

Evaluación del Acuífero Valle de Tulancingo para propósitos de irrigación

Evaluation of the Tulancingo Valley Aquifer for irrigation purposes

V. Lobaco-Mejía , M. Cruz-Sánchez *, C. Esquivel-Macías , M. Ramírez-Cardona , K. Flores-Castro 

Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Mineral de la Reforma, Hidalgo, México.

Resumen

La evaluación del acuífero Valle de Tulancingo ha permitido identificar que las principales facies hidroquímicas en el sistema corresponden a Na-K-HCO_3^- y Ca-Mg-HCO_3^- , características de sistemas con tiempos de residencia relativamente cortos. Los parámetros de salinidad como la relación de adsorción de sodio (RAS) se encuentran en el intervalo comprendido entre 0.783 y 1.912; el %Na entre 33.105 y 67.635, el carbonato de sodio residual (CSR) observó valores entre -1.224 y 0.983, en tanto que la salinidad potencial (SP) presentó un valor mínimo de 0.397 y un valor máximo de 2.954. Además, los valores del índice de permeabilidad (IP) se encuentran entre 65.325 y 141.128, variando la relación de Kelly (RK) desde 0.405 hasta 1.686 y el riesgo de magnesio (MH) entre 33.415 y 39.867. De acuerdo con los diferentes criterios de evaluación del agua para propósitos de irrigación, se considera que es apta para ello, siendo su calidad clasificada desde buena hasta excelente.

Palabras Clave:

Acuífero, agua, riego, hidroquímica, salinidad

Abstract

The evaluation of the Tulancingo Valley aquifer has allowed identifying that the main hydrochemical facies in the system correspond to Na-K-HCO_3^- and Ca-Mg-HCO_3^- , characteristics of systems with relatively short residence times. The salinity parameters such as the sodium adsorption ratio (SAR) are in the range between 0.783 and 1.912; the %Na between 33.105 and 67.635, the residual sodium carbonate (CSR) observed values between -1.224 and 0.983, while the potential salinity (SP) presented a minimum value of 0.397 and a maximum value of 2.954. In addition, the permeability index (PI) values are between 65.325 and 141.128, varying the Kelly ratio (RK) from 0.405 to 1.686 and the risk of magnesium (MH) between 33.415 and 39.867. According to the different evaluation criteria of water for irrigation purposes, it is suitable for it, and its quality is classified from good to excellent.

Keywords:

Aquifer, water, irrigation, hydrochemistry, salinity

1. Introducción

La agenda de Desarrollo Sostenible 2030 para América Latina y el Caribe involucra una visión transformadora en torno a la sostenibilidad económica, social y ambiental, incluyendo 17 objetivos y 169 metas. Uno de sus principales objetivos es garantizar la gestión sostenible del agua, su disponibilidad y saneamiento para beneficio de toda la población (Naciones Unidas, 2018). Siendo el agua dulce un recurso natural renovable, pero limitado, su manejo apropiado se traduce en una estrategia de sobrevivencia a largo plazo.

En México, durante el periodo comprendido entre 2016 y 2018, en promedio se recibieron mediante la precipitación 1 449 471 millones de metros cúbicos de agua anualmente, de esta cantidad, únicamente el 6.4% tuvo como destino la recarga de los acuíferos (aproximadamente $92\,544\text{ hm}^3$), el 72.1% regresó a la atmósfera

mediante evapotranspiración y el 21.4% se desplazó superficialmente a través de ríos y arroyos (Comisión Nacional del Agua, 2019).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (2019), en México existen 653 acuíferos, de los cuales 115 se encuentran sobreexplotados, 18 con intrusión marina y 32 bajo el fenómeno de salinización. El 39.2% del volumen total del agua subterránea se encuentra concesionada para usos consuntivos, tales como: el agrícola (75.7%), el abastecimiento público (14.7%), la industria autoabastecida (4.9%) y la electricidad (excepto hidroelectricidad) (4.7%).

En el Estado de Hidalgo se localizan 21 acuíferos, siendo el acuífero Valle de Tulancingo el más sobreexplotado, con un déficit medio anual de 20.935400 hm^3 (Comisión Nacional del Agua, 2020a), superando significativamente el déficit del acuífero

*Autor para la correspondencia: mcruz@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: lo297949@uaeh.edu.mx (Violeta Lobaco-Mejía), mcruz@uaeh.edu.mx (Misael Cruz-Sánchez), esquivel@uaeh.edu.mx (Carlos Esquivel-Macías), mariusr@uaeh.edu.mx (Marius Ramírez-Cardona), floresk@uaeh.edu.mx (Kinardo Flores-Castro)

Tepeji del Río que es de 4.539530 hm³ anuales (Comisión Nacional del Agua, 2020b).

El acuífero Valle de Tulancingo constituye una fuente de agua potable que beneficia a una población de aproximadamente 336 446 habitantes distribuidos principalmente en los municipios de Acatlán, Cuauhtec de Hinojosa, Huasca de Ocampo, Metepec, Santiago Tulantepec, Singuilucan y Tulancingo de Bravo (Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, 2021), comunidades donde la industria manufacturera y la agricultura constituyen los principales ejes económicos regionales.

De manera general, la producción agrícola depende del clima, de la calidad del suelo y de la salinidad, entre otros factores. La salinidad se refiere a la acumulación excesiva de sales en el agua y el suelo debido a una baja precipitación pluvial, elevada evapotranspiración, intemperismo de las rocas, exceso de fertilizantes, así como el riego con agua de mala calidad (Orozco-Alcalá et al., 2018).

