

# Hidroquímica e índice de calidad del Acuífero del Valle de Tulancingo, Hidalgo, México

Cruz Sánchez Misael<sup>1\*</sup>, Avila Ortíz Anallely<sup>1</sup>, Mora Monzalvo Vanessa<sup>1</sup>, Girón García Patricia<sup>2</sup>,  
Salcedo Luna María Cecilia<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería. Ciudad del Conocimiento, Carr. Pachuca-Tulancingo Km 4.5, Col. Carboneras, Mineral de la Reforma, Hidalgo. C.P. 42184. México.

<sup>2</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, Departamento de Geoquímica, Instituto de Geología. Circuito de la Investigación Científica S/N, Delegación Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510. México.

<sup>3</sup>Universidad Nacional Autónoma de México, USAI, Facultad de Química. Circuito de la Investigación Científica S/N, Delegación Coyoacán, Ciudad de México. C.P. 04510. México.

\*Autor para correspondencia: izaskm@yahoo.es

## Recibido:

29/febrero/2020

## Aceptado:

11/diciembre/2020

## Palabras clave:

Acuífero,  
hidroquímica,  
calidad

## Keywords:

Aquifer,  
hydrochemistry,  
quality

## RESUMEN

El Acuífero del Valle de Tulancingo es uno de los acuíferos más sobreexplotados del país con un déficit anual superior a los 20 millones de metros cúbicos; esta situación podría afectar su calidad de manera progresiva haciéndolo más vulnerable. El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar las propiedades fisicoquímicas de 4 pozos, 5 manantiales y una laguna, integrando los datos en diagramas hidroquímicos y en el índice de calidad del agua para establecer sus características y las posibles perturbaciones antropogénicas inducidas al acuífero. La naturaleza del agua es atmosférica-litotrófica cuya composición química se define por la interacción agua-roca y particularmente por la disolución de los basaltos que conforman el acuífero, presentándose facies Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> y Na-K-HCO<sub>3</sub>, principalmente. De acuerdo al índice de calidad del agua, su calidad varía desde buena a excelente, sin embargo, la presencia anómala de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> indica una posible afectación antropogénica.

## ABSTRACT

The Tulancingo Valley Aquifer is one of the most overexploited aquifers in the country with an annual deficit exceeding 20 million cubic meters; this situation could affect its quality progressively making it more vulnerable. The objective of the present research work was to evaluate the physicochemical properties of 4 wells, 5 springs, and a lagoon, integrating the data in hydrochemical diagrams and in the water quality index to establish their characteristics and the possible anthropogenic disturbances induced to the aquifer. The nature of the water is atmospheric-lithotrophic whose chemical composition is defined by the water-rock interaction and particularly by the dissolution of the basalts that make up the aquifer, showing Ca-Mg-HCO<sub>3</sub> and Na-K-HCO<sub>3</sub> facies, mainly. According to the water quality index, its quality varies from good to excellent; however the anomalous presence of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup> and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> indicates possible anthropogenic affectation.

## Introducción

Uno de los principales objetivos globales dentro de la Agenda de Desarrollo Sostenible 2030 es el de garantizar la disponibilidad del agua, su gestión y saneamiento (ONU, 2015). Bajo este contexto, es importante destacar que el agua subterránea constituye aproximadamente el 98% del agua dulce no congelada en el mundo, siendo fundamental para la dinámica terrestre promoviendo diversos procesos geológicos, geoquímicos y ecológicos, sin olvidar que su disponibilidad, calidad, costo y facilidad de explotación ha permitido el desarrollo de la sociedad, aún en ambientes extremos.

El agua subterránea representa un recurso natural de suma importancia en el desarrollo socioeconómico del país debido a que su explotación se realiza con diferentes propósitos. De acuerdo a la Comisión Nacional del Agua (CNA), en México existen 653 acuíferos, donde el 39.1% (34 390 hm<sup>3</sup>) de su volumen total se encuentra concesionado para usos en los sectores agrícola (70.72%, 24 320 hm<sup>3</sup>), de abastecimiento público (21.46%, 7 380 hm<sup>3</sup>), en la industria autoabastecida (6.49%, 2 230 hm<sup>3</sup>) y en la producción de energía eléctrica (1.31%, 450 hm<sup>3</sup>) (CNA, 2018a). Desafortunadamente, las aguas subterráneas enfrentan dos grandes amenazas: la contaminación y la sobreexplotación.

La contaminación del agua subterránea se origina a partir de diferentes fuentes puntuales tales como: la lixiviación en rellenos y otros sitios de deposición de residuos; la percolación de residuos agrícolas (incluyendo desechos animales, fertilizantes y pesticidas), a través de fugas en tanques de almacenamiento subterráneo de combustibles, así como por la descarga deliberada de tanques sépticos y residuos industriales (Drever, 1997).

La sobreexplotación de un acuífero se presenta cuando su explotación supera su recarga media anual, lo cual produce un impacto ambiental negativo. En el país el número de acuíferos sobreexplotados ha aumentado dramáticamente en los últimos 40 años, existiendo únicamente 32 en el año de 1975 (CNA, 2008) e incrementándose a 105 en el año 2018 (CNA, 2018a). La sobreexplotación de las aguas subterráneas no solo conlleva a la disminución de su disponibilidad, sino también a la modificación de su calidad.

El acuífero del Valle de Tulancingo es un ejemplo patente de un acuífero sobreexplotado, mismo que presentaba un déficit de 6.770766 hm<sup>3</sup>/año en el 2006, incrementándose notablemente a 20.117722 hm<sup>3</sup>/año hacia el 2015 (CNA, 2018b), es decir, el déficit prácticamente se triplicó en un periodo de 10 años. La vulnerabilidad del acuífero no solo es causada por la sobreexplotación, sino por su inminente contaminación,

derivada de un mal manejo de las prácticas agrícolas, industriales y domésticas (del Villar, 2014).

