



# **UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

Maestría en Geociencias y Planificación del Territorio

**“Evaluación de la relación química de manantiales y pozos adyacentes al campo geotérmico de Los Humeros, Puebla con el yacimiento geotérmico”**

**TESIS**

Que para obtener el grado de

**MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO**

Presenta

**I.Q. Pedro Alfaro Cuevas Villanueva**

Directores de Tesis:

Dr. Jorge Alejandro Ávila Olivera

Dr. Raúl Cortés Martínez

Morelia Michoacán, febrero 2019



**Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por el apoyo económico brindado por medio de una beca con el número de becario 822994.**

**Dedico este trabajo a mi esposa Flavia y a nuestro  
hermoso hijo Santiago.**

## AGRADECIMIENTOS

A mi esposa Flavia por apoyarme y ayudarme siempre, y por ser una excelente Mamá para Santiago, los amo.

A mi Mamá que siempre me ha apoyado en todo, agradezco su ejemplo de superación.

A mi hermana la Dra. Ruth que me ha ayudado en todo momento antes y después de este trabajo.

A la Dra. Isabel y Dr. Garduño por invitarme a cursar la Maestría, por su apoyo, sus enseñanzas y su amistad.

Al Doctores Alejandro y Ángel que durante mi estancia en la Maestría me ayudaron, me enseñaron y corrigieron; gracias también por su amistad.

Al Doctor Raúl que me ayudó y orientó en la elaboración de este trabajo.

Al Doctor Otoniel que me ayudó en este trabajo.

A mis amigos de generación que con ellos todo fue más ameno y divertido.

y GRACIAS en especial a mi Papá, el Dr. Alfaro que fue y es mi ejemplo a seguir, un beso hasta el cielo.

## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS .....	i
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ii
ELEMENTOS Y COMPUESTOS QUÍMICOS .....	iv
RESUMEN .....	1
ABSTRACT .....	2
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>3</b>
1.1 Justificación .....	5
1.2 Hipótesis .....	5
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo general .....	5
1.3.2 Objetivos particulares .....	5
1.4 Antecedentes.....	6
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>8</b>
2.1 Generalidades .....	8
2.1.1 El agua .....	8
2.1.2 Disponibilidad del agua .....	8
2.1.3 Calidad del agua .....	8
2.1.3.1 Clasificación de los tipos de agua.....	9
2.1.4 Contaminación del agua .....	9
2.1.4.1 Contaminación del agua subterránea.....	10
2.1.4.2 Contaminación por metales pesados .....	10
2.1.5 Parámetros fisicoquímicos.....	11
2.1.6 Especiación química.....	11

<b>CAPÍTULO III. ÁREA DE ESTUDIO</b> .....	12
3.1 Localización.....	12
3.2 Descripción.....	13
3.3 Geomorfología.....	15
3.4 Geología .....	15
3.5 Hidrología.....	19
3.6 Clima .....	19
<b>CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA</b> .....	20
4.1 Selección de los sitios de estudio .....	20
4.2 Colecta de muestras .....	21
4.3 Análisis de parámetros .....	22
4.4 Tipo de agua en la zona de estudio.....	23
4.5 Isótopos estables .....	24
<b>CAPÍTULO V. RESULTADOS</b> .....	26
5.1 Análisis de parámetros .....	26
5.1.1 Parámetros <i>in situ</i> .....	26
5.1.2 Parámetros fisicoquímicos.....	29
5.1.2.1 Componentes mayores.....	32
5.1.3 Metales pesados.....	40
5.1.4 Especiación química.....	44
5.1.5 Tipo de agua en la zona de estudio.....	49
5.1.6 Isótopos estables .....	50
5.1.7 Hidrogeoquímica .....	52
<b>CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b> .....	58
6.1 Discusión .....	58
6.2 Conclusiones.....	60

<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	61
<b>ANEXOS</b> .....	70
ANEXO 1. Localización de los sitios de muestreo .....	70
ANEXO 2. Valores de parámetros fisicoquímicos.....	71
ANEXO 3. Concentraciones de elementos traza.....	72
ANEXO 4. Diagramas Stiff.....	75
ANEXO 5. Técnica de determinación de dureza total .....	81
ANEXO 6. Cálculo de $\text{HCO}_3^-$ y $\text{CO}_3^-$ .....	84
ANEXO 7. Técnica de determinación del ion sulfato .....	84
ANEXO 8. Técnica de determinación de cloruros totales.....	86