En términos de la salinidad, los principales parámetros fisicoquímicos que se emplean para evaluarla son la conductividad eléctrica, los sólidos totales disueltos, CO₃²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻, Na⁺, K⁺, Mg²⁺ y Ca²⁺, siendo el ion Na⁺ el que produce una mayor afectación a las plantas tanto para su desarrollo como para su crecimiento mediante dos procesos adversos: (a) el estrés osmótico, donde el exceso de sodio (y cloro) modifica la conductividad hidráulica y en consecuencia la absorción de agua y micronutrientes, y (b) el estrés iónico, promoviendo una acumulación excesiva de Na⁺ en los tejidos y células de las plantas hasta alcanzar niveles tóxicos, modificando las principales funciones metabólicas de K⁺ y Ca²⁺ (Assaha et al., 2017).

Debido a que las características fisicoquímicas del agua subterránea dependen de las reacciones químicas de disolución e intercambio con las unidades litológicas del acuífero y con los suelos, de la naturaleza de la recarga, del tiempo de residencia, de la precipitación pluvial, del uso del suelo, de la modificación de la cubierta vegetal, así como de diversas actividades antropogénicas (Rawat et al., 2018), es necesario realizar evaluaciones periódicas de la misma para definir su calidad, que afecta no solo la producción agrícola, sino también la calidad de los suelos.

El objetivo del presente trabajo de investigación fue la evaluación fisicoquímica de 13 pozos, 7 manantiales y 2 lagunas localizadas en el acuífero Valle de Tulancingo, integrando los datos en índices de salinidad para definir su calidad para propósitos de irrigación.

1.1. Descripción del área de estudio

El acuífero Valle de Tulancingo está localizado en la porción suroriental del Estado de Hidalgo, entre los paralelos 19° 54' y 20° 19' de latitud norte y entre los meridianos 98° 10' y 98° 33' de longitud oeste y presenta una superficie aproximada de 1054 km². Limita al norte con el acuífero Mezquital, al noreste con el acuífero Álamo-Tuxpan, al este con el acuífero Acaxochitlán, al oeste con el acuífero Huasca-Zoquitán, al sur con el acuífero Tecocomulco, al suroeste con el acuífero Cuatitlán-Pachuca y al sureste con el acuífero Tecolutla. Se ubica en la Región Hidrológica RH 26 "Río Pánuco", en la subregión Alto Pánuco del Río Moctezuma y se ha clasificado con la clave 1317 por el Sistema Geográfico de Manejo de Aguas Subterráneas (SIGMAS) de la Comisión Nacional del Agua (2020a). Las características hidrológicas y geológicas del acuífero han sido descritas de

manera exhaustiva por Lesser et al. (2006) y la Comisión Nacional del Agua (2018a).

El acuífero Valle de Tulancingo abarca totalmente los municipios de Santiago Tulantepec, Metepec, Tulancingo de Bravo, Cuauhtec de Hinojosa y Acatlán, y parcialmente los municipios de Singuilucan y Huasca de Ocampo, así como pequeñas porciones de los municipios de Tenango de Doria, Agua Blanca y Acaxochitlán. En la región se distinguen dos tipos de clima, en la zona central del valle es semiseco templado y en sus alrededores es templado húmedo con lluvias en verano. Su precipitación media anual es de 532.1 mm, con una evaporación potencial promedio de 1541.8 mm y con temperaturas promedio de 15°C (Comisión Nacional del Agua, 2018b).

La producción agrícola de la región que conforma el acuífero Valle de Tulancingo se desarrolla bajo temporal en un promedio de 55.04%, correspondiendo a la temporada de lluvias que generalmente se presenta durante los meses de junio a septiembre, siendo la avena forrajera en verde, frijol, maíz en grano, cebada en grano, tuna, maguey y pulque los principales productos agrícolas, además del trigo en grano, avena en grano, chícharo, manzana, maíz forrajero en verde, nopalitos, durazno, pera, haba en grano y cebada forrajera en verde, que se cultivan a menor escala.

Mediante irrigación en la región se desarrolla en promedio el 44.96% de la producción agrícola, destacando la avena forrajera en verde, maíz en grano, alfalfa verde, pastos y praderas, maíz forrajero en verde, tomate rojo, frijol, tomate verde y calabacita, mientras que productos como los nopalitos, cilantro, lechuga, cacahuete, chile verde, aguacate, durazno y nuez se producen en menores proporciones (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2021).

2. Desarrollo experimental

2.1. Descripción de las muestras

En el mes de marzo de 2021 se colectaron 22 muestras de agua en el acuífero Valle de Tulancingo (pozos, lagunas y manantiales), empleando frascos de polietileno con capacidad de 2 L. Las muestras fueron etiquetadas con sus claves, fecha, hora, temperatura y coordenadas geográficas (GPS Garmin Map 60) para cada punto seleccionado (tabla 1, figura 1). Posteriormente fueron transportadas en una hielera, conservándolas en refrigeración a 4 °C hasta el momento de su análisis.

2.2. Análisis fisicoquímico de las muestras de agua

Para su análisis, las muestras de agua fueron filtradas con una jeringa a la cual se adaptaron discos de acetato de celulosa con poros de 0.45 µm. El agua filtrada se dividió en dos fracciones: una de ellas no se modificó, conservando su pH original y la segunda se aciduló con HNO₃ hasta pH 3.