El objetivo del presente trabajo de investigación fue evaluar las propiedades fisicoquímicas de 4 pozos, 5 manantiales y una laguna localizados en el acuífero del Valle de Tulancingo, integrando los datos en diagramas hidroquímicos y en el índice de calidad del agua, para establecer sus características y las posibles perturbaciones antropogénicas inducidas al acuífero.

## Descripción del área de estudio

### Localización

El acuífero del Valle de Tulancingo se localiza en el sureste del Estado de Hidalgo entre los paralelos 19° 54' y 20° 19' latitud norte y entre los meridianos 98° 10' y 98° 33' longitud oeste, en los límites con el Estado de Puebla. Comprende las áreas municipales de Tulancingo, Cuautepec, Santiago Tulantepec, Metepec, Acatlán y parcialmente Singuilucan, Huasca de Ocampo, Acaxochitlán y Tenango de Doria, cubriendo una superficie de 1 054 Km<sup>2</sup> (CNA, 2018b). Este acuífero colinda con los acuíferos de Metztitlán, Acaxochitlán, Huasca-Zoquitlan y Tecocomulco, ubicados en el Estado de Hidalgo; con los acuíferos Álamo-Tuxpan y Tecolutla en el Estado de Veracruz y con el acuífero Cuautitlán-Pachuca situado entre el Estado de Hidalgo y el Estado de México.

### Clima

El Valle de Tulancingo presenta dos tipos de climas, en la región central es semiseco templado y en sus bordes es templado subhúmedo con lluvias en verano. La temperatura media anual es de 15 °C, con una precipitación y evaporación potencial promedio anuales de 532.1 mm y 1541.8 mm, respectivamente (CNA, 2018b).

### Geología

El acuífero del Valle de Tulancingo se encuentra dentro de las provincias geológicas del Eje Neovolcánico y la Sierra Madre Oriental, sin embargo, en la superficie únicamente afloran rocas volcánicas características de la primera provincia, las cuales sobreyacen discordantemente a las rocas mesozoicas de la Sierra Madre Oriental. El Valle de Tulancingo corresponde a una fosa tectónica que fue rellenada primero por materiales clásticos de origen continental y posteriormente por depósitos piroclásticos y rocas volcánicas cuya extrusión se originó a través de fallas y fracturas (Ortega et al., 1992).

La geología del subsuelo está constituida por diferentes estratos: material aluvial, basaltos, la Formación

Atotonilco El Grande, las unidades Riolita Navajas y el Grupo Pachuca. El material aluvial comprende gravas, arcillas y limos que varían de 1 a 20 m de espesor. Los basaltos constituyen la unidad geológica de mayor distribución en la región de estudio, los cuales se caracterizan por presentar intenso fracturamiento y alta vesicularidad; en algunas zonas afloran y en otras subyacen al material aluvial, su espesor varía entre 20 y 40 m.

La Formación Atotonilco El Grande se caracteriza por presentar una alternancia de materiales piroclásticos, estratos de cenizas volcánicas (tezontle y pómez) y eventualmente riolitas y basaltos distribuidos ampliamente en el valle con espesores que varían de 50 a más de 120 m. La Formación Riolita Navajas está conformada por derrames de riolitas masivas poco fracturadas que subyacen a la Formación Atotonilco El Grande y a los derrames basálticos (Yta et al., 1999).

En las porciones este, oeste y noroeste del Valle de Tulancingo las rocas de la Riolita Navajas y el Grupo Pachuca son impermeables y definen las barreras laterales del acuífero, la Formación Atotonilco El Grande es permeable y conforma el principal acuífero en explotación, en tanto que los basaltos y sedimentos aluviales son permeables y funcionan como zona de recarga (CNA, 2018b).

### Hidrología

El acuífero del Valle de Tulancingo se encuentra dentro de la Región Hidrológica del Río Pánuco (RH26), situada en el centro-noreste de la República Mexicana. La subregión corresponde al Alto Pánuco del Río Moctezuma, del cual es afluente el Río Grande de Tulancingo que nace en la sierra norte de Puebla a partir de la confluencia del Río San Lorenzo y recorre el valle en dirección noroeste cambiando su nombre a Río Alcholoaya y posteriormente a Río Metztlán. El sistema de drenaje en la región es de tipo dendrítico, predominando corrientes superficiales de régimen intermitente como los ríos Ahualtongo, Santa María, Acocul, Chico, Metepec y Los Cangrejos, entre otros.

El nivel estático del acuífero varía de 50 a 180 m de profundidad, siendo más somero al oeste de Metepec y más profundo hacia la sierra sur donde alcanza hasta 120 m. En el centro del valle, que corresponde a la zona urbana de Tulancingo varía de 70 a 80 m. En tanto que hacía al norte de la localidad de Alcholoaya, el nivel cambia gradualmente desde 70 hasta 180 m debido a la presencia de las barrancas de Metztlán que drenan el acuífero (Lesser et al., 2006).

El acuífero se recarga a partir de la infiltración del agua de lluvia que se precipita sobre el valle, a través del flujo

subterráneo proveniente de las zonas montañosas contiguas y mediante la infiltración de los excedentes del riego agrícola, principalmente. En su trayectoria, el agua subterránea es extraída mediante pozos o aflora en forma de manantiales, para ser empleada en actividades industriales, domésticas y agrícolas, predominando su uso intensivo para riego (CNA, 2018b).

### Metodología

#### Descripción de las muestras

En el mes de Noviembre de 2019 se colectaron diez muestras de agua correspondientes a 4 pozos, 5 manantiales y una laguna localizados en el acuífero del Valle de Tulancingo (tabla 1, figura 1). La selección de los sitios se realizó en base a su accesibilidad. Las muestras fueron etiquetadas con la clave de muestra, temperatura, fecha y coordenadas geográficas para su traslado al laboratorio en una hielera, conservándolas en refrigeración a 4 °C hasta el momento de su análisis, el cual no fue mayor a 48 h.

