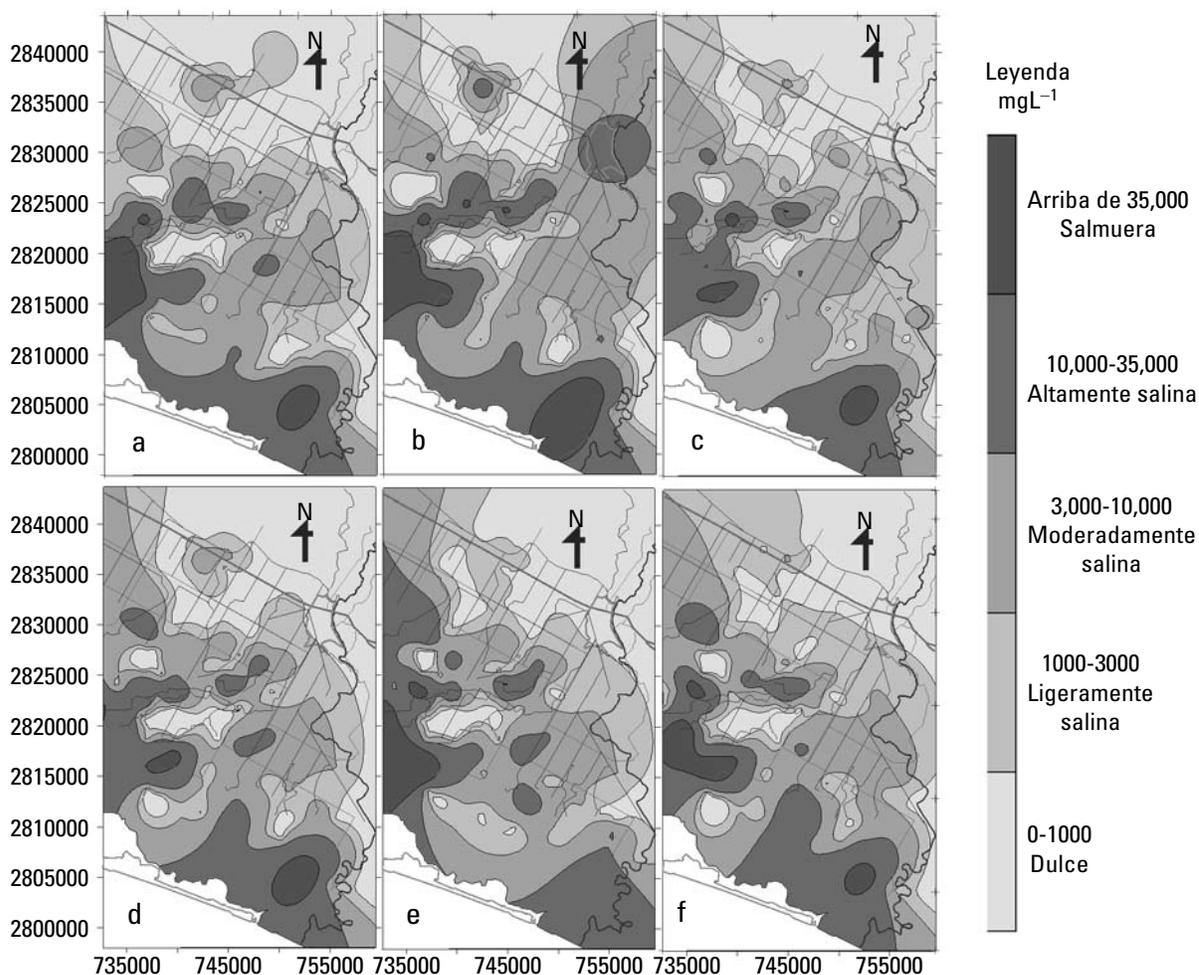


Figura 4a-f. Calidad del agua en pozos someros en el área de estudio. a, b y c) corresponden a marzo, junio y octubre de 1993, respectivamente; d, e y f) a marzo, junio y octubre de 1994.

Tabla 2. Volúmenes de agua para riego en canales, para los diferentes ciclos agrícolas

Ciclo	Precipitación anual (mm)	Volúmenes utilizados en riego		
		Total ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Neto ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Pérdidas ($\times 10^6 \text{ m}^3$)
1993-94	351.00	427.73	281.39	146.34
1994-95	611.20	405.91	284.51	121.39
1995-96	509.50	386.59	279.64	106.96
1996-97	441.40	432.55	316.84	115.71
1997-98	667.50	422.53	298.40	124.13
1998-99	345.40	351.88	246.21	105.67
1999-2000	228.80	382.13	263.48	118.65
2000-2001	502.70	366.38	252.99	113.39
2001-2002	320.70	407.93	296.14	111.79
2002-2003	233.50	281.85	194.35	87.50
2003-2004	316.50	270.07	197.27	72.80
2004-2005	503.30	366.15	257.74	108.41
2005-2006	344.30	434.17	319.38	114.80
2006-2007	438.00	431.20	320.87	110.34
2007-2008	460.50	438.18	326.16	112.02

7 metros en presencia de materiales finos como arcillas y limos, originándose ascensos del agua por capilaridad, generándose en algunos casos acumulación de sales en la superficie del suelo.