La fracción de agua no modificada fue utilizada para determinar el pH, la conductividad eléctrica (CE), el potencial de óxido-reducción (ORP) y los sólidos totales disueltos (STD) con un medidor multiparamétrico Hanna. Además se realizó el análisis de Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻ y la dureza (como CaCO₃) mediante titulación, evaluando las concentraciones de PO₄³⁻ y SO₄²⁻ por espectrofotometría de absorción de luz visible (Sadzawka, 2006),

utilizando la misma técnica para analizar NO₃⁻ (Rodier *et al.*, 1998).

La fracción de agua acidulada con HNO₃ se utilizó para el análisis elemental (Na, K, Mg, Ca, Si, Al, y Ag) mediante la técnica de espectrofotometría de emisión atómica en plasma acoplado inductivamente (AES-ICP) en un espectrómetro de emisión óptica Perkin Elmer modelo Óptima 8300, empleando curvas de calibración estándar en el intervalo de concentración de 0 a 25 mg/L.

Cada uno de los análisis fue realizado por triplicado, evaluando su calidad mediante la precisión y exactitud, siendo en todos los casos < 5%. La calidad total de los análisis químicos se determinó con el error de balance de cargas iónicas %E, el cual fue < ±5% para todas las muestras de agua (American Public Health Association, 1999).

Tabla 1. Nombre, clave y municipio correspondiente a las muestras de agua del acuífero Valle de Tulancingo.

Punto	Descripción	Clave	Municipio
1	Pozo Alcholoaya	ACH	Acatlán
2	Manantial La Cueva	MC	Acatlán
3	Pozo El Transformador	PC	Acatlán
4	Manantial Almoloaya	AL	Acatlán
5	Laguna Zupitlán	ZU	Acatlán
6	Pozo Benito Juárez	BJ	Acatlán
7	Pozo municipal	P3	Tulancingo
8	Pozo agrícola	P2	Tulancingo
9	Pozo agrícola	P4	Tulancingo
10	Manantial San Dionisio	SD	Acatlán
11	Pozo Salinas de Gortari	P5	Tulancingo
12	Pozo Chautenco	CH	Acatlán
13	Cueva Jaltepec	M3	Tulancingo
14	Pozo artesanal	M4	Tulancingo
15	Pozo agrícola	P1	Tulancingo
16	Manantial Napateco	NA	Tulancingo
17	Manantial Cuautepec	M1	Cuautepec
18	Pozo artesanal	MC3	Cuautepec
19	Pozo artesanal	MC1	Cuautepec
20	Pozo artesanal	MC2	Cuautepec
21	Laguna de Hueyapan	M2	Cuautepec
22	Manantial Ventoquipan	VE	Santiago Tulantepec

2.3. Evaluación hidroquímica

Las características hidroquímicas de las muestras de agua se establecieron mediante la integración de los datos derivados de los análisis químicos empleando el diagrama de Chadha (1999) para identificar las facies, el diagrama de Li *et al.* (2014) para clasificar la dureza y el índice de saturación para determinar las principales fases minerales disueltas en el sistema utilizando el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999).

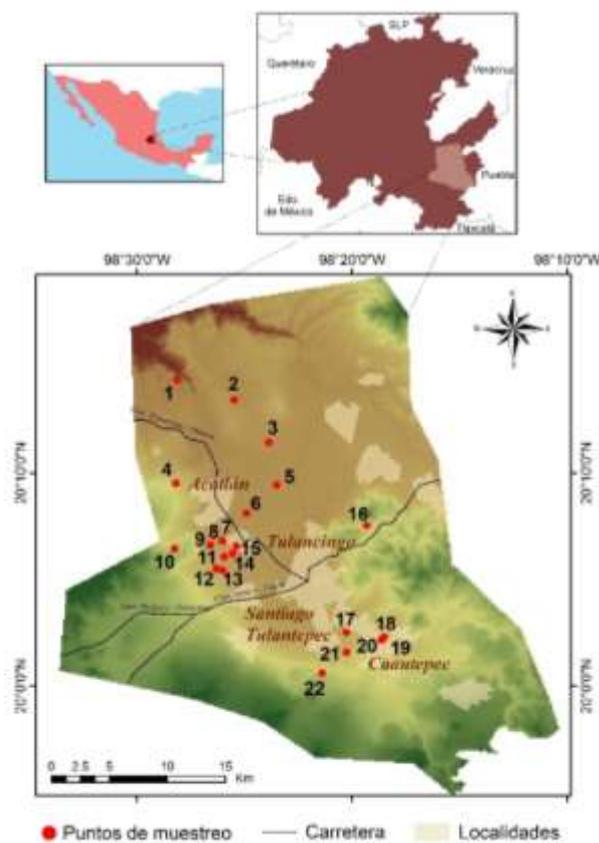


Figura 1. Localización del acuífero Valle de Tulancingo y ubicación de los puntos de muestreo (puntos 1-22).

2.4. Parámetros de calidad para irrigación

Los parámetros de salinidad que se evaluaron fueron la relación de adsorción de sodio (RAS), el %Na (Richards, 1968), la salinidad potencial (SP) (Doneen, 1962), el carbonato de sodio residual (CSR) (Lloyd y Heatcothe, 1985), el índice de permeabilidad (IP) (Doneen, 1962), la relación de Kelly (RK) (Kelly, 1940) y el riesgo de magnesio (HM) (Szabolcs, 1964), empleando las ecuaciones que a continuación se indican y las unidades de concentración de las especies iónicas en meq/L:

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

$$\% Na = \frac{Na^+}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+)} \times 100 \tag{2}$$

$$CSR = (HCO_3^- + CO_3^{2-}) - (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \tag{3}$$

$$SP = Cl^- + 0.5(SO_4^{2-}) \tag{4}$$

$$IP = \frac{Na^+ + \sqrt{HCO_3^-}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+)} \times 100 \tag{5}$$

$$RK = \frac{Na^+}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \tag{6}$$

$$MH = \frac{Mg^{2+}}{(Ca^{2+} + Mg^{2+})} \times 100 \tag{7}$$

Además de los parámetros de salinidad del agua, las muestras se clasificaron empleando la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS) en el diagrama de USSL (1954), así como la relación entre la conductividad eléctrica (CE) y el %Na mediante la gráfica de Wilcox (1948).