**Tabla 1.** Nombre, clave y municipio correspondiente a las muestras de agua.

No.	Nombre	Clave	Municipio
1	Pozo Alcholoaya	ACH	Acatlán
2	Manantial La Cueva	MC	Acatlán
3	Pozo El Transformador	PT	Acatlán
4	Manantial Almoloya	AL	Acatlán
5	Pozo Benito Juárez	BJ	Acatlán
6	Manantial San Dionisio	SD	Acatlán
7	Pozo Chautenco	CH	Acatlán
8	Laguna Zupitlán	ZU	Acatlán
9	Manantial Napateco	NA	Tulancingo
10	Manantial Ventoquipan	VE	Santiago Tulantepec

#### Análisis fisicoquímicos

Para realizar los diversos análisis fisicoquímicos, las muestras de agua fueron filtradas empleando una bomba de vacío, matraz kitasato y embudo Büchner adaptado con un filtro de acetato de celulosa con poros de 0.42 µm. El agua filtrada se separó en dos fracciones, una fracción se conservó con su pH natural y la segunda se aciduló con HNO<sub>3</sub> hasta pH 3.

La fracción de agua no acidulada fue utilizada para determinar el pH (potenciometría), conductividad eléctrica CE (conductivimetría), sólidos totales disueltos STD (evaporación y sequedad a 105 °C), Cl<sup>-</sup> (titulación), CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> (titulación), PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> (espectrofotometría) y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> (espectrofotometría) de acuerdo a las técnicas descritas por Sadzawka (2006). Adicionalmente, se

determinó la concentración de  $\text{NO}_3^-$  mediante su reacción con salicilato de sodio en medio ácido y espectrofotometría de absorción de radiación visible a 410 nm, empleando curvas de calibración estándar preparadas con  $\text{NaNO}_3$  (Rodier et al., 1998).

La fracción de agua acidulada con  $\text{HNO}_3$  se utilizó para el análisis elemental por 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 para cada elemento (Na, K, Mg, Ca, Si, Al, Fe, As, Ag y Pb).

Al, Fe, As, Ag y Pb tuvieron una precisión  $<1.4\%$  y una exactitud  $<5\%$ . La calidad total de los análisis químicos se determinó mediante el error de balance de cargas iónicas %E, el cual fue  $< \pm 5\%$  en todos los casos (APHA, 1999).

### Evaluación hidroquímica

Para establecer las características hidroquímicas de las muestras de agua del acuífero del Valle de Tulancingo, se integraron los datos derivados de los análisis fisicoquímicos en los diagramas de van Wirdum (1980), Miffin (1968), Gibbs (1970) y Chadha (1999), calculando el índice de saturación (IS) para los principales minerales presentes en el sistema mediante el programa PHREEQC (Parkhurst y Appelo, 1999).

### Calidad del agua

Dado que la dureza influye notablemente en las propiedades organolépticas del agua, las muestras se clasificaron en el diagrama de Li et al. (2014) mediante la representación de los valores de los sólidos totales disueltos (STD) y la dureza total, calculada como la suma de las concentraciones de Mg y Ca (Weiner, 2013).

En este trabajo de investigación, la evaluación del agua se enfocó en su uso para consumo humano, por ello se estimó el Índice de Calidad del Agua (ICA), el cual corresponde a un índice integral que incluye los diferentes parámetros fisicoquímicos del agua, ponderados en función de su impacto a la salud y relacionados con los valores límite recomendados por las autoridades sanitarias.

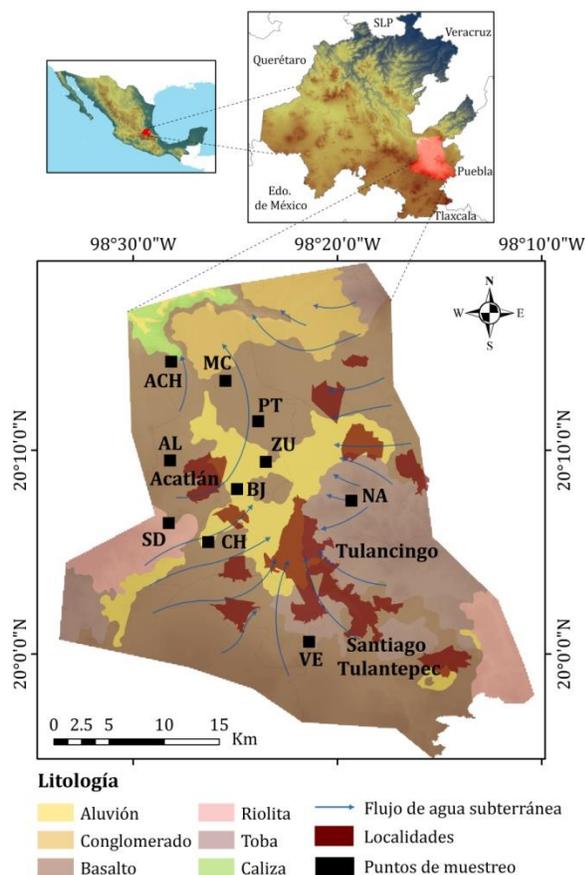
El índice de calidad del agua, ICA, constituye una herramienta efectiva para monitorear, evaluar y planificar las diversas estrategias de conservación de la calidad de las aguas subterráneas y superficiales. El ICA se calcula empleando los principales parámetros de una muestra de agua, es decir incluye los cationes y aniones mayores, así como el pH, STD,  $\text{F}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , asignándoles un factor de peso (w) en función de su influencia en la calidad del agua para consumo, siendo  $w=1$  para  $\text{HCO}_3^-$  y  $w=5$  para STD y  $\text{NO}_3^-$  (Jasmin y Mallikarjuna, 2014; Singh y Hussian, 2016).