Índice de calidad del agua PHASECH. Para la determinación del índice de calidad del agua se consideraron cinco parámetros: pH, dureza, sodio, sólidos totales disueltos y cloruros. Los límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización se encuentran especificados por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

En los datos de los pozos someros, se observó que sólo una pequeña porción cumple con todos los parámetros de calidad en la parte norte del área de estudio (figura 7); en cambio, en la porción costera al sur del área de estudio, la calidad del agua decrece. En tanto, hay zonas que no cumplen con ninguno de los requisitos de calidad, esto es posible que se deba a la presencia de cuerpos evaporíticos o a intrusión salina por cercanía a la costa.

En la figura 8 se observa la distribución del índice de calidad PHASECH correspondiente a marzo y octubre de 2008, se puede apreciar la influencia del río Sinaloa sobre el acuífero en la parte Este, ya que un índice de calidad 5 significa que el agua de río y de los pozos contiguos a este cumplen con los 5 índices de calidad,

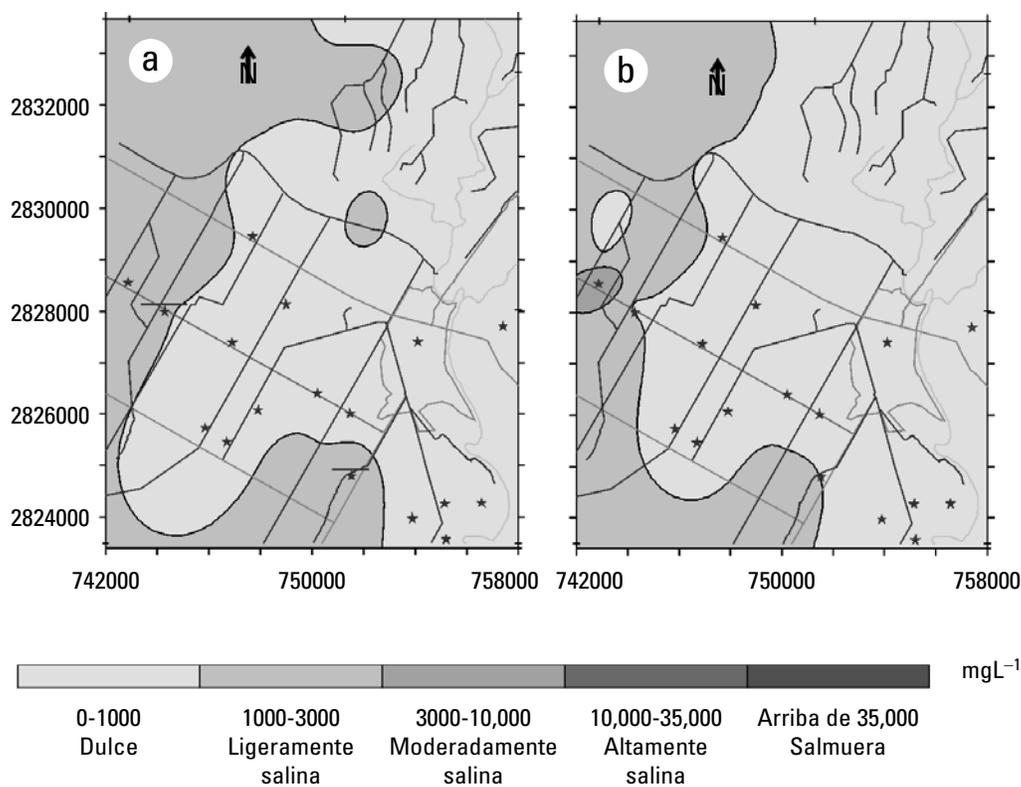


Figura 5a-b. Calidad del agua en pozos someros en el área de estudio en marzo (a) y octubre (b) de 2008.

