

Análisis iónico de las aguas de seis lagos cráter de la Cuenca Oriental, México

Ionic analysis of the waters of six crater lakes of the Oriental Basin, Mexico

Mario Francisco Santoyo de la Cruz^{1*}, Héctor Manuel Ortega Escobar¹,
Oscar Raúl Mancilla Villa², Carlos Ramírez Ayala¹, Enrique Martínez Villegas¹,
Edgar Iván Sánchez Bernal³

RESUMEN

La Cuenca Oriental de México se localiza, por sus características fisiográficas, en los lagos y volcanes del valle del Anáhuac, que a su vez se encuentra en el Eje Neovolcánico Transversal. Esta cuenca presenta un rasgo característico: seis conos volcánicos cuyo origen fue una explosión freatomagmática. El fondo está ocupado por cuerpos de agua, que reciben el nombre local de axalapascos y que son los lagos-cráter (maars) Alchichica, Quechulac, Atexcac, La Preciosa, Aljojuca y Tecuitlapa. La composición y concentración iónica de las aguas subterráneas en la Cuenca Oriental es definida por los materiales de origen volcánico con los que tiene contacto. La calidad del agua se refiere a su idoneidad para un uso específico, es decir, cumple o no con las necesidades del usuario. En este trabajo se determinaron las concentraciones de los principales iones del agua de seis lagos cráter. Se incluyen estudios de salinidad y sodicidad, hidrogeoquímica, composición iónica y clasificación por iones específicos. Se realizaron muestreos y determinaciones fisicoquímicas de iones del agua. El sodio (Na⁺) y el cloruro (Cl⁻) son los iones más dominantes. Las clasificaciones de la RAS resultantes muestran que estas aguas no son recomendables por la concentración alta del ion sodio, a excepción de los maars Quechulac y Aljojuca que son condicionadas. Se observan tres lagos cráter que se clasifican como aguas bicarbonatadas-sódicas, mientras que las otras tres son cloruradas-sódicas. Se concluye que la mayoría de los lagos cráter presentan alta salinidad y sodicidad y no son adecuados para ningún uso como el agrícola o humano. Los iones específicos tienen concentración baja y media de acuerdo a su clasificación.

Palabras clave: boro, hidroquímica, salinidad, sodicidad.

ABSTRACT

The Oriental basin is located, due to its physiographic characteristics, in the lakes and volcanoes of the Anahuac, which in turn is included in the Transversal Neovolcanic Axis; a characteristic feature is presented, six volcanic cones whose origin is from phreatomagmatic explosion. The bottom is occupied by water, that receives the local name of Axalapascos; These are the crater-lakes (maars) Alchichica, Quechulac, Atexcac, La Preciosa, Aljojuca and Tecuitlapa. The composition and ionic concentration of groundwater in the Oriental basin is defined by the materials of volcanic origin with which it has contact. The quality of the water refers to its suitability for a specific use, that is, how well the quality meets the needs of the user. In this work, the concentrations of the main water ions of six crater lakes were determined. Studies of salinity and sodium, hydrochemistry, ionic composition and classification by specific ions are included. Samples and physicochemical determinations of water ions were carried out. Sodium (Na⁺) and chloride (Cl⁻) are the most dominant ions. The resulting SAR classifications show that they are not recommended due to the high concentration of the sodium ion, with the exception of the Quechulac and Aljojuca maars, which are conditioned. There are three crater lakes that are classified as bicarbonate-sodium, while the other three are chlorinated-sodium. It is concluded that most of the crater lakes have high salinity and sodicity and are not suitable for any use such as agricultural or human. Specific ions have low and medium concentration according to their classification.

Keywords: boron, hydrochemistry, salinity, sodicity.

¹ Colegio de Postgraduados, campus Montecillo, carretera México-Texcoco Km. 36.5, Montecillo, Texcoco C. P. 56230, Estado de México, México.

² Universidad de Guadalajara. CUCSUR. Av. Independencia Nacional #151. C.P. 48900, Autlán, Jalisco, México.

³ Universidad del Mar, carretera Sola de Vega, Puerto Escondido, San Pedro Mixtepec, Juquila. C.P. 71980, Oaxaca, México.

* Autor por correspondencia: santoyo.mario@colpos.mx

Introducción

La Cuenca Oriental se localiza, por sus características fisiográficas, en los lagos y volcanes del valle del Anáhuac, que a su vez se encuentra en el Eje Neovolcánico Transversal. Este sistema es una franja de rocas volcánicas de diversos tipos y texturas, emitidas de manera sucesiva por numerosos volcanes durante el Cenozoico. En la actualidad estas rocas constituyen un extenso bloque superpuesto a las rocas del Mesozoico que atraviesan la república mexicana en dirección este-oeste (Alcocer *et al.*, 2005).