Una vez definido  $w_i$  para cada especie, se calcula su peso relativo ( $W_i$ ) a través de la siguiente expresión (Krishna et al., 2015):

$$W_i = w_i / \sum w_i \quad (1)$$

En una segunda etapa, se calcula un factor de calidad ( $Q_i$ ) para cada parámetro, dividiendo su concentración experimental ( $C_i$ ) respecto del valor de referencia recomendado ( $S_i$ ) (Singh y Hussian, 2016):

$$Q_i = (C_i/S_i) \times 100 \quad (2)$$



**Figura 1.** Localización del acuífero del Valle de Tulancingo, características geológicas superficiales y sitios de muestreo.

Cada análisis se realizó por triplicado, evaluando la calidad de los mismos mediante la estimación de la precisión y exactitud. Para el pH y la conductividad eléctrica la precisión fue  $<2\%$  y la exactitud  $<1\%$ , para las determinaciones volumétricas de  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  la precisión fue  $<4\%$  y la exactitud  $<5\%$ . En el caso de la determinación de sólidos totales disueltos la precisión fue  $<2\%$  y la exactitud  $<3\%$ . La precisión y exactitud de las determinaciones de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{NO}_3^-$  fueron  $<3\%$  y  $<4\%$ , respectivamente. Los análisis de Na, K, Mg, Ca, Si,

En este caso se han empleado los valores de referencia ( $S_i$ ) de la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011) y de la Oficina de Normas Indias (BIS, 2012) (tabla 2), siendo más actuales que la NOM-1994 modificada (DOF, 1996).

**Tabla 2.** Parámetros fisicoquímicos para la evaluación del ICA: factor de peso, peso relativo para cada especie y valores de referencia en unidades de mg/L (Singh y Hussian, 2016).

No.	Parámetro	Factor de Peso, $w_i$	Peso relativo, $W_i$	WHO (2011), BIS (2012)
1	STD	5	0.1190	600
2	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1	0.0238	600
3	Cl <sup>-</sup>	5	0.1190	250
4	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	5	0.1190	250
5	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5	0.1190	50
6	F <sup>-</sup>	5	0.1190	1.50
7	Ca <sup>2+</sup>	3	0.0714	200
8	Mg <sup>2+</sup>	3	0.0714	100
9	Na <sup>+</sup>	4	0.0952	200
10	K <sup>+</sup>	2	0.0476	12
11	pH	4	0.0952	6.5-8.5

Para calcular el índice de calidad del agua, ICA, se evalúa en una etapa previa el subíndice de calidad para cada parámetro ( $SI_i$ ) mediante la expresión:

$$SI_i = W_i \times Q_i \quad (3)$$

Calculando el ICA como:

$$ICA = \sum SI_i \quad (4)$$

De acuerdo al valor del ICA, el agua se puede clasificar en las siguientes categorías (Singh y Hussian, 2016): excelente (ICA <50); buena (50 < ICA <100), pobre (100 < ICA <200), muy pobre (200 < ICA <300) y no favorable para el consumo humano (ICA >300).

## Resultados y discusión

### Propiedades fisicoquímicas del agua

La temperatura de las muestras de agua en los puntos de recolección varió entre 14 y 17 °C, con valores de pH que van desde 5.88 hasta 9.15 (desde ligeramente ácidos a alcalinos), con una conductividad eléctrica (CE) desde 73 hasta 860 µS/cm y sólidos totales disueltos (STD) en el intervalo de 78 a 595 mg/L. Los principales parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua del acuífero del Valle de Tulancingo se indican en la tabla 3.

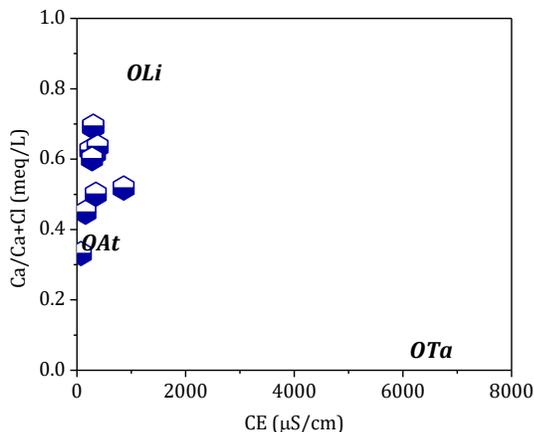
**Tabla 3.** Valores mínimos (Min), máximo (Max), promedio (Prom) y desviación estándar (Des) para los parámetros fisicoquímicos determinados en las muestras del Acuífero del Valle de Tulancingo, Hgo.

PARÁMETROS	Min	Max	Prom	Des
Temperatura (°C)	14.0	17.0	15.30	1.06
pH	5.88	9.15	7.27	0.83
CE (µS/cm)	73.0	860.0	328.40	208.18
STD (mg/L)	78.0	595.0	312.10	135.83
Dureza (mg/L)	10.0	300.0	100.04	79.11
<b>COMPONENTES MAYORES (mg/L)</b>				
Na <sup>+</sup>	7.08	56.10	24.48	14.52
K <sup>+</sup>	2.90	17.67	8.28	4.18
Mg <sup>2+</sup>	0.83	30.94	10.30	7.99
Ca <sup>2+</sup>	2.39	67.39	20.79	17.84
SiO <sub>2</sub> (ac)	47.13	105.70	70.06	20.55
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	0.00	43.28	4.32	13.69
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	28.14	180.56	116.65	54.04
Cl <sup>-</sup>	8.51	111.04	27.63	29.83
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3.13	19.87	16.74	23.31
<b>COMPONENTES TRAZA (mg/L)</b>				
Al <sup>3+</sup>	0.28	1.16	0.43	0.26
Fe <sup>3+</sup>	0.00	0.06	0.006	0.02
As <sup>3+</sup>	0.09	0.40	0.18	0.09
Ag <sup>+</sup>	1.72	1.74	1.72	0.04
Pb <sup>2+</sup>	0.03	0.07	0.05	0.01
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.00	28.15	3.05	8.83
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0.07	3.93	1.20	1.18
%E	-3.67	4.06	-1.13	2.74