3. Resultados y discusión

3.1. Características fisicoquímicas del agua

La composición fisicoquímica de las muestras de agua se caracterizó por presentar valores de temperatura entre 13 y 17 °C, con un pH promedio de 7.24 (próximos a la neutralidad), siendo la laguna de Zupitlán la más alcalina (pH de 9.16). El valor promedio del potencial de óxido-reducción fue de 162.68 mV, característico de un sistema oxidante. La conductividad eléctrica (CE) promedio fue de 302.80 μS/cm y los sólidos totales disueltos (STD) promedio 202.86 mg/L, siendo el pozo Benito Juárez quien presentó los mayores valores de CE y STD con 850 μS/cm y 494 mg/L, respectivamente (tabla 2).

Tabla 2. Composición fisicoquímica de las muestras de agua provenientes del acuífero Valle de Tulancingo durante el mes de marzo de 2021. Valores mínimos (Min), máximos (Max), promedio (Prom) y desviación estándar (Desv).

Parámetros	Min	Max	Prom	Desv
T (°C)	13.0	17.0	14.91	1.230
pH	6.50	9.16	7.24	0.593
ORP (mV)	127.0	208.0	162.68	20.162
CE (μS/cm)	118.6	850.0	302.80	176.42
STD (mg/L)	85.0	494.0	202.86	107.68
Dureza (mg/L)	19.18	230.98	86.85	56.922
Componentes mayores (mg/L)				
Na ⁺	10.75	59.19	27.71	13.38
K ⁺	3.36	21.51	9.32	4.12
Mg ²⁺	1.83	20.18	7.39	4.96
Ca ²⁺	4.95	59.08	20.23	14.24
SiO _{2(ac)}	48.61	120.86	82.26	20.87
CO ₃ ²⁻	0	20.52	---	---
HCO ₃ ⁻	40.25	240.09	117.78	56.88
Cl ⁻	12.34	74.45	24.25	14.56
SO ₄ ²⁻	3.13	81.70	11.43	16.42
Componentes traza (mg/L)				
Al ³⁺	0.14	1.77	0.27	0.34
Ag ⁺	1.52	1.76	1.67	0.06
NO ₃ ⁻	0	2.34	0.54	0.62
PO ₄ ³⁻	0.45	23.54	8.96	6.92
%E	-4.17	4.98	-0.28	4.57

Las concentraciones promedio de los cationes mayores disminuyen en el siguiente orden: Na⁺ > Ca²⁺ > K⁺ > Mg²⁺, en tanto que el promedio de los aniones mayores en el orden: HCO₃⁻ > Cl⁻ > SO₄²⁻. Destacando un dominio de los iones Na⁺, Ca²⁺ y

HCO₃⁻, principalmente. Es importante mencionar que el único sitio que presentó CO₃²⁻ fue la laguna de Zupitlán con 20.52 mg/L. Además de los iones mayores, es notable la elevada concentración de SiO₂ disuelta (o H₄SiO₄), cuya concentración promedio fue de 82.26 mg/L. En cuanto a los componentes traza se determinaron Al³⁺, Ag⁺, NO₃⁻ y PO₄³⁻, cuyas concentraciones promedio fueron inferiores a 10 mg/L (tabla 2). De manera general, se considera que los parámetros fisicoquímicos evaluados corresponden a los valores característicos de aguas subterráneas clasificadas como aguas dulces (Griffioen, 2004).

3.2. Evaluación hidroquímica

La clasificación hidroquímica de las muestras de agua para los 22 sitios seleccionados en el acuífero Valle de Tulancingo empleando el diagrama de Chadha (1999) permitió identificar que el 36.36% presentó una facie Na-K-HCO₃, 40.90% una facie Ca-Mg-HCO₃, 9.09% una facie mixta Ca-Mg-Na-K-HCO₃, 4.55% una facie Ca-Mg-CO₃-HCO₃, 4.55% la facie Ca-Mg-Cl-SO₄ y 4.55% la facie mixta Ca-Mg-HCO₃-Cl-SO₄ (figura 2, tabla 3). La clasificación de su dureza en el diagrama de Li *et al.*, (2014) definió al 90.91% de las muestras como agua dulce suave y al 9.09% como agua dulce moderadamente dura (figura 3).

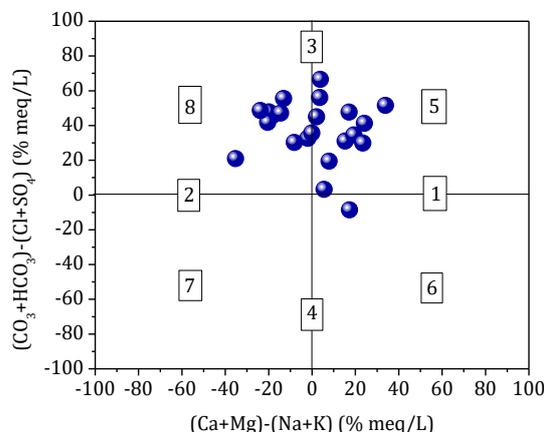


Figura 2. Clasificación de las facies hidroquímicas empleando el diagrama de Chadha (1999).