El clima es estepario subhúmedo y semiseco templado con lluvias en verano. Temperatura media anual 12-16 °C. Precipitación total anual 400-800 mm. Los tipos de vegetación son matorral xerófilo, bosques de pino, de encino, de pino-encino, de oyamel, matorral de coníferas, matorral con izotes, vegetación halófila, pastizal natural. Hay comunidades de peces, anfibios, invertebrados (hemípteros, crustáceos y anátidos). Flora característica: *Abies religiosa*, *Pinus hartwegii*, *P. moctezumae*. El lago de Alchichica tiene características ecológicas únicas con un alto grado de endemismos y fisiográficos particulares debido a la presencia de depósitos estromatolíticos producidos por intensa actividad biogénica. En la Cuenca Oriental se presenta un rasgo peculiar: seis conos volcánicos cuyo origen es una explosión freatomagmática que ocasionó fallas y rupturas en los espesores saturados de alumbraamientos de aguas subterráneas. El fondo está ocupado por cuerpos de agua, que reciben el nombre local de axalapascos y que son los lagos-cráter (maars) Alchichica, Quechulac, Atexcac, La Preciosa, Aljojuca y Tecuitlapa. El nivel superficial del agua de estos lagos cráter se encuentra generalmente por debajo del nivel general del suelo y su profundidad es considerable, en muchos casos hasta de más de 100 m. Su borde circundante está construido del material eyectado del cráter mismo y en algunos se encuentra una vegetación constituida por ciperáceas. Son alimentados por aguas de los mantos freáticos derivados de las sierras de Perote y del Pico de Orizaba, así como por la precipitación pluvial directa. Ambas contribuyen a conservar constante su nivel durante todo el año (CONABIO, 2021).

Los lagos cráter no presentan incidencia de aguas residuales. Por lo tanto, la composición y concentración iónica de las aguas subterráneas en

la Cuenca Oriental es definida por los materiales de origen volcánico con los que tiene contacto (Can *et al.*, 2011).

La calidad del agua se refiere a las características de un suministro, que va a influir en su idoneidad para un uso específico, es decir, si cumple con las necesidades del usuario. Mancilla *et al.* (2021) sostienen que dependiendo del tipo y la cantidad de sales que estén presentes en el agua, la calidad del recurso variará de una clasificación a otra. Se debe considerar que las aguas subterráneas de los lagos cráter dependen del contenido de sales y otros iones específicos para clasificarlas en aguas dulces, ligeramente salobres, salobres y salinas, y están estrechamente relacionadas con las diferentes concentraciones en el aspecto químico y mineralógico.

Este trabajo tiene como propósito determinar las concentraciones de los principales iones del agua de los seis lagos cráter. Se incluyen estudios de salinidad y sodicidad, clasificación por toxicidad de iones específicos, así como la clasificación y recomendación de las aguas de acuerdo a la conductividad eléctrica (CE) y la relación de adsorción de sodio (RAS). Además se busca generar conocimiento de la importancia de los lagos cráter y la conservación de estos cuerpos de agua naturales para efectos de paisaje, equilibrio microclimático y conservación de la biodiversidad.

Materiales y métodos

Zona de estudio

Los muestreos se llevaron a cabo en los lagos cráter de Alchichica, Quechulac, Atexcac, La Preciosa, Aljojuca y Tecuitlapa en el estado de Puebla, México. Los puntos de muestreo se pueden observar en la Figura 1.

Muestreo

El muestreo de aguas requiere especial atención, para que la fracción de agua que se analizará no presente cambios químicos, biológicos o contaminación antes de la llegada al laboratorio. Por tal motivo se siguió al pie de la letra la Norma Mexicana NMX-AA-034-SCFI-2015 (Norma Mexicana, 2015), que entre otros aspectos importantes menciona que la cantidad mínima de agua que se necesita es de 0,5 L., la cual se debe almacenar en

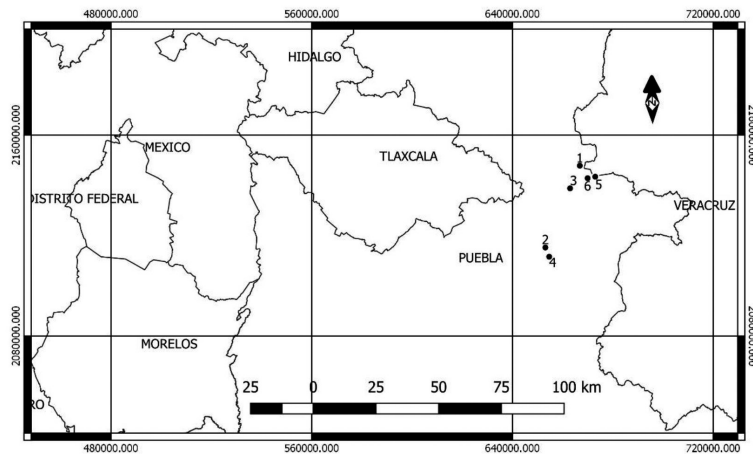


Figura 1. Localización geográfica de los lagos cráter: 1.- Alchichica, 2.- Tecuitlapa, 3.- Atexcac, 4.- Aljojuca 5.- La Preciosa y 6.- Quechulac.

recipientes de plástico, por su resistencia y menor reacción con los iones del agua. El recipiente y su tapón se deben enjuagar 3 veces con el agua que se va a recolectar y cerrarse herméticamente.