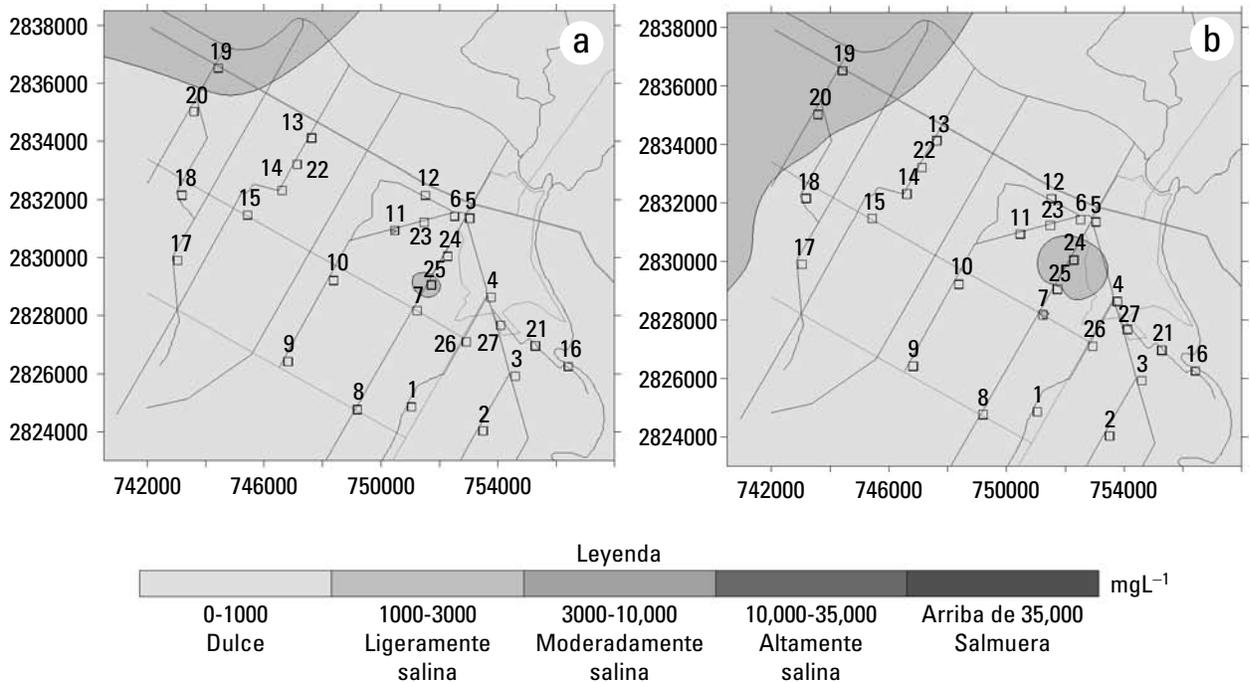


Figura 6a-b. Calidad del agua en pozos profundos en el área de estudio a) 1978 y b) 2004.

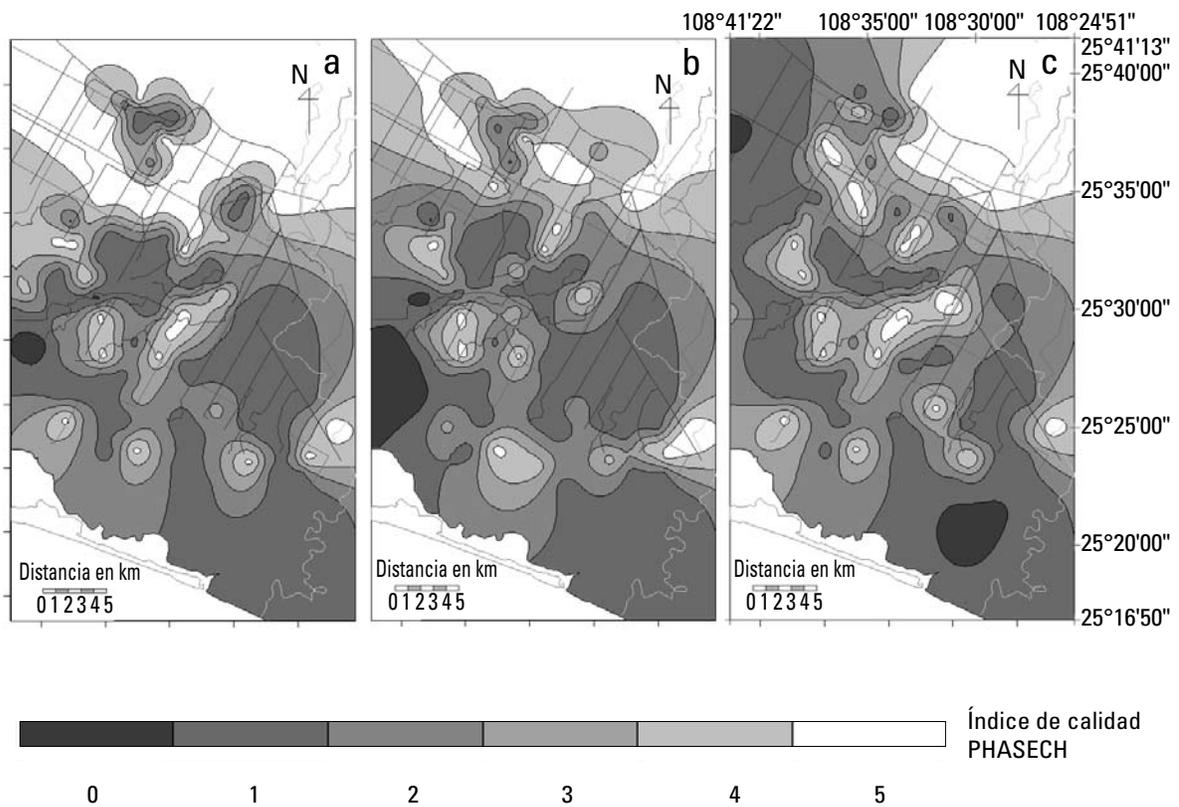


Figura 7a-c. Índice de calidad PHASECH del agua subterránea considerando cinco parámetros de calidad (pH, dureza, sodio, sólidos totales disueltos y cloruros) para 1994. a) Marzo; b) junio y c) octubre.