Respecto de la composición química del agua, se observó que los cationes dominantes del sistema son Ca<sup>2+</sup> y Na<sup>+</sup>, en tanto que las concentraciones de HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Cl<sup>-</sup> fueron superiores al resto de los aniones. Destaca la presencia de SiO<sub>2</sub> acuosa en concentraciones que van desde 47.13 hasta 105.70 mg/L. Aunque los principales componentes traza fueron NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ag<sup>+</sup> y PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>, las concentraciones de Al<sup>3+</sup>, As<sup>3+</sup> y Pb<sup>2+</sup> en la mayoría de las muestras se encuentran por encima de los valores recomendados para agua de consumo humano en la Norma Oficial Mexicana (DOF, 1996) y por la Organización Mundial de la Salud (WHO, 2011). De manera general, los parámetros fisicoquímicos de las muestras de agua respecto de los componentes mayores se encuentran dentro de la clasificación de aguas subterráneas dulces (Griffioen, 2004).

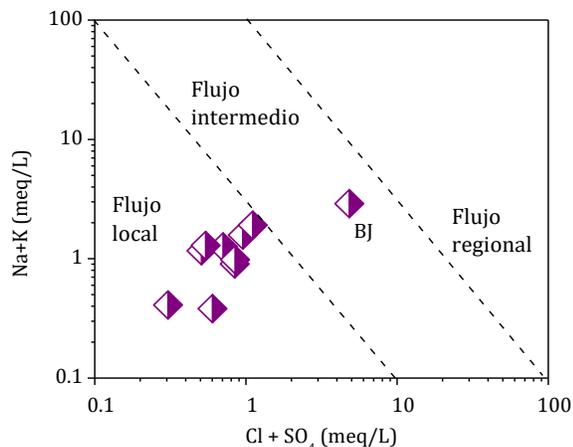
### Características hidroquímicas

La naturaleza del agua en el acuífero del Valle de Tulancingo es principalmente atmosférica-litotrófica, donde la precipitación pluvial y la interacción con las unidades litológicas definen su comportamiento químico, tal y como se puede apreciar en la figura 2, donde se han correlacionado las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$  con la conductividad eléctrica en el diagrama de van Wirdum (1980).



**Figura 2.** Clasificación de las muestras de agua en el diagrama de van Wirdum (1980). **At** corresponde a agua atmosférica, **Li** litotrófica y **Ta** talasotrófica.

La correlación entre las concentraciones de  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+)$  y  $(\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-})$  permitió establecer el tipo de flujo que domina en el acuífero empleando el diagrama de Miffilin (1968). De manera general las muestras corresponden a un sistema de flujo local, con excepción de la muestra del pozo Benito Juárez (BJ) que se ubica en la región de flujo intermedio (Figura 3).



**Figura 3.** Diagrama de Miffilin (1968) empleado para definir el tipo de flujo en el acuífero.

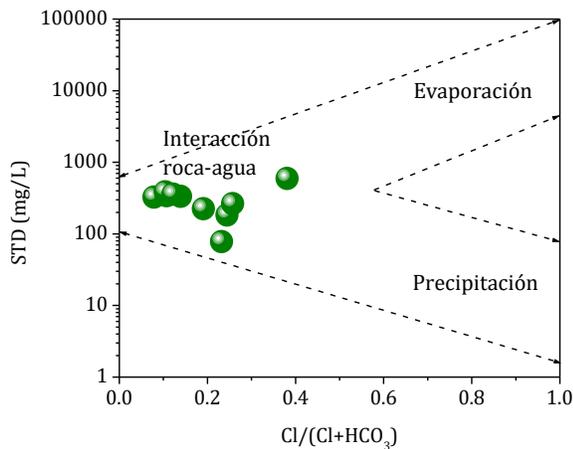
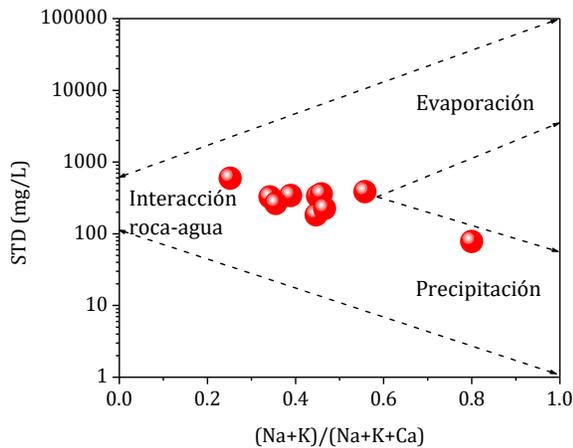
El flujo local implica que las aguas presentan una menor evolución química y se relacionan con aguas subterráneas recientes dominadas por bicarbonato de calcio y magnesio, mientras que aquellas con mayor tiempo de residencia (flujos regionales) tienden a enriquecerse con cloruros. Los flujos intermedios o de evolución química intermedia presentan características intermedias entre estos dos extremos.

Para definir el mecanismo que controla la química del agua subterránea se utilizó el diagrama de Gibbs (1970), el cual correlaciona la concentración de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Ca}^{2+}$ , así como de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  con los sólidos totales disueltos (STD). De acuerdo a esta representación, la composición química del agua está dominada por la interacción agua-roca, es decir por la disolución, intercambio iónico y precipitación de los minerales de las unidades litológicas que conforman el acuífero (Figura 4).