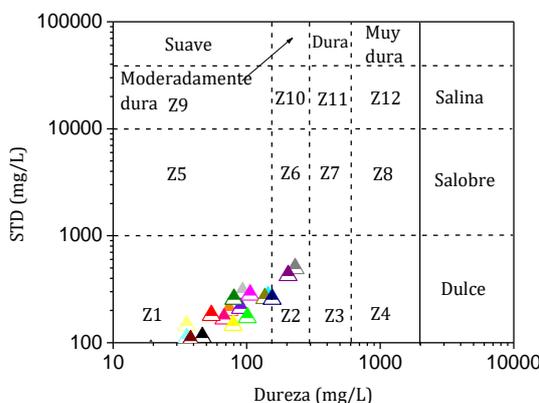


Figura 3. Clasificación de la dureza de acuerdo con el diagrama de Li *et al.* (2014).

Tabla 3. Facies hidroquímicas asociadas a los diferentes sitios de muestreo en el acuífero Valle de Tulancingo en el mes de marzo de 2021.

Punto	Sitio	Facie hidroquímica
1	Pozo Alcholoaya	Ca-Mg-HCO ₃
2	Manantial La Cueva	Ca-Mg-HCO ₃
3	Pozo El Transformador	Na-K-HCO ₃
4	Manantial Almoloaya	Ca-Mg-HCO ₃
5	Laguna Zupitlán	Ca-Mg-CO ₃ -HCO ₃
6	Pozo Benito Juárez	Ca-Mg-Cl-SO ₄
7	Pozo municipal	Na-K-HCO ₃
8	Pozo agrícola	Na-K-HCO ₃
9	Pozo agrícola	Na-K-HCO ₃
10	Manantial San Dionisio	Na-K-HCO ₃
11	Pozo Salinas de Gortari	Na-K-HCO ₃
12	Pozo Chautenco	Na-K-HCO ₃
13	Cueva Jaltepec	Ca-Mg-HCO ₃
14	Pozo artesanal	Ca-Mg-HCO ₃ -Cl-SO ₄
15	Pozo agrícola	Ca-Mg-Na-K-HCO ₃
16	Manantial Napateco	Ca-Mg-HCO ₃
17	Manantial Cuauhtepic	Ca-Mg-HCO ₃
18	Pozo artesanal	Ca-Mg-Na-K-HCO ₃
19	Pozo artesanal	Ca-Mg-HCO ₃
20	Pozo artesanal	Ca-Mg-HCO ₃
21	Laguna de Hueyapan	Na-K-HCO ₃
22	Manantial Ventoquipan	Ca-Mg-HCO ₃

Para identificar los minerales que interactúan con el acuífero es necesario evaluar el índice de saturación (IS) de diferentes fases propuestas a partir de la composición química del agua. El índice de saturación puede adoptar un valor positivo cuando el sistema se encuentra bajo una condición de sobresaturación, negativo si esta insaturado y cero si se encuentra en equilibrio (Drever, 1997). Los valores del IS para diferentes fases minerales se calcularon a partir de la composición química de las muestras de agua empleando el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999) y se representaron en la figura 4.

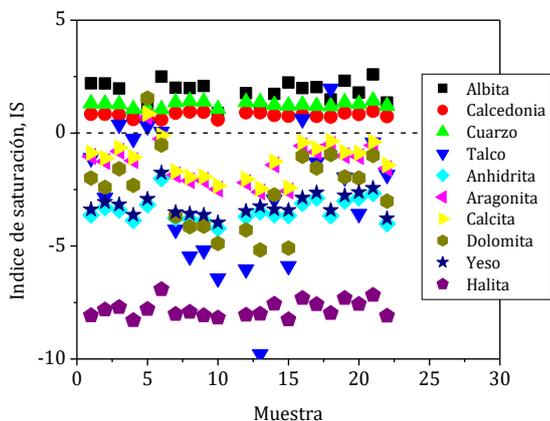
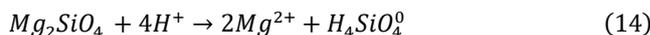
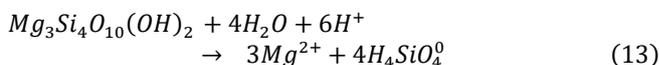
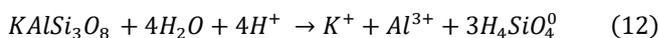
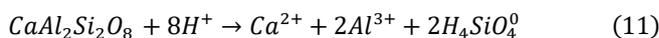
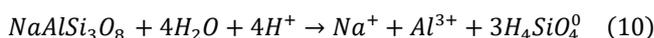


Figura 4. Variación del índice de saturación (IS) para las diferentes fases minerales propuestas, considerando la composición química de las muestras de agua.

De acuerdo con el índice de saturación evaluado, el acuífero se encuentra sobresaturado con Albita (NaAlSi₃O₈), cuarzo (SiO₂), calcedonia (SiO₂) y únicamente algunas muestras con talco

(Mg₃Si₄O₁₀(OH)₂) e insaturado con anhidrita (CaSO₄), aragonita (CaCO₃), calcita (CaCO₃), dolomita (CaMg(CO₃)₂), yeso (CaSO₄·2H₂O) y halita (NaCl).