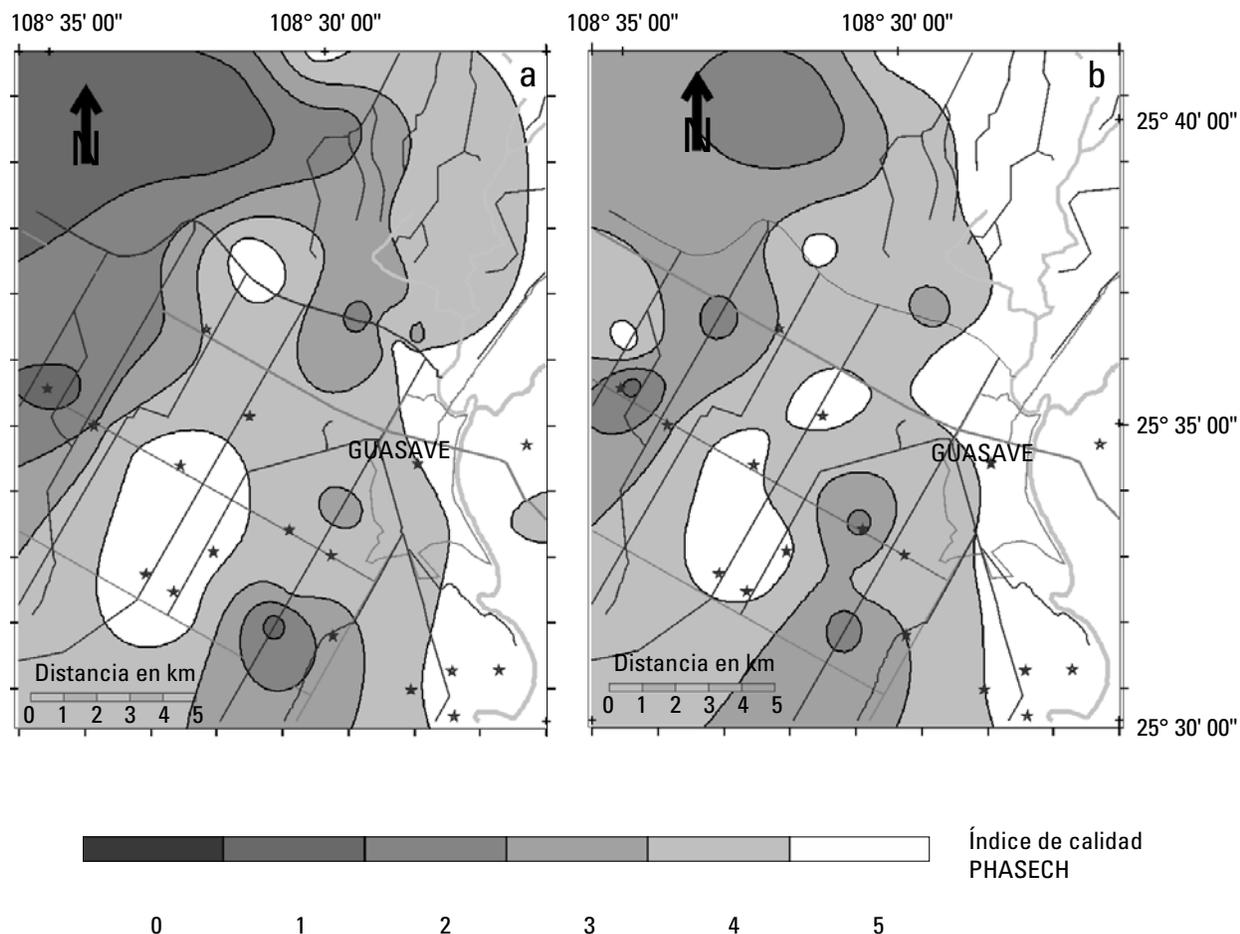


Figura 8a-b. Índice de calidad PHASECH del agua subterránea considerando cinco parámetros de calidad (pH, dureza, sodio, sólidos totales disueltos y cloruros) para 2008. a) marzo y b) octubre.

debido a que los valores de cada elemento PHASECH cumple con los valores establecidos por la OMS.

Clasificación de aguas para riego. En la figura 9, se puede apreciar el comportamiento de la conductividad eléctrica y la RAS en pozos someros de 1994, para los tres periodos (marzo, junio y octubre). El 35% de los pozos se encuentran fuera de rango. Para 2008, se observa que las aguas predominantes en su mayoría caen en la categoría $C_3 S_1$ para los periodos de marzo y octubre (figura 10), es decir, son aguas que pueden usarse en suelos cuyo drenaje sea eficiente y no corren peligro de sodificación, debido a que son bajas en sodio.