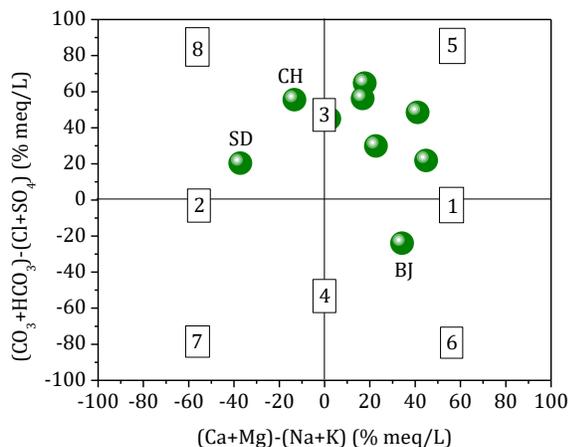
Las facies hidroquímicas determinadas para el grupo de muestras se dividen en tres categorías de acuerdo a su clasificación en el diagrama de Chadha (1999): aguas Ca-Mg- $\text{HCO}_3$  (muestras ACH, MC, PT, Al, ZU, NA y VE), aguas Na-K- $\text{HCO}_3$  (muestras SD y CH) y aguas Ca-Mg- $\text{Cl-SO}_4$  (muestra BJ), siendo mayoritaria la facie Ca-Mg- $\text{HCO}_3$  (figura 5). Las facies bicarbonatadas son congruentes con la naturaleza y tipo de flujo determinado en el acuífero, siendo aguas con una menor evolución química y tiempos de residencia de algunas decenas de años, con un flujo activo de baja salinidad.

La evaluación del índice de saturación de un mineral (IS) permite obtener una aproximación en la identificación de los minerales que interactúan con las aguas subterráneas. El IS se calcula a partir del producto de las actividades iónicas de las especies en solución, así como de la constante del producto de solubilidad (Drever, 1997). Un valor del IS negativo se relaciona con una condición de insaturación del acuífero respecto de una fase propuesta. Para valores de IS positivos se considera que el sistema está sobresaturado con respecto a la fase cristalina y únicamente cuando IS es igual a cero se asume un sistema en equilibrio.

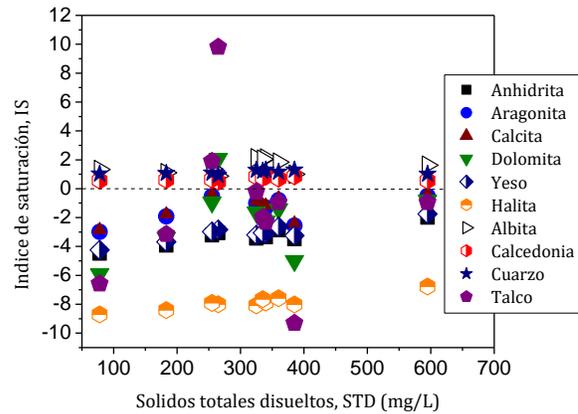
En la figura 6 se han representado los valores del índice de saturación (IS) respecto de los sólidos totales disueltos. Entre los principales minerales que presentan sobresaturación en el sistema se encuentran albita  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , calcedonia  $\text{SiO}_2$ , cuarzo  $\text{SiO}_2$  y eventualmente talco  $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ . Las fases que presentaron insaturación fueron anhidrita  $\text{CaSO}_4$ , aragonita  $\text{CaCO}_3$ , calcita  $\text{CaCO}_3$ , dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , yeso  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  y halita  $\text{NaCl}$ .



**Figura 4.** Mecanismos que definen la composición química del agua de acuerdo al diagrama de Gibbs (1970).



**Figura 5.** Determinación de las facies hidroquímicas en el diagrama de Chadha (1999).



**Figura 6.** Variación del índice de saturación de las principales fases minerales presentes en el acuífero del Valle de Tulancingo respecto de los sólidos totales disueltos.

Siendo las unidades basálticas las principales rocas que confinan el acuífero del Valle de Tulancingo, es probable que las características hidroquímicas del acuífero estén relacionadas con la disolución de las plagioclasas y piroxenos que constituyen los basaltos (Langmuir, 1997). De esta manera, la disolución de plagioclasas como anortita  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$  y albita  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ , así como piroxenos tipo augita  $(\text{Ca, Mg, Fe})_2\text{Si}_2\text{O}_6$  incorporarían al acuífero precipitados de caolinita  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , iones como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ , así como  $\text{SiO}_2$  acuoso (ácido orto silícico,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$ ). La posterior disolución de caolinita daría origen a gibbsita  $\text{Al}(\text{OH})_3$  y  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  adicional, el cual es uno de los componentes más abundantes en el acuífero. Congruentemente, lo anterior explicaría no solo la presencia de las facies hidroquímicas dominantes Ca-Mg- $\text{HCO}_3$  y Na-K- $\text{HCO}_3$ , sino también las elevadas concentraciones de  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  disueltas, así como la presencia de cantidades traza de aluminio y hierro.

### Calidad del agua

La clasificación de las muestras del acuífero del Valle de Tulancingo en el diagrama de Li et al. (2014) permitió establecer que la mayoría corresponde a aguas dulces suaves, sin embargo, la muestra del pozo Benito Juárez (B) se clasificó como agua dulce dura (Figura 7).

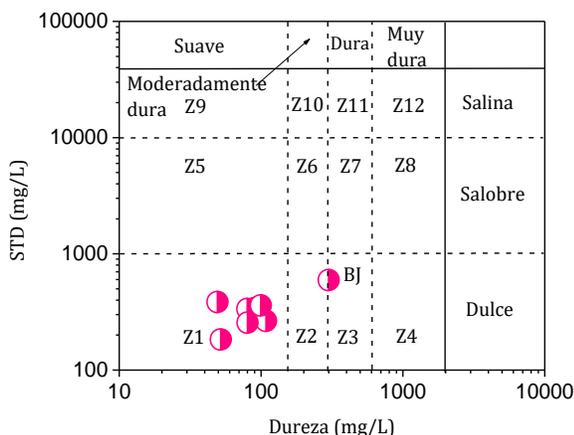


Figura 7. Diagrama de Li et al. (2014) indicando las diferentes clases de agua en relación a su dureza y STD.