Análisis de laboratorio

Los análisis de aguas fueron realizados en el Laboratorio de Ciencias Ambientales del área de Hidrociencias en el Colegio de Postgraduados campus Montecillo: conductividad eléctrica (CE) por conductimetría; sodio y potasio por flamometría; calcio, magnesio, carbonato, bicarbonato, cloruro por volumetría; sulfato por turbidimetría (Clesceri *et al.*, 1998); boro (Bingham, 1982), nitrato (Robarge *et al.*, 1933) y fosfato por espectrometría Rodier (1978).

Balace anión-cation: las aguas son eléctricamente neutrales, por lo que la suma de cationes debe ser igual a la suma de aniones, con un margen de error del dos por ciento.

Con los datos de laboratorio se calculó la salinidad efectiva (SE) (Díaz y Bonilla, 2005); salinidad potencial (SP) (Doneen, 1975); relación de adsorción de sodio (RAS) usada como medida de peligro de sodicidad de agua, cuando se tuviesen condiciones ideales de equilibrio. Se calcularon tres tipos de RAS: RAS explícito, RAS ajustado y RAS^o corregido.

RAS explícito:

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

Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} : corresponde a la concentración ($mEq L^{-1}$).

RAS ajustado:

$$RAS_{aj} = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca + Mg}{2}}} [1 + (8,4 - pHc)] \quad (2)$$

$pHc = (pk'2 - pk'c) + pCa + pAlk$

Donde: $pk'2 - pk'c$ son los logaritmos negativos de segunda constante de disociación del ácido carbónico (H_2CO_3) y la constante de solubilidad del carbonato de calcio ($CaCO_3$), ambos corregidos por su fuerza iónica (I).

pCa : es el logaritmo negativo de la concentración molar de calcio.

$p(Alk)$: corresponde al logaritmo negativo de la concentración equivalente de CO_3^{2-} y HCO_3^-

RAS corregido:

$$RAS^o = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca^o + Mg}{2}}} \quad (3)$$

Ca^o : es la concentración de calcio en el agua, corregida.

Na^+ , Mg^{2+} , HCO_3^-/Ca^{2+} : Concentración expresada en $mEq L^{-1}$.

Con los tres tipos de RAS se clasificaron las aguas de las muestras de acuerdo a su CE (Richards, 1982). La clasificación hidrogeoquímica se realizó mediante la elaboración del diagrama

de Piper (Piper, 1944) para la identificación de los principales procesos geoquímicos. La toxicidad por iones específicos: boro, nitrato y fosfato se clasificó en bajo, medio y elevado de acuerdo a su concentración en mg L^{-1} .

Resultados y discusión

Conocer la composición iónica de las aguas es importante porque el exceso de sodio, carbonatos, bicarbonatos y cloruros aumentará el pH, la conductividad eléctrica y el porcentaje de sodio intercambiable del suelo. En la Tabla 1 se aprecian las composiciones iónicas de las aguas.

En la composición iónica de las aguas predominan los iones sodio (Na^+), cloruro (Cl^-) y bicarbonato (HCO_3^-). Con base en que las rocas volcánicas están constituidas principalmente por minerales silicatados, los cuales en la mayoría de los casos son insolubles, se puede decir que las aguas que se almacenan en esta zona de estudio son de concentraciones iónicas altas.

Los maars Atexcac y Alchichica presentan los valores más elevados de bicarbonato (HCO_3^-) 26,84 y 25,96 mEq L^{-1} . Esto pudiera explicarse porque en las regiones volcánicas, como lo es gran parte del estado de Puebla, Tlaxcala y Veracruz, el bióxido de carbono (CO_2) se mezcla con el agua y forma aguas ricas en iones bicarbonato (HCO_3^-). La característica principal es la presencia de escurrimientos que fluyen a través de los cursos de agua. Una gran cantidad de anhídrido carbónico (CO_2^{2-}) es arrojada a la atmósfera por la actividad volcánica, y destruye las rocas eruptivas, extrayendo los metales. Al combinarse con el calcio y el magnesio se acumula como caliza y dolomita.

El CO_3^{2-} es proveniente del lavado de rocas calizas, en el que parte del CO_3^{2-} pasa al agua generando condiciones de alcalinidad. Cuando

el pH es menor de 8,2 no hay presencia de CO_3^{2-} (Richards, 1982). Una comparación de la especiación de los cationes indica en general que estos forman pares iónicos en el siguiente orden: $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{H}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+$, siendo este último el que menos se acompleja. Respecto a los aniones se sigue el orden CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Cl^- . El porcentaje de iones libres varía drásticamente en los aniones, principalmente con los iones carbonato y sulfato.