En la figura 11, se presenta otra manera de clasificar las aguas según la aptitud de uso mediante el diagrama de Wilcox. Este toma como base la conductividad eléctrica del agua y la relación de absorción de sodio; La figura 11-a corresponde a muestras de agua del mes de marzo de 1994, considerando los valores

de la conductividad eléctrica donde un 52% caen en la zona no válida para la agricultura, por lo que son inadecuadas, ya que sus valores superan a los $3,000 \mu\text{Scm}^{-1}$.

En la figura 11-b, se observa que, de las 39 muestras de agua de pozos de marzo de 2008, correspondientes a la parte central, sólo dos son inadecuadas, 10 en la categoría de dudosa a no válida, 6 en admisible a dudosa y 21 están en las categorías de excelente a permisible.

Hidrogenoquímica. Para explicar los procesos geoquímicos que controlan la composición química se utilizó el diagrama de Gibbs (Gibbs, 1970). Se encontró que los procesos geoquímicos que controlan la composición química del agua para las 100 muestras de agua correspondientes al mes de marzo de 1994 fueron por meteorización y evaporación. En cambio, para las 39 muestras del mes de marzo de 2008, se encontró que predominó la meteorización con una ligera tendencia hacia la evaporación, por lo que,

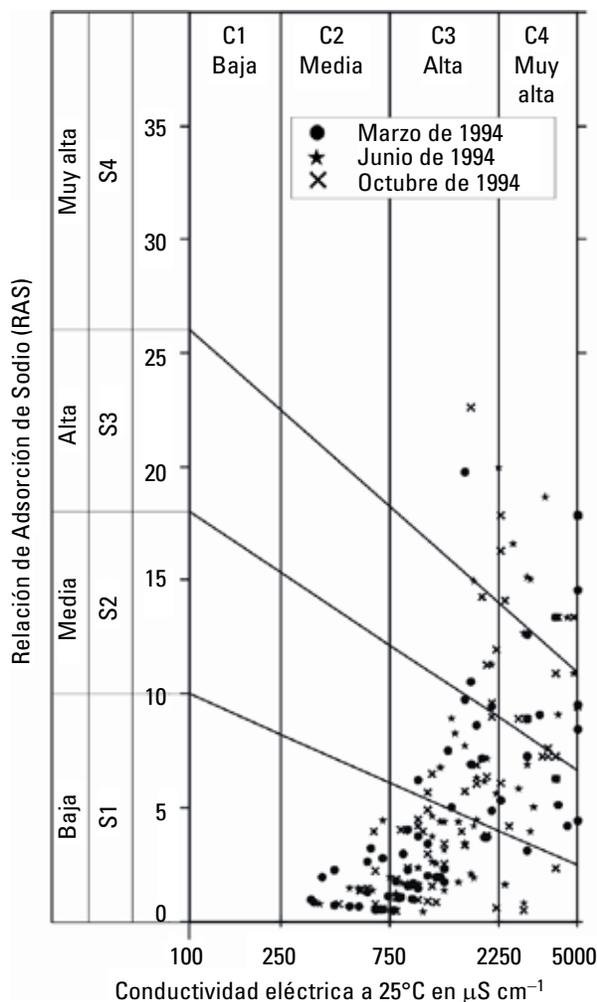


Figura 9. Diagrama de salinidad de EUA para clasificación de aguas para irrigación, 1994.

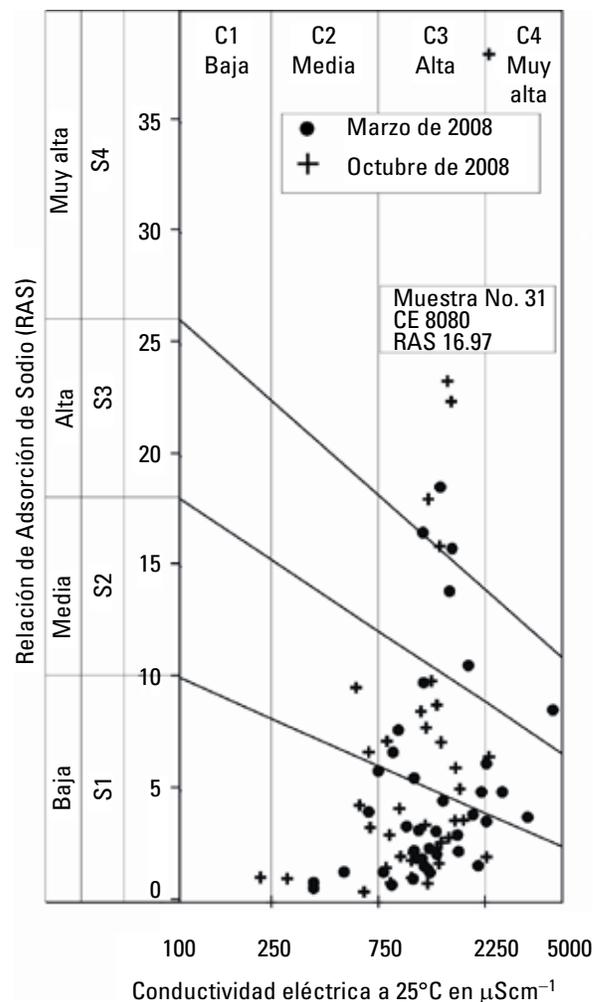


Figura 10. Diagrama de salinidad de EUA para clasificación de aguas para irrigación, 2008.

los materiales acuíferos juegan un rol importante en la composición química de las aguas subterráneas (figura 12).