Es factible inferir que, en una etapa inicial, de acuerdo con el ciclo del agua, ésta interactúa con el CO₂ atmosférico para formar ácido carbónico (H₂CO₃), mismo que al disociarse forma los iones H⁺ y HCO₃⁻. En etapas posteriores, al percolarse hacia el acuífero, estas especies interactúan con las unidades litológicas y en particular con los minerales que conforman las rocas ígneas que lo confinan (Lesser *et al.*, 2006), siendo significativas las siguientes reacciones químicas que promueven la disolución de albita, anortita (CaAl₂Si₂O₈), feldespato alcalino (KAlSi₃O₈) y talco que puede ser sustituido por piroxenos como forsterita (Mg₂SiO₄) (Drever, 1997):



Bajo los procesos de disolución de los minerales mencionados previamente, es notable la aportación de iones como Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺ y HCO₃⁻ al acuífero, así como cantidades significativas de H₄SiO₄ (SiO₂ acuosa) y que de manera congruente podrían explicar las diferentes facies hidroquímicas dominantes en el acuífero.

3.3. Parámetros de calidad para propósitos de irrigación

De acuerdo con los valores de la relación de adsorción de sodio (RAS) estimados a partir de la composición química de las muestras de agua se obtuvo un valor promedio de 1.379 (tabla 4). Todas las muestras presentaron valores inferiores a 10, lo cual permite clasificarlas con la categoría S1 (USSL, 1954), siendo excelentes para irrigación en cualquier tipo de suelos. La distribución bidimensional de la RAS en el acuífero se aprecia en la figura 5.

El valor promedio del %Na fue de 49.637 (tabla 4), clasificando al 13.64% de las muestras como de buena calidad (20 < %Na < 40), al 72.72% de calidad permisible (40 < %Na < 60) y al 13.64% de dudosa calidad (60 < %Na < 80). En relación con el carbonato de sodio residual (CSR), se observó un valor promedio de 0.346 meq/L (tabla 4), con el 100% de las muestras con valores inferiores a 1.25 meq/L, clasificándose de buena calidad para irrigación.

La salinidad potencial (SP) presentó un valor promedio de 0.804 meq/L, con el 100% de las muestras con valores inferiores a 3 meq/L, lo que permite clasificarlas como favorables para la

irrigación. La distribución bidimensional de la SP en el acuífero se representa en la figura 6.

Tabla 4. Parámetros de calidad para agua de riego en el acuífero Valle de Tulancingo. Valores mínimos (Min), máximos (Max), promedio (Prom) y desviación estándar (Desv).

Parámetro	Min	Max	Prom	Desv
RAS	0.783	1.912	1.379	0.348
%Na	33.105	67.635	49.637	9.107
CSR	-1.224	0.983	0.346	0.511
SP	0.397	2.954	0.804	0.565
IP	62.325	141.128	101.120	21.649
RK	0.405	1.686	0.872	0.324
MH	33.415	39.867	37.695	1.473

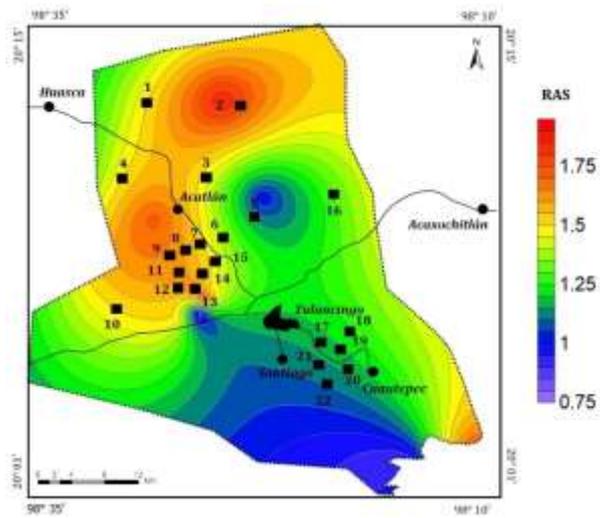


Figura 5. Variación bidimensional de la relación de adsorción de Sodio (RAS) en el acuífero Valle de Tulancingo (Surfer®, Golden Software LLC).

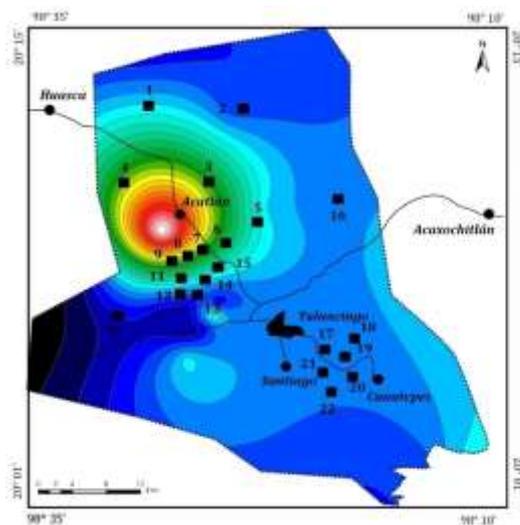


Figura 6. Variación bidimensional de la salinidad potencial (SP) en el acuífero Valle de Tulancingo (Surfer®, Golden Software LLC).