De acuerdo con los valores del índice de calidad del agua (ICA) determinados para las muestras, se considera que su calidad varía de excelente a buena para propósitos de consumo humano (Tabla 4).

Tabla 4. Índice de calidad del agua (ICA) para los diferentes sitios seleccionados en el acuífero del Valle de Tulancingo.

No.	Sitio	Clave	ICA	Calidad
1	Pozo Alcoholoya	ACH	22.5207	Excelente
2	Manantial La Cueva	MC	23.4866	Excelente
3	Pozo El Transformador	PT	24.1322	Excelente
4	Manantial Almoloya	AL	16.4708	Excelente
5	Pozo Benito Juárez	BJ	51.8374	Buena
6	Manantial San Dionisio	SD	12.9275	Excelente
7	Pozo Chautenco	CH	22.0766	Excelente
8	Laguna Zupitlán	ZU	23.8351	Excelente
9	Manantial Napateco	NA	27.2968	Excelente
10	Manantial Ventoquipan	VE	21.8440	Excelente

Es importante mencionar que, aunque los valores del ICA para la mayoría de las muestras del acuífero del Valle de Tulancingo son inferiores a 50 (excepto para el pozo Benito Juárez), la presencia de nitratos representaría una perturbación antropogénica. En el acuífero se han detectado bajas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  en las muestras del pozo el Transformador, en el manantial Almoloya, en el pozo Benito Juárez y en el manantial Napateco, sin que se haya observado este componente en el resto de los sitios de muestreo. La distribución de  $\text{NO}_3^-$  en el acuífero del Valle de Tulancingo (Figura 8) indica que la zona de mayor concentración de esta especie se localiza en el

pozo Benito Juárez (28.15 mg/L), análogamente se aprecia este mismo patrón de distribución para los cloruros que alcanzan su máximo en este pozo (Figura 9).

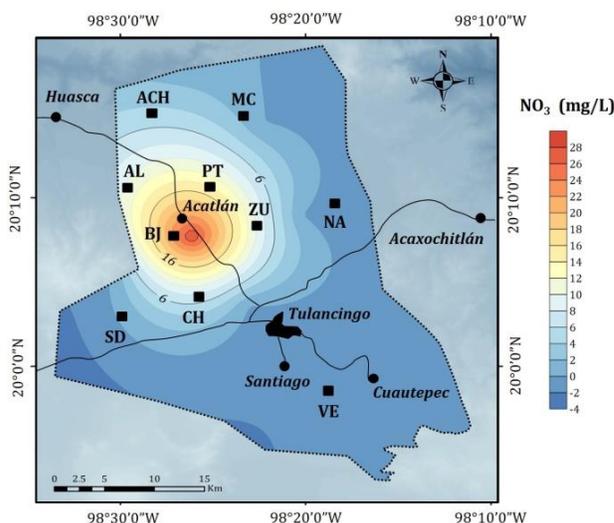


Figura 8. Distribución de  $\text{NO}_3^-$  en el acuífero del Valle de Tulancingo (Surfer®, Golden Software LLC).

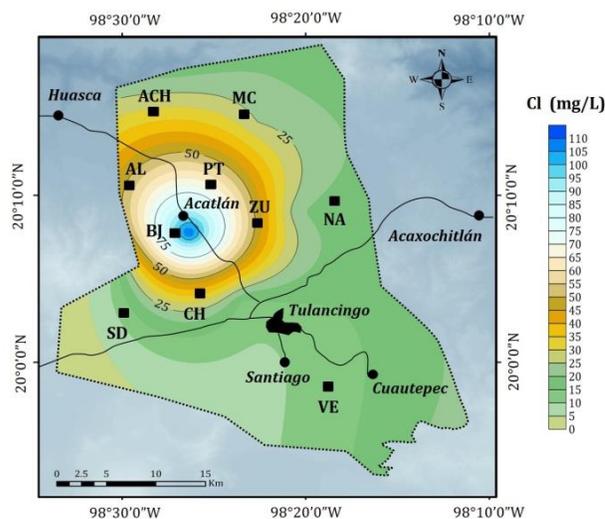


Figura 9. Distribución de  $\text{Cl}^-$  en el acuífero del Valle de Tulancingo (Surfer®, Golden Software LLC).

Los patrones de distribución de nitratos y cloruros en el acuífero coinciden también con los de fosfatos, todos ellos presentan un máximo en el pozo Benito Juárez, en el municipio de Acatlán, de hecho, los sitios con mayores concentraciones de estas especies se localizan en el mismo municipio. Estas anomalías posiblemente están siendo promovidas por un aumento en la industrialización de la región, particularmente por la incorporación de instalaciones para el procesamiento de lácteos y sus derivados.

## Conclusiones

La evaluación hidroquímica del acuífero del Valle de Tulancingo ha permitido establecer que sus características fisicoquímicas están asociadas directamente a la interacción agua-roca, siendo la precipitación pluvial el principal medio de incorporación de agua al sistema. Las facies bicarbonatadas dominantes ( $\text{Ca-Mg-HCO}_3$  y  $\text{Na-K-HCO}_3$ ) son características de tiempos de residencia relativamente cortos con aguas de poca evolución química, en un sistema de flujo dinámico.