De 300 muestras correspondientes a cien pozos someros analizados en tres estaciones del año (marzo, junio y octubre de 1994), el rango de pH fue de 6 a 8.7. Esto indica una ligera tendencia a una composición básica. La conductividad eléctrica varió entre 340 y 170,000 μScm^{-1} . El 91.3 % se encuentran en el rango de 0 a 50,000 μScm^{-1} . En la tabla 3, se muestra que la alta salinidad es determinada por la predominancia de los iones principales Cl^- y Na^+ , que se correlacionan con la conductividad eléctrica ($R = 0.99$ para Cl^- y $R = 0.98$ para Na^+). Además, se pueden observar las relaciones existentes entre EC-Ca^{2+} , EC-Mg^{2+} , EC-Na^+ , EC-Cl^- , $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}$, $\text{Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$, $\text{Mg}^{2+}\text{-Cl}^-$ y $\text{Cl}^-\text{-Na}^+$, con valores de ajuste de $R > 0.92$ para todos los casos.

DISCUSIÓN

Se estudiaron las variaciones espacial y temporal de la calidad del agua en el acuífero costero del río Sinaloa mediante el análisis de pozos someros y profundos, encontrándose que la variación depende en gran medida de los periodos de lluvias y riego.

El comportamiento de la salinidad de 1978 a 2004 en pozos profundos muestra un incremento, principalmente en los pozos 20 y 24, los cuales son utilizados para riego agrícola, con lo cual se pone en riesgo los suelos de la región debido a que en 1978 los pozos afectados eran 2, aumentando a 4 para el año 2004.

Del análisis de muestras, se determinó que la calidad del agua en pozos profundos es mejor que en los someros. Respecto a los índices de calidad PHASECH, la mayor parte del área no

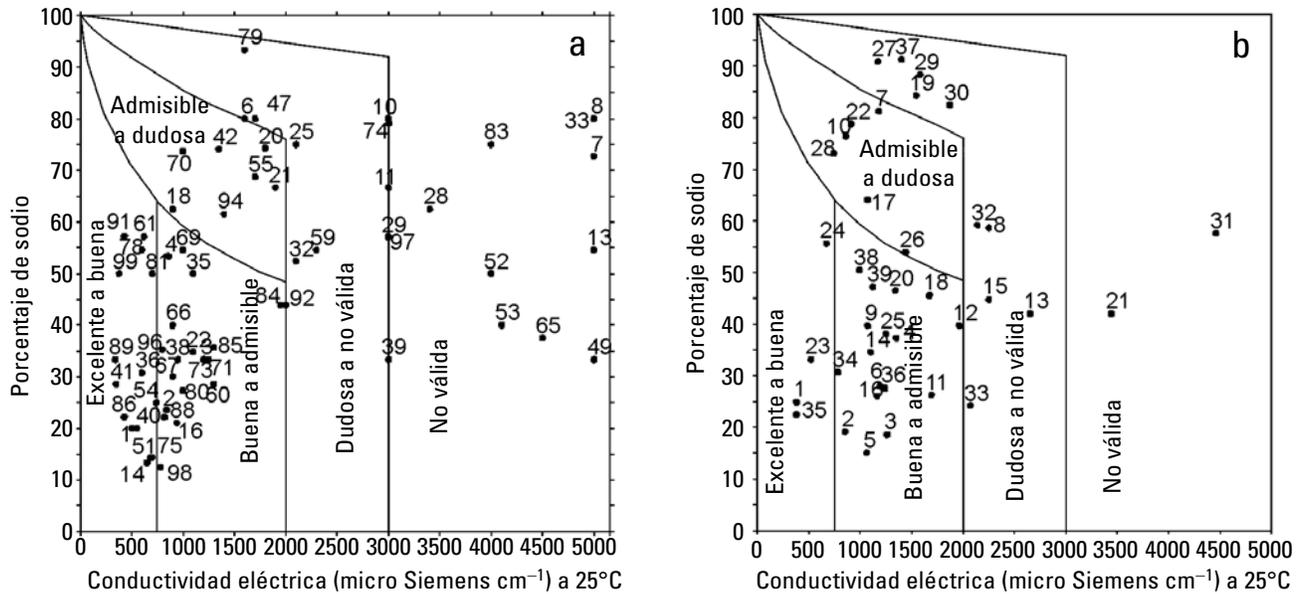


Figura 11a-b. Relación entre porcentaje de sodio y conductividad eléctrica para clasificar el agua subterránea para usos de irrigación. a) marzo de 1994, b) marzo de 2008.

cumple con los cinco parámetros de calidad, excepto en las cercanías del río Sinaloa, por ser éste una fuente de recarga natural al acuífero.