La concentración de los cationes, en los maars, sigue el orden: $\text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$, y con respecto a los aniones, para los lagos cráter de Alchichica, Atexcac y La Preciosa, por lo general siguen el orden de: $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$. Para los lagos cráter Quechulac, Aljojuca y Tecuitlapa el orden es: $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{CO}_3^{2-} > \text{SO}_4^{2-}$. Los iones más abundantes de los lagos cráter son Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y HCO_3^- . Esta composición química se asemeja a la del agua de mar, donde los iones más abundantes son Na^+ , Mg^{2+} , Cl^- y SO_4^{2-} (Millero, 1975).

La concentración de sodio en el lago cráter Atexcac es de 84,31 mEq L^{-1} y Alchichica 90,99 mEq L^{-1} . El contenido máximo de potasio se encuentra en 8,31 L^{-1} . Poulsen *et al.* (2006) indican que las aguas en contacto con rocas evaporíticas contienen concentraciones elevadas de sodio y potasio solo si estos elementos están presentes fundamentalmente como cloruro de sodio, silvina (KCl) o carnalita ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales arcillosos con alta capacidad de intercambio iónico. Altas concentraciones de estos iones pueden ser indicio de infiltración de contaminantes por aguas residuales y agrícolas, considerando también las vías evolutivas geoquímicas que adquieren las aguas durante el proceso de evaporación.

Tabla 1. Composición y distribución iónica de las aguas de los lagos cráter.

Maar	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Σ	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Σ	% Error
		μS cm ⁻¹	mEq L ⁻¹										
Tecuitlapa	9,7	6000	0,02	0,68	54,75	3,22	58,67	6,98	21,18	24,12	4,84	57,12	1.34
Atexcac	8,6	13000	0,86	32,96	84,31	7,76	125,89	16,26	26,84	67,02	12,52	122,64	1.31
Aljojuca	9,1	1424	0,04	0,18	13,05	0,52	13,79	1,62	5,98	4,96	0,79	13,41	1.40
Quechulac	8,7	961	0,87	0,96	7,13	0,36	9,31	1,86	3,06	3,47	0,62	9,01	1.64
La Preciosa	8,7	2472	0,32	0,48	22,45	0,69	23,94	2,24	11,02	8,58	1,46	23,3	1.35
Alchichica	8,9	14000	1,1	36,5	90,99	8,32	136,91	18,14	25,96	70,97	18,2	133,27	1.35

CE: Conductividad Eléctrica. pH: medida del agua; Ca²⁺: Calcio; Mg²⁺: Magnesio; Na⁺: Sodio; K⁺: Potasio; CO₃²⁻: Carbonato; HCO₃⁻: Bicarbonato; Cl⁻: Cloruro y SO₄²⁻: Sulfato.

En la zona de estudio los materiales geológicos en equilibrio con las aguas son de origen volcánico, y en condiciones de elevada evapotranspiración, tienden a precipitar el calcio (con la formación de CO_3^{2-} , dando lugar a CaCO_3), por lo que el sodio se vuelve dominante. Se forman entonces aguas alcalino-sódicas que son características de climas áridos en zonas volcánicas.

La variabilidad en resultados se puede deber a diferencias en la cantidad y tipo de arcillas, material volcánico y también al tipo de aniones acompañantes y a la solubilidad de compuestos presentes en los suelos, sin que puedan descartarse efectos del clima. Cuando las aguas de los cauces fluviales de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz son utilizadas para riego, alcanzan un equilibrio con los cationes adsorbidos de los sistemas coloidales de los suelos.

Valoraciones de la calidad del agua. Las correlaciones significativas entre CE, SE y SP, lo mismo que con la concentración de Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ , permiten hacer una estimación de dichos valores a partir de la CE del agua (Cortez, 2009). La salinidad efectiva mide el efecto de las sales solubles cuando pasan a formar parte de la solución del suelo. En la Tabla 2 se muestran las valoraciones de la salinidad efectiva y la salinidad potencial.

La salinidad efectiva es el indicador más intenso cuando el agua tiene mayor contenido de bicarbonatos (HCO_3^-) y carbonatos (CO_3^{2-}). En las aguas de los lagos cráter, 4 muestras son no aceptables y 2 son condicionadas. Los maars Atexcac y Alchichica tienen la SE con más intensidad. En el caso del riego agrícola, no serían adecuadas. No obstante, sí son adecuadas para albergar especies de organismos y generar microclimas, además de belleza paisajística.

Así mismo, se puede apreciar que 3 muestras se encuentran en el rango de salinidad potencial

15>, por lo que según el método se clasifican como aguas de elevada salinidad, y 3 muestras son de clasificación condicionada, por lo que debe mantenerse control sobre el comportamiento químico del suelo. El peligro de salinidad por cloruros en el agua no puede predecirse en forma general y debe determinarse para un suelo y una especie vegetal en específico. Por lo tanto, este índice debe ser verificado para especies y suelos dados de la misma forma que para suelos de baja permeabilidad.