La composición química de este acuífero se relaciona directamente con la disolución de las rocas basálticas y particularmente con minerales como plagioclasas y piroxenos, que gradualmente incorporan  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  y elementos traza como  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  (incluso podrían aportar  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ag}^+$  y  $\text{As}^{3+}$  los cuales son comunes en los basaltos). Debido a su baja salinidad, el acuífero se ha clasificado con una calidad de agua para consumo humano que va de buena a excelente como lo indican los valores del índice de calidad del agua.

La presencia de algunos elementos traza como aluminio, hierro, plomo y arsénico, aunque se encuentran en concentraciones ligeramente superiores a los establecidos en las normas de agua para consumo humano, se asumen como una parte de la propia naturaleza del acuífero. Desafortunadamente la presencia de nitratos refleja la incorporación de aguas residuales o descargas no controladas en la región de Acatlán.

Aunque la concentración de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{PO}_4^{3-}$  se encuentra, de manera general, por debajo de las recomendaciones para agua de consumo humano, es importante establecer estrategias de evaluación permanente, mitigación y prevención para evitar una mayor afectación a la principal fuente de agua dulce en los municipios que conforman el Valle de Tulancingo.

## Agradecimientos

A la Q. Verónica García Hernández del Laboratorio de Absorción atómica e ICP del AACTyM por su valioso apoyo en el trabajo analítico.

## Referencias

APHA, American Public Health Association. (1999). Standard methods for the examination of water and wastewater. 20<sup>th</sup> Ed. APHA, AWWA, WEF, p. 1-45

BIS, Bureau of Indian Standards. (2012). Indian standard drinking water specification IS: 10500:2012. New Delhi.

CNA, Comisión Nacional del Agua. (2008). Estadísticas del agua en México. Edición 2008. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 23 de Octubre de 2019. [http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM\\_2008.pdf](http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/EAM_2008.pdf)

CNA, Comisión Nacional del Agua. (2018a). Estadísticas del agua en México. Edición 2018. México: Comisión Nacional del Agua. Recuperado el 30 de Octubre de 2019 de [http://201.116.60.25/publicaciones/EAM\\_2018.pdf](http://201.116.60.25/publicaciones/EAM_2018.pdf)

CNA, Comisión Nacional del Agua. (2018b). 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 Noviembre de 2019. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103066/DR\\_1317.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/103066/DR_1317.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.

del Villar K.E. (2014). Agua, Estudio Hidrológico: Problemática y soluciones en la Cuenca de la región de Tulancingo (Tomo 1). Confederación de Organismos Agropecuarios del Estado de Hidalgo-Universidad Politécnica de Tulancingo, p. 17-25

DOF, Diario Oficial de la Federación. (1996). Modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA-1994, Salud Ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamiento a que debe someterse el agua para su potabilización. México: Secretaría de Salud. Consultado el 7 de Octubre de 2019. <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>

Drever J.I. (1997). The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments. 3<sup>rd</sup> Ed. Prentice Hall, p. 1-13; 24-26.

Gibbs R.J. (1970). Mechanism controlling world water chemistry. *Science*, 170 (3962), 1088-1090.

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*. Paris: UNESCO, p.43-66.

Jasmin I., Mallikarjuna P. (2014). Physicochemical quality evaluation of groundwater and development of drinking water quality index for Araniar River Basin, Tamil Nadu, India. *Environ. Monit. Assess.*, 186, 935-948.

Krishna K.S., Logeshkumaran A., Magesh N.S., Godson P.S., Chandrasekar N. (2015). Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part Chennai City, Tamil Nadu, India. *Appl. Water Sci.*, 5, 335-343.

- Langmuir D. (1997). Aqueous Environmental Geochemistry. 1<sup>st</sup> Ed. Prentice-Hall, p. 231-247.
- 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 20/06/2019 de: [http://www.lessor.com.mx/files/07.1-Tulancingo\\_Lesser.pdf](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.
- Mifflin M.D. (1968). Delineation of groundwater flow systems in Nevada: University of Nevada-Reno, Desert Research Institute, Technical Report Series H-W, Hydrology and Water Resources Publication 4. Nevada: Desert Research Institute, University of Nevada-Reno.
- ONU. Organización de las Naciones Unidas (2015). Agenda 2030 sobre el Desarrollo Sostenible. Organización de las Naciones Unidas. Consultado: 23/11/2019, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2018/06/la-agenda-de-desarrollo-sostenible-necesita-un-impulso-urgente-para-alcanzar-sus-objetivos/>
- Ortega G.F., Mitre S.L.M., Roldán Q. J., Aranda G.J.J., Morán Z.D., Alaniz A.S.A., Nieto S. (1992). Texto explicativo de la quinta edición de la carta geológica de la República Mexicana escala 1:2'000,000. UNAM, Instituto de Geología, SEMIP y COREMI, p. 42
- 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.
- Rodier J., Legube B., Merlet N. (1998). Análisis del agua. Omega S.A., p. 180
- Sadzawka R. A. (2006). Métodos de análisis de aguas para riego. Serie Actas INIA No. 37. Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
- Singh S., Hussian A. (2016). Water quality index development for groundwater quality assessment of Greater Noida sub-basin, Uttar Pradesh, India. *Cogent Engineering*, 3 (1177155), 1-17.
- van Wirdum G. (1980). Description of water-quality changes in a hydrological cycle for the purpose of nature conservation. In J.C. Hooghart (Ed.). Water quality in groundwater-flow systems. The Hague, The Netherlands: Commission for Hydrological Research TNO. Reports and notes 5, p. 118-143
- Weiner E.R. (2013). Applications of environmental aquatic chemistry: a practical guide. 3<sup>rd</sup> Ed. CRS Press, p. 74-94.
- WHO, World Health Organization. (2011). Guidelines for drinking-water quality. 4th Ed. WHO Press, p. 307-442.
- Yta M.J., Galván C.R., Esparza C. (1999). Carta Metalogénica-Geológica-Estructural del Estado de Hidalgo. Consejo de Recursos Minerales, Secretaria de Comercio y Fomento Industrial.