El valor promedio del índice de permeabilidad (IP) fue de 101.120% (tabla 4), con el 86.36% de las muestras de calidad favorable (clase I: $IP > 75\%$) y el 13.64% de las muestras con buena calidad (clase II: $25\% < IP < 75\%$). La relación de Kelly (RK) presentó un valor promedio de 0.872 meq/L, con el 68.18% de las muestras con valores inferiores a 1 meq/L, siendo clasificadas de buena calidad, mientras que el 31.82% se clasificaron como de dudosa calidad con $RK > 1$ meq/L, en la figura 7 se representa la distribución de la relación de Kelly (RK) en el acuífero Valle de Tulancingo. Los valores estimados para el riesgo de magnesio (MH) fueron inferiores en todos los casos a 50, lo cual favorece su utilización para irrigación.

La clasificación de las muestras en el diagrama de USSL (1954), indicó que el 45.45% se encuentra en la categoría C1S1 (baja salinidad y bajo contenido de sodio), el 50% en la categoría C2S1 (salinidad media, bajo contenido en sodio) y 4.55% en la categoría C3S2 (alta salinidad, bajo contenido en sodio) (figura 8).

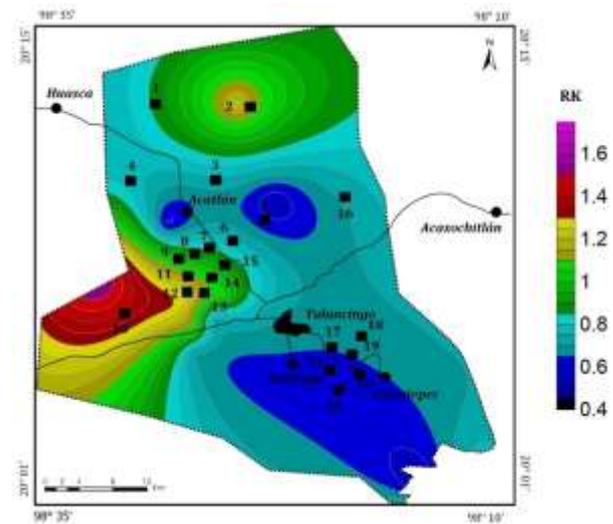


Figura 7. Variación bidimensional de la relación de Kelly (RK) en el acuífero Valle de Tulancingo (Surfer®, Golden Software LLC).

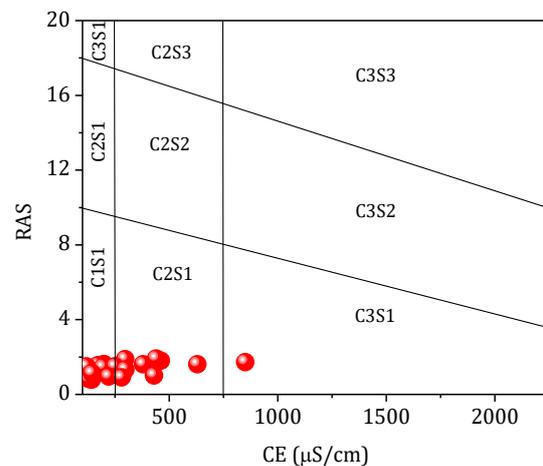


Figura 8. Clasificación de las muestras de agua mediante la conductividad eléctrica y la RAS en el diagrama de USSL (1954).

La representación de las muestras en el diagrama de Wilcox (1948) permitió establecer que el 95.45% de ellas se consideran como de excelente a buena calidad y el 4.55% como de calidad buena a permisible (figura 9).

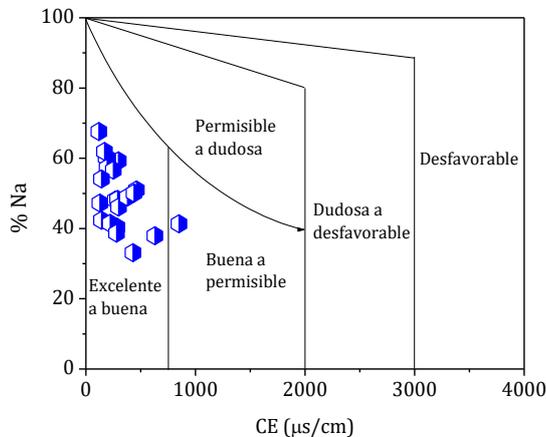


Figura 9. Clasificación de las muestras de agua en el diagrama de Wilcox (1948) de acuerdo con la relación de la conductividad eléctrica (CE) y el %Na.

Después de analizar los diferentes parámetros de calidad del agua para irrigación, se puede establecer que, en términos generales, el acuífero Valle de Tulancingo presenta una buena calidad para este propósito. Sin embargo, es importante mencionar que, en la región comprendida entre los municipios de Tulancingo de Bravo y Acatlán, se ha observado una tendencia a incrementarse los valores de los parámetros de salinidad, bajo esta anomalía es recomendable su monitoreo regular para descartar afectaciones antropogénicas al acuífero.

4. Conclusiones

La evaluación del acuífero Valle de Tulancingo para propósitos de irrigación aplicando diferentes criterios y parámetros de salinidad permite establecer que presenta una buena calidad. Sin embargo, debido a la observación de ligeras anomalías entre los municipios de Tulancingo de Bravo y Acatlán es recomendable la evaluación periódica del acuífero para limitar o diagnosticar la posible perturbación del sistema por causas antropogénicas, toda vez que representa un recurso invaluable para las comunidades que sustentan su alimentación y economía en la producción agrícola mediante irrigación.

La importancia que representa una buena calidad del agua para propósitos de irrigación radica en que no solo garantiza el éxito de la producción agrícola, sino también la certeza de que los productos pueden ser consumidos sin mayores riesgos a la salud, con la excepción de aquellos derivados de su mal manejo o malas prácticas agronómicas.