En el análisis de la calidad del agua en cuanto a sólidos totales disueltos, se observa que el mes de junio presenta mayor salinidad tanto en pozos someros como profundos; en cambio, durante octubre (final de la época de lluvias), el agua subterránea mejora su calidad. De lo anterior, se deduce que el peligro de intrusión salina ante un periodo de sequía es latente, ya que las aguas superficiales y subterráneas se utilizan en labores domésticas, agrícolas, industriales y pecuarias.

De los diagramas de Gibbs, se observa que los procesos geoquímicos que controlan la composición del agua son la evaporación y la meteorización.

Mediante los diagramas de salinidad de EUA para la clasificación de agua para irrigación, se obtuvo que sólo el 35% de las muestras de agua de los pozos se encontraron en la zona C_3S_1 , es decir, en un umbral de vocación agrícola con ciertas restricciones. En forma correlativa a lo antes indicado, el diagrama de Wilcox indica que más del 50% del agua de los pozos del año 1994 y 2008 no es apta para la agricultura, ya que su conductividad eléctrica supera los 3,000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Tabla 3. Matriz de correlación de ocho variables calculadas de datos químicos de muestras de agua de pozos analizadas en el año de 1994.

	EC	pH	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	Cl ⁻	CO ₃ ⁻	HCO ₃ ⁻
EC	1.000							
pH	-0.534	1.000						
Ca ²⁺	0.929	-0.585	1.000					
Mg ²⁺	0.941	-0.559	0.965	1.000				
Na ⁺	0.980	-0.477	0.844	0.867	1.000			
Cl ⁻	0.993	-0.542	0.930	0.949	0.969	1.000		
CO ₃ ⁻	-0.123	0.333	-0.188	-0.172	-0.082	-0.150	1.000	
HCO ₃ ⁻	-0.031	0.096	-0.104	-0.093	0.009	-0.069	0.624	1.000

* Marcados con negritas las correlaciones significativas con $p < 0.01$.

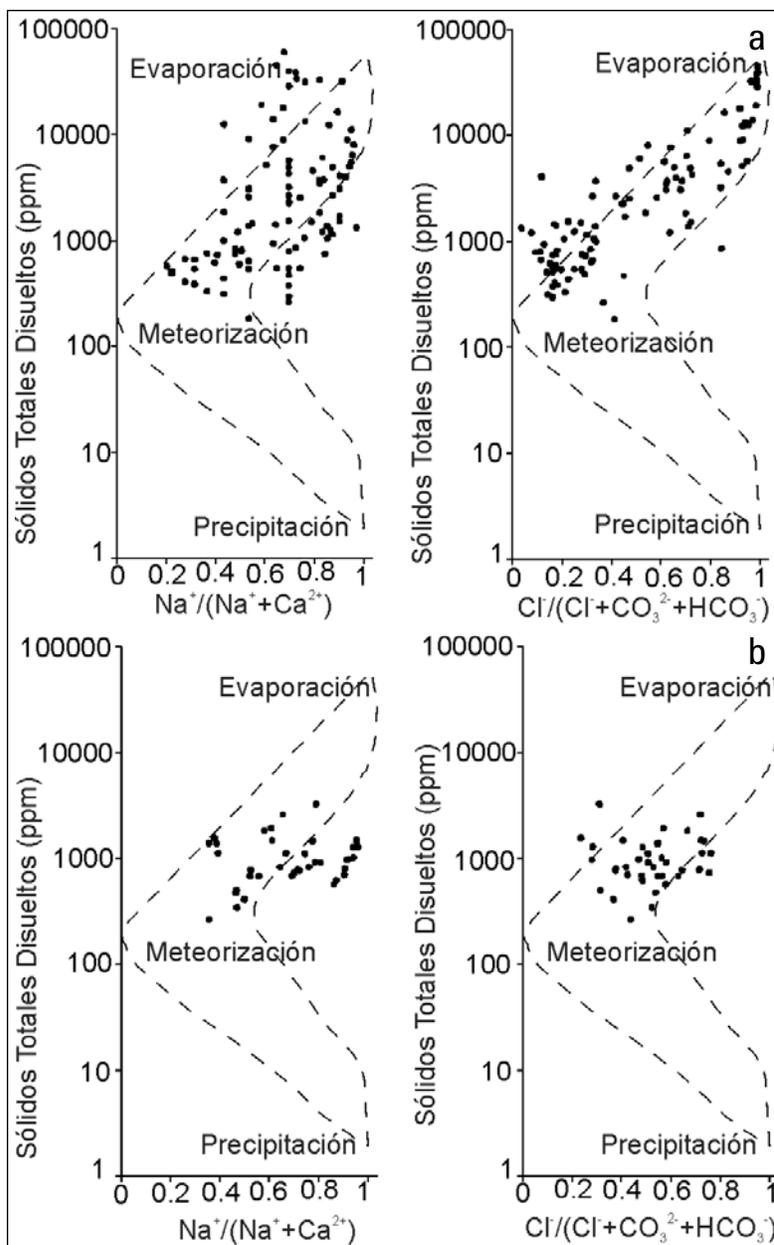


Figura 12a-b. Diagramas de Gibbs: relación catiónica y aniónica versus Sólidos Totales Disueltos. a) marzo de 1994, b) marzo de 2008.