Relación de adsorción de sodio y la conductividad eléctrica. Las clasificaciones con respecto a la relación de adsorción de sodio (explícito, ajustado y corregido) y la conductividad eléctrica se muestran en la Tabla 3. Presentan en su mayor parte la clasificación S4-C4 y S4-C3.

No existen diferencias significativas entre RAS_{aj} y RAS° . Debido a la concentración de iones, las aguas bicarbonatadas modifican los valores de RAS, causado por los procesos de hidrólisis y precipitación de (CO_2) para dar ácido carbónico (equilibrio carbónico-carbonatos). A partir del (H_2CO_3) se forman primero bicarbonatos (pH más alcalino superior a 7) y posteriormente (CO_3^{2-}), por lo tanto, en el caso de RAS° pudiera ser la mejor opción de evaluación (Velásquez *et al.*, 2002).

Las clasificaciones resultantes muestran que son aguas con contenido muy elevado de sodio, a excepción de los maars Quechulac y Aljojuca que son de clasificación condicionada.

Se observan tres lagos cráter cuyas aguas se clasifican como bicarbonatadas-sódicas, mientras que las otras tres son cloruradas-sódicas. Según Mancilla *et al.* (2014), las aguas superficiales de baja concentración de los estados de Tlaxcala, Puebla y Veracruz poseen cantidades prevalecientes de bicarbonato. La concentración de HCO_3^- es de 1,2 a 6,4 $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$. Las aguas de Tlaxcala y

Tabla 2. Valoraciones de SE y SP.

Maar	SE	Valoración	SP	Valoración
Tecuítlapa	57,97	No Recomendable	26,54	No Recomendable
Atexcac	92,07	No Recomendable	73,28	No Recomendable
Aljojuca	13,57	Condicionada	5,36	Condicionada
Quechulac	7,48	Condicionada	3,78	Condicionada
Preciosa	23,14	No Recomendable	9,31	Condicionada
Alchichica	99,31	No Recomendable	80,07	No Recomendable

SE: Salinidad Efectiva y SP: Salinidad Potencial.

Tabla 3. Clasificaciones de las aguas considerando el tipo de la RAS y CE.

Maar	RAS	Tipo	RASaj	Tipo	RAS°	Tipo
Tecuitlapa	92,54	S4-C4	32,7	S4-C4	79,02	S4-C4
Atexcac	20,5	S4-C4	42,01	S4-C4	20,68	S4-C4
Aljojuca	39,34	S4-C3	10,84	S2-C3	27,21	S4-C3
Quechulac	7,45	S1-C3	10,94	S2-C3	7,39	S1-C3
Preciosa	35,49	S4-C4	48,13	S4-C4	36,41	S4-C4
Alchichica	20,98	S4-C4	45,16	S4-C4	21,19	S4-C4

RAS: Relación de Adsorción de Sodio; RASaj: Relación de Adsorción de Sodio ajustado y RAS°: Relación de Adsorción de Sodio corregido. CE: Conductividad Eléctrica. C1: <250 mS cm⁻¹; C2: 250-750 mS cm⁻¹; C3: 750-2250 mS cm⁻¹; C4: > 2250 mS cm⁻¹; S1: agua baja en sodio; S2: agua media en sodio; S3: agua alta en sodio y S4: agua muy alta en sodio.

parcialmente de Puebla presentan concentraciones moderadas de bicarbonato, que se deben al intemperismo de rocas sedimentarias, lutitas, tobas y espesores basálticos y riolíticos de regiones del Eje Neovolcánico.

La hidroquímica en el diagrama triangular de Piper (1944) es ideal para representar seis componentes: Ca²⁺, Mg²⁺ y (Na⁺+K⁺), (CO₃⁻² + HCO₃⁻), Cl⁻ y SO₄⁻². Cuando se hacen las gráficas, se pueden analizar claramente las clasificaciones y es una de sus mayores ventajas. En la Figura 2 y en la Tabla 4 se presentan las clasificaciones. Se observan tres lagos cráter cuyas aguas se clasifican como bicarbonatadas-sódicas, mientras que las otras tres son cloruradas-sódicas. La existencia de carbonatos y bicarbonatos está relacionada con la residencia de sus aguas subterráneas por largo tiempo, lo que ha provocado una amplia disolución de rocas calizas que origina altas concentraciones de calcio, y esto las convierte en aguas poco útiles para actividades antropogénicas. La presencia de aguas cloruradas-sódicas de los lagos cráter se traduce en variaciones químicas, físicas y

biológicas. El aumento de la salinidad excede la capacidad de solubilidad de estas sales, las cuales precipitan, alterando la composición iónica de las soluciones remanentes (Jiménez y Marín, 2005).

En el trabajo de Mancilla *et al.* (2014) se concluye que los lagos cráter Alchichica y Atexcac son altamente sódicos prevaleciendo la sal (NaCl), sulfato de sodio (Na₂SO₄) y carbonato de sodio (Na₂CO₃). Semejantes resultados se encontraron en este estudio con 84,31 y 90,99 mEq L⁻¹ respectivamente para el ion sodio.