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Q. Verónica García Hernández del laboratorio de Absorción atómica e ICP del AACTyM por su valioso apoyo en los análisis químicos, así como a la Ing. Geóloga Amb. Anallely Ávila Ortíz por la elaboración de los mapas.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- American Public Health Association, (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20th Ed. APHA, AWWA, WEF. 1-45.
- Assaha, D. V. M., Ueda, A., Saneoka, H., Al-Yahyai, R., Yaish, M. W., (2017). The role of Na⁺ and K⁺ transporters in salt stress adaptation in glycophytes. *Front. Physiol.* 8 (509). 1-19. DOI: 10.3389/fphys.2017.00509
- Comisión Nacional del Agua, (2018a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero del Valle de Tulancingo (1317), Estado de Hidalgo. Publicado en el Diario Oficial de la Federación en enero de 2018. Recuperado el 15 de Febrero de 2022 de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103066/DR_1317.pdf
- Comisión Nacional del Agua, (2018b). Estadísticas del Agua en México. Edición 2018. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Recuperado el 2 de marzo de 2022 en https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- Comisión Nacional del Agua, (2019). Estadísticas del agua en México 2019. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, México. Recuperado el 6 de marzo de 2022 en http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf
- Comisión Nacional del Agua, (2020a). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de Tulancingo (1317), Estado de Hidalgo. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. Recuperado el 21 de abril del 2022 en https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1317.pdf
- Comisión Nacional del Agua, (2020b). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el Acuífero Tepeji del Río (1316), Estado de Hidalgo. Subdirección General Técnica, Gerencia de Aguas Subterráneas. Recuperado el 21 de abril de 2022 en https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/hidalgo/DR_1316.pdf
- Chadha, D. K., (1999). A proposed new diagram for geochemical classification of natural waters and interpretation of chemical data. *Hydrogeol. J.* 7, 431-439.
- Doneen, L. D., (1962). The influence of crop and soil on percolating water. *Proc. 1961 Biennial Conference on Groundwater Recharge.* 156-163.
- Drever, J. I., (1997). The geochemistry of natural waters: surface and groundwater environments (3rd Edition). Prentice-Hall, New Jersey USA.
- Griffioen, J., (2004). Groundwater quality. In: V.S. Kovalevsky, G.P. Kruseman, & K.R. Rushton (Eds.), *Groundwater studies: an international guide for hydrogeological investigations.* IHP-VI, Series on groundwater No. 3. UNESCO, Paris, Ch. 2, pp. 43-65.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (2021). Censos y conteos de población y vivienda 2020. Consultado el 13 de marzo de 2022 en <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>
- Kelly, W. P., (1940). Permissible composition and concentration of irrigated waters. *Proc. Am. Soc. Civ. Eng.* 66, 607-613.
- Lesser, I. J. M., Arellano, I. S., González, P. D., Lesser, C. L. E., (2006). Balance y modelo del acuífero del Valle de Tulancingo. Resumen ejecutivo. Recuperado el 20 de Abril de 2022 en http://www.lessor.com.mx/files/07.1-Tulancingo_Lesser.pdf
- Li, P., Wu, J., Qian, H., (2014). Hydrogeochemistry and quality assessment of shallow groundwater in the southern part of the Yellow River alluvial plain (Zhongwei Section), Northwest China. *Earth. Sci. Res.* J. 18 (1), 27-38.
- Lloyd, J. W., Heathcote, J. A., (1985). *Natural inorganic hydrochemistry in relation to groundwater: an introduction* (1st Ed.). Clarendon, USA.
- Naciones Unidas, (2018). La Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible: una oportunidad para América Latina y el Caribe (LC/G.2681-

- P/Rev.3), Santiago. Recuperado el 11 de abril de 2022 en https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/S1801141_es.pdf
- Orosco-Alcalá, B. E., Núñez-Paleniús, H. G., Pérez-Moreno, L., Valencia-Posadas, M., Trejo-Téllez, L. I., Díaz-Serrano, F. R., Ruíz-Nieto, J. E., Abraham-Juárez, M. R., (2018). Tolerancia a la salinidad en plantas cultivadas: una visión agronómica. *Agroproductividad* 11 (7), 51-57.
- Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J., (1999). User's guide to PHREEQC (ver. 2): A computer program for speciation, batch reaction, one dimensional transport, and inverse geochemical calculations. USGS Water Resources Investigation Report 99, 4259.
- Rawat, K. S., Singh, S. K., Gautam, S. K., (2018). Assessment of groundwater quality for irrigation use: a peninsular case study. *Appl. Water Sci.* 8(8), 1-24.
DOI: 10.1007/s13201-018-0866-8
- Richards, L. A., (1968). Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. *Agriculture handbook* 60, 210-220.
- Rodier, J., Legube, B., Merlet, N., (1998). *Análisis del agua*. Ediciones Omega, Barcelona.
- Sadzawka, R.A., (2006). *Métodos de análisis de aguas para riego*. Serie Actas INIA No. 37. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, (2021). *Estadística de Producción Agrícola 2010-2020*. Consultado el 21 de marzo de 2022 en <http://infosiap.siap.gob.mx/gobmx/datosAbiertos.php>
- Szabolcs, I., (1964). The influence of irrigation water of high sodium carbonate content on soils. *Agrokémia és talajtan*, 13 (sup), 237-246.
- USSL, (1954). *Classification of irrigation waters*. US Department of Agriculture, Circu 969. Washington.
- Wilcox, L. V. (1948). *The quality of water for irrigation use*. US Dept. of Agriculture, Tech. Bull. 962, Washington, D.C.