El área de estudio es altamente sensible a la salinización por su carácter costero y presencia de cuerpos evaporíticos alejados de la línea de costa, por lo que, la presencia del río Sinaloa es un elemento relevante de recarga que permite mantener el agua subterránea en condiciones aptas para la agricultura y muy cercanas a óptimas para uso doméstico.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Nacional del Agua por las facilidades prestadas para el análisis químico de muestras de agua y por la información

proporcionada. Al Instituto de Geología de UNAM por su apoyo para realizar la presente investigación.

REFERENCIAS

- ASTIER, J. L. 1982. *Geofísica aplicada a la hidrogeología*. 2ª ed. Paraninfo, Madrid. 344 p.
- CABRERA, A., J. PACHECO-ÁVILA, E. CUEVAS-SOSA, E. RAMÍREZ, M. COMAS & A. CÁMARA. 2002. Hidrogeoquímica del agua que subyace a la Japay I, en Mérida Yucatán, México. *Ingeniería Revista Académica* 6: 29-40.

- COMISIÓN NACIONAL DEL AGUA (CNA). 2002. *Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Río Sinaloa, estado de Sinaloa*. México, D.F. abril 30. 36 p.
- ELENES, C. E. 2002. *Determinación del riesgo a la contaminación del sistema acuífero granular costero de Guasave, Sinaloa a través de un sistema de información geográfico*. Tesis de maestría. ESCAADER, Universidad Autónoma de Sinaloa. Guamúchil, Sinaloa, México. 120 p.
- GIBBS, R. 1970. Mechanisms controlling world water chemistry. *Science* 170: 1088-1090.
- HEATH, R. C. 1983. *Geological Survey Water-supply paper 2220. Basic ground-water hydrology*. U.S. Geological Survey. Reporte técnico. 84 p.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICA, GEOGRAFÍA E INFORMÁTICA (INEGI). 1995. *Estudio hidrológico del estado de Sinaloa*. Aguascalientes. 88 p.
- JAMRAH, A., A. AL-FUTAISI, N. RAJMOHAN, & S. AL-YAROUBI. 2008. Assessment of groundwater vulnerability in the coastal region of Oman using DRASTIC index method in GIS environment. *Environmental Monitoring and Assessment* 147: 125-138.
- LÓPEZ-RAMOS, E. 1970. *Carta geológica del Estado de Sinaloa*. UNAM, Inst. de Geología, México, D.F. y Gobierno del Estado de Sinaloa, escala 1:500,000.
- MARÍN L. E., B. STEINICH, O. ESCOLERO, R. M. LEAL, B. SILVA & S. GUTIÉRREZ. 1998. Water quality monitoring in México using specific conductance. *Ground water monitoring* 18: 156-162.
- NORZAGARAY-CAMPOS M. 2003. *Flujo regional en acuíferos, sus causas y efectos en la dispersividad hidrodinámica: Un caso de estudio*. Tesis Doctoral. CINVESTAV unidad Mérida. Instituto Politécnico Nacional. Mérida, Yucatán, México. 169 p.
- ORGANIZACIÓN MUNDIAL DE SALUD (OMS). 2006. *Guidelines for drinking-water quality*. First addendum to volume 1. 3ª ed. 515 p.
- RICHARDS, L. A. 1954. *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos. Manual 60*. Personal del laboratorio de salinidad de los E. U. A. Departamento de Agricultura de los E. U. A., ed. LIMUSA. México. 172 p.
- SECRETARÍA DE AGRICULTURA Y RECURSOS HIDRÁULICOS (SARH). 1974. *Manual para análisis de suelos y aguas*. Centro de capacitación en irrigación y drenaje Benito Juárez, El Carrizo, Sinaloa, México. 241 p.
- SECRETARÍA DE SALUD (SSA). 1995. NOM-127-SSA1-1994. *Salud ambiental, agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Diario Oficial de la Federación. Noviembre 30. 6 p.
- VALLE, M. O. 2002. *Planeación regional bidimensional en función de la disponibilidad del recurso hídrico del acuífero de Guasave, Sinaloa*. Tesis de maestría. ESCAADER Universidad Autónoma de Sinaloa. Guamúchil, Sinaloa, México. 110 p.
- VERDUZCO-HEREDIA, M. A. 2003. *Estudio de la calidad del agua subterránea y su vulnerabilidad a la contaminación del área de Tamazula, Guasave, Sinaloa, México*. Tesis de maestría. IPN-CIIDIR Sinaloa. Guasave, Sinaloa, México. 91 p.
- WILCOX L. V. (1955). *Classification and use of irrigation waters*. United States Department of Agriculture, Circular 969. 19 p.

Recibido: 9 de septiembre de 2010.

Aceptado: 4 de marzo de 2011.