La hidroquímica de las aguas subterráneas de estos lagos cráter se encuentra en equilibrio debido a la evapotranspiración que se lleva a cabo. Sin embargo, el volumen de agua disminuye cada año poniendo en riesgo su permanencia (Jiménez y Marín, 2005).

Tabla 4. Clasificación hidroquímica de las aguas de los lagos cráter.

Maar	Clasificación
Tecuitlapa	Clorurada-Sódica.
Atexcac	Clorurada-Sódica.
Aljojuca	Bicarbonatada-Sódica.
Quechulac	Bicarbonatada-Sódica.
Preciosa	Bicarbonatada-Sódica.
Alchichica	Clorurada-Sódica.

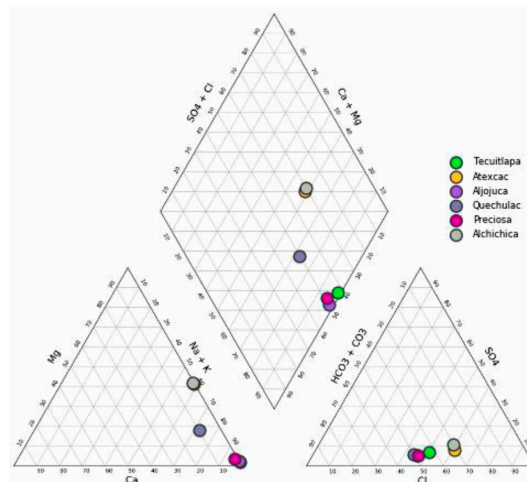


Figura 2. Diagrama de Piper de las aguas de los lagos cráter.

Toxicidad por iones específicos. En la Figura 3 se presentan las concentraciones de los iones boro, nitratos y fosfatos de los seis lagos cráter y en la Tabla 5 se muestran las clasificaciones de los iones específicos.

Las concentraciones de boro en las muestras de agua de Aljojuca y Quechulac presentaron 1,61 y 1,98 mg L⁻¹ respectivamente, clasificadas como contracción media siendo las que tienen menores niveles, mientras que las de Atexcac y Alchichica 77 y 56 mg L⁻¹ respectivamente, clasificadas como no recomendables ya que se encuentran en niveles muy elevados. El boro de los lagos cráter interacciona poco con el medio y ayuda a definir la evolución del agua subterránea en la región (Sandoval *et al.*, 2016).

Mancilla *et al.* (2014) mencionan que se han encontrado cantidades aceptables de boro en esta zona de la Cuenca Oriental, pero las aguas de los pozos profundos en algunas áreas contienen cantidades elevadas debido al contacto que tienen con las rocas ígneas como tobas. Estos mismos autores hallaron concentraciones elevadas en el lago cráter de Alchichica de 40-42 mg L⁻¹ en época de estiaje.

El boro en concentraciones menores de 1,0 mg L⁻¹ es esencial para el desarrollo de las plantas, pero en altas concentraciones este ion puede provocar problemas en plantas sensibles. La mayoría de las plantas pueden tener problemas de toxicidad cuando la concentración de boro aumenta más de 2,0 mg L⁻¹. Los efectos tóxicos pueden presentarse si la concentración en aguas de riego es superior a 1000 µg L⁻¹ (Velázquez

Tabla 5. Clasificación de iones específicos de acuerdo a su concentración en mg L⁻¹.

Maar	Boro	Nitrato	Fosfato
	Clasificación		
Tecuitlapa	Elevado	Bajo	Bajo
Atexcac	Elevado	Bajo	Bajo
Aljojuca	Medio	Medio	Bajo
Quechulac	Medio	Medio	Bajo
La Preciosa	Elevado	Medio	Bajo
Alchichica	Elevado	Bajo	Bajo

et al., 2011). El ion nitrato se encuentra en bajas concentraciones en tres lagos cráter (<5 mg L⁻¹), con más presencia en Aljojuca (16 mg L⁻¹), Quechulac (9 mg L⁻¹) y La Preciosa (8 mg L⁻¹) condicionadas como ligero medio. Según lo señalado por Abate *et al.* (2014), los bajos y medios niveles de nitrato están relacionados con los periodos de lluvia estacional, por lo que se observan menos concentraciones en la temporada seca y más en la temporada de lluvias. Además el viento influye en los aumentos de nitrato que puede traer este ion desde las parcelas de cultivo de la cuenca hasta la superficie del cuerpo de agua. Estos mismos autores encontraron concentraciones de nitrato de 17 a 300 mg m⁻³ de octubre del 2017 a enero del 2008 en el lago cráter de Hora Kilole en Etiopía.

En cuanto al ion fosfato, se hallaron escasas concentraciones menores de 0,25 mg L⁻¹ en todas las muestras analizadas, por lo que de acuerdo a Ayers y Westcot (1989), son aceptables. Abate *et al.* (2014) observaron concentraciones muy bajas de

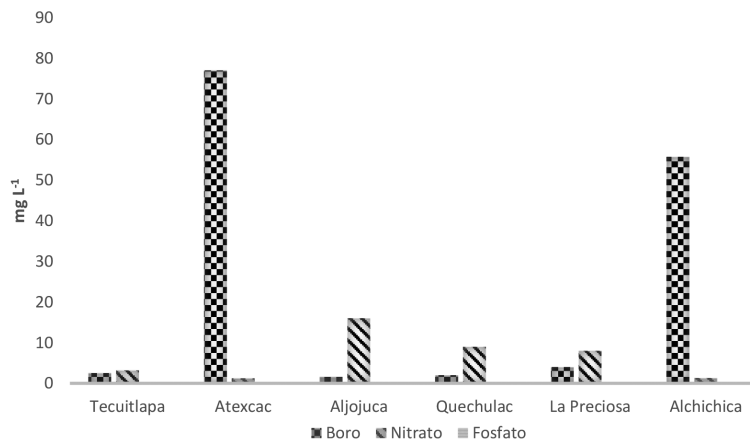


Figura 3. Concentraciones de los iones específicos de los seis lagos cráter.

fosfato en el lago cráter de Hora Kilole en Etiopía, mientras que Borul (2012) encontró niveles bajos y elevados de fosfato de 0,12 a 0,82 mg L⁻¹ en el lago cráter de Lonar en India.

Los resultados de este trabajo sugieren que los niveles de concentración de fosfato son bajos debido a los escurrimientos de agua que contienen niveles bajos de fosfato provenientes de rocas fosfatadas y que no están en abundancia en el lago cráter. También se explica, según Pérez *et al.* (2019), por las nulas descargas de aguas residuales domésticas, industriales o agrícolas.

Conclusión

Los iones predominantes de los lagos cráter de la Cuenca Oriental son sodio (Na⁺), cloruro (Cl⁻) y bicarbonato (HCO₃⁻). La explicación es la permanencia de las rocas volcánicas de materiales minerales silicatados, además de que no existe contaminación en los lagos por aguas residuales. En el caso de los lagos cráter de Atexcac y Alchichica se encontraron las concentraciones más elevadas de bicarbonato (HCO₃⁻) 26,84 y 25,96 mEq L⁻¹. El fundamento es el bióxido de carbono (CO₂) de la zona mezclado con el agua que da lugar a la formación de bicarbonato (HCO₃⁻).

Tres muestras presentan concentración elevada dentro de la clasificación de SP (15>) y el resto son condicionadas. La SE es un indicador intenso cuando hay gran concentración de iones

bicarbonato y carbonato. Los maars de Atexcac y Alchichica muestran elevada SE y su clasificación es no adecuada.

Las clasificaciones de la RAS y CE son S4-C4 y S4-C3 (CE elevada y RAS elevado) en la mayoría de los casos analizados, debido a que los lagos cráter presentan alta concentración del ion sodio, mientras que las muestras de Quechulac y Aljojuca son de calidad condicionada.

La clasificación de acuerdo al diagrama de Piper (1944) presentó tres lagos cráter como aguas bicarbonatadas-sódicas y tres cloruradas-sódicas. Se asume que es por depósitos de sales en los lagos cráter como el cloruro de sodio, sulfato de sodio y carbonato de sodio.

Las concentraciones de los iones específicos analizados muestran concentraciones bajas, medias y elevadas. Por ejemplo, los fosfatos son bajos en todos los casos, los nitratos tienen concentración baja y media y el boro de media a elevada concentración, debido a las condiciones climáticas, biológicas y geológicas de los lagos cráter.

El estudio iónico de las aguas permite conocer las concentraciones en que se encuentran los lagos cráter, ya que el tiempo puede modificar su composición por diversos factores, entre los más importantes el antropogénico, e incluso llevarlos a la desecación. En consecuencia, es importante la conservación, preservación y estudio de estos cuerpos de agua por su belleza paisajística y por el microclima presente.

Literatura citada

- Abate, R.; Kifle, D.; Lenma, B. & Gao Y.H.
2014. Phytoplankton community and physico-chemical seasonality and changes in Lake Hora-Kilole, Ethiopia, a tropical crater lake. *African Journal of Aquatic Science*. (39)1: 97-108.
- Alcocer, D.J.; F.O.A., Escolero & S.L.E. Marín.
2005. Problemática del agua de la Cuenca Oriental, estados de Puebla, Veracruz y Tlaxcala. En: B. Jiménez y L. Marín (eds.). El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. México, D.F. 57-77 pp.
- Ayers R.S. & Westcot D.W.
1989. La calidad del agua y su uso en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje 29 Rev. 1. Trad. Al español por J.F. Alfaro (Water Quality and use in agriculture). FAO, Roma, Italia. 174 pp.
- Bingham, F.T.
1982. Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties, agronomy monograph N° 9. (2nd Ed) 431-447 pp.
- Borul, S.B.
2012. Study of water quality of Lonar lake. *Journal of Chemical and Pharmaceutical research*. 4(3): 1716-1718.
- Can, C.A.; Ortega, E.H.M.; García, C.N.E.; Reyes, O.A.L.; González, H.V.A. y Flores, R.D.
2011. Origen y calidad del agua subterránea en la cuenca Oriental de México. *Terra Latinoamericana*. (29): 2. Pp. 189-200.
- Clesceri, L.S.; A.E., Greenberg & A.D., Eaton.
1998. Estandar methods for examination of water and wastewater. 20 ed. American Public Health Association (APHA), American Water Works Association. Water Pollution Control Federation. Washington, D.C. U.S.A. 1325 pp.
- CONABIO
(Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad) http://www.conabio.gob.mx/conocimiento/regionalizacion/doctos/rhp_070.html (Consultado el 20 de febrero de 2021).

- Cortés, J.J.M.; D.E., Troyo; A.B., Murillo & H.J.L., García.
2009. Índices de calidad del agua del acuífero del valle del Yaqui, Sonora. *Terra Latinoamericana*. 27: 2.
- Díaz, P. y N. Bonilla.
2005. Calidad del agua de la presa Manuel Ávila Camacho utilizada para el riego de los cultivos en el distrito de riego 030 de Valsequillo. Departamento de Agroecología y Ambiente. Instituto de Ciencias de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla (BUAP).
- Doneen, L.D.
1975. Water quality for irrigated Agricultural. In: A. Poljakoff, Mayber A., and J. Gale (Eds.). *Plant in saline environments*. Springer-Verlang. New York. U.S.A.
- Jiménez, B. y L., Marín.
2005. El agua en México vista desde la academia. Academia Mexicana de Ciencias. D.R. ISBN. 968-7428-22-8.
- Mancilla, V.O.R.; Bautista, O.A.L.; Ortega, E.H.M.; Ramírez, A.C.; Reyes, O.A.L.; Flores, M.H.; González, E.D.R. y Guevara, G.R.D.
2014. Contenido de boro en el agua superficial de Puebla, Tlaxcala y Veracruz. *Tecnología y Ciencias del Agua*. 5: 97-109.
- Mancilla, V.O.R.; Anzaldo, C.B.N.; Guevara, G.R.; Hernández, V.O.; Palomera, G.C.; Figueroa, G.Y.; Ortega, E.H.M.; Flores, M.H.; Can, C.A.; Cruz, C.E.; Sánchez, B.E.I.; Olguín, L.J.L.; Mendoza, S.I.
2021. Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, México. *Terra Latinoamericana*, (39), e745.
- Millero, F.J.
1975. Seawater as multicomponent electrolyte solution. The sea Vol. 5Ch.1, En: E.D. Golberg (ed.), Jhon Wiley and Sons, New York. USA.380 p.
- Pérez, D.J.P.; Ortega, E.H.M.; Ramírez, A.C.; Flores, M.H.; Sánchez, B.E.I.; Can, C.A. y Mancilla, V.O.R.
2019. Concentración de nitrato, fosfato, boro y cloruro en el agua del río Lerma. *Ecosistemas y recursos naturales agropecuarios*. 6(16): 175-182.
- Piper, A.M.
1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analysis. American Geophysical Union. 25: 914-923.
- Norma Oficial Mexicana.
2015. NOMX-AA-034-SCFI-2015. Análisis de agua - medición de sólidos y sales disueltas en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Diario Oficial de la Federación.
- Poulsen, D.L.; C.T., Simmons & J.W. Cox.
2006. Assessing catchment-scale spatial and temporal patterns of groundwater and stream salinity. *Hydrogeology Journal*. 14(7): 1339-1359.
- Richards, L.A.
1982. Suelos Salinos y Sódicos. Personal del Laboratorio de Salinidad de los Estados Unidos de América. Ed. Limusa. México. 172 pp.
- Sandoval, M.C.; L.A., Ramos y R.J., Morán.
2016. El sistema hidrológico Esperanza-Oriental y su impacto sobre el acuífero de Tecamachalco, Puebla, México. *Revista Internacional de Estadística y Geografía*. 7(2): 14-25.
- Robarge, W.P.; A., Edwards y B., Jhonson.
1933. Water and waste water analysis for nitrate via nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 14(12): 1207-1215.
- Rodier, J.
1978. Análisis de las aguas. Ediciones Omega. Barcelona, España. Pp. 186-191.
- Velázquez, M.M., E.H, M. Ortega, A. G. Martínez, J.S. Kohashi y N.C. García.
2002. Relación funcional PSI-RAS en las aguas residuales y suelos del valle del Mezquital, Hidalgo. México. *Terra Latinoamericana*. 20: 459-464 pp.
- Velázquez, M.A.; Pimentel, J.L. y Ortega, E.H.M.
2011. Estudio de la distribución de boro en fuentes de agua de la cuenca del río Duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado. *Revista internacional de contaminación ambiental*. (27): 1. Pp. 19-30.