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Unidades geológicas superficiales presentes en los sitios de muestreo .....	18
Tabla 2. Localización de los sitios de muestreo .....	20
Tabla 3. Equipo requerido para realizar las determinaciones de campo y laboratorio.....	22
Tabla 4. Resultados de parámetros fisicoquímicos .....	26
Tabla 5. Concentración de cationes .....	32
Tabla 6. Concentración de aniones.....	33
Tabla 7. Concentración de elementos traza ( $\mu\text{g/L}$ ) .....	40
Tabla 8. Resultados de isótopos estables de los sitios muestreados.....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización de la zona de estudio.....	12
Figura 2. Mapa de la zona de estudio .....	14
Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio. ....	17
Figura 4. Temperatura (°C) de agua de los sitios muestreados .....	27
Figura 5. pH de los sitios muestreados .....	27
Figura 6. Oxígeno disuelto (mg/L) de los sitios muestreados .....	28
Figura 7. Conductividad eléctrica (µS/cm) de los sitios muestreados.....	29
Figura 8. Alcalinidad (meq/L) de los sitios muestreados .....	30
Figura 9. Sólidos totales disueltos (mg/L) de los sitios muestreados .....	30
Figura 10. Relación entre la alcalinidad, conductividad eléctrica y std .....	31
Figura 11. Concentración de Ca <sup>2+</sup> (mg/L) en los sitios muestreados .....	34
Figura 12. Concentración de Mg <sup>2+</sup> (mg/L) en los sitios muestreados .....	34
Figura 13. Concentración de Na <sup>+</sup> (mg/L) en los sitios muestreados .....	35
Figura 14. Concentración de K <sup>+</sup> (mg/L) en los sitios muestreados .....	35
Figura 15. Concentración de HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L) en los sitios muestreados .....	36
Figura 16. Concentración de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L) en los sitios muestreados .....	36
Figura 17. Concentración de Cl <sup>-</sup> (mg/L) en los sitios muestreados .....	39
Figura 18. Concentración de Br <sup>-</sup> (mg/L) en los sitios muestreados.....	39
Figura 21. Concentración de NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L) en los sitios muestreados.....	38
Figura 22. Concentración de F <sup>-</sup> (mg/L) en los sitios muestreados .....	38
Figura 23. Relación de Conc. de cationes (mg/L) en los sitios muestreados .....	39
Figura 24. Concentración de As (µg/L) en los sitios muestreados .....	41

Figura 25. Concentración de Cu ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios muestreados.....	42
Figura 26. Concentración de Fe ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios muestreados .....	42
Figura 27. Concentración de Mn ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios muestreados .....	43
Figura 28. Concentración de Pb ( $\mu\text{g/L}$ ) en los sitios muestreados .....	43
Figura 29. Especiación química de As (%) .....	44
Figura 30. Especiación química de As (%) .....	44
Figura 31. Especiación química de $\text{Cu}^{2+}$ (%) .....	45
Figura 32. Especiación química de $\text{Cu}^{2+}$ (%) .....	45
Figura 33. Especiación química de $\text{Fe}^{3+}$ (%) .....	46
Figura 34. Especiación química de $\text{Fe}^{3+}$ (%) .....	46
Figura 35. Especiación química de $\text{Mn}^{2+}$ (%).....	47
Figura 36. Especiación química de $\text{Mn}^{2+}$ (%).....	47
Figura 37. Especiación química de Pb (%).....	48
Figura 38. Especiación química de Pb (%).....	48
Figura 39. Diagrama de Piper en la zona de estudio .....	49
Figura 40. Isótopos estables de los sitios en la zona de estudio .....	50
Figura 41. Interacción Roca-Agua de componentes mayores en rocas ígneas.....	52
Figura 42. Interacción Roca-Agua de elementos traza en roca ígnea.....	53
Figura 43. Interacción Roca-Agua de Comp. mayores en roca sedimentaria .....	54
Figura 44. Interacción Roca-Agua de elementos traza en roca sedimentaria.....	55
Figura 45. Interacción Roca-Agua de Comp. mayores de rocas ígneas y sedimentarias de los sitios de estudio .....	56
Figura 46. Interacción Roca-Agua de elementos traza de rocas ígneas y sedimentarias de los sitios de estudio .....	57

## ELEMENTOS Y COMPUESTOS QUÍMICOS

$\text{Ca}^{2+}$	.....	calcio
$\text{Mg}^{2+}$	.....	magnesio
$\text{Na}^{+}$	.....	sodio
$\text{K}^{+}$	.....	potasio
$\text{HCO}_3^{-}$	.....	bicarbonato
$\text{SO}_4^{2-}$	.....	sulfato
$\text{Cl}^{-}$	.....	cloruro
$\text{Br}^{-}$	.....	bromuro
$\text{NO}_3^{-}$	.....	nitrato
$\text{F}^{-}$	.....	fluoruro
As	.....	arsénico
$\text{Cu}^{2+}$	.....	cupre 2+
$\text{Fe}^{3+}$	.....	hierro 3+
Mn	.....	manganeso
Pb	.....	plomo
$\text{H}_2\text{AsO}_4^{-}$	.....	arsenato di ácido
$\text{HAsO}_4^{2-}$	.....	arsenato ácido
$\text{AsO}_4^{3-}$	.....	ion arsenato
$\text{Fe}(\text{OH})_2^{+}$	.....	ion hidróxido de hierro 2
$\text{Fe}(\text{OH})_3^{+}(\text{aq})$	.....	ion hidróxido de hierro 3 en disolución acuosa

$\text{Fe}(\text{OH})_4^+$  (aq) ..... ion hidróxido de hierro 4 en disolución acuosa  
 $\text{CuCO}_3$  (aq) ..... carbonato de cobre en disolución acuosa  
 $\text{Cu}(\text{OH})^+$  ..... ion mono hidróxido de cobre 2+  
 $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{2-}$  ..... ion bicarbonato de cobre 2+  
 $\text{MnCO}_3$  (aq) ..... carbonato de manganeso en disolución acuosa  
 $\text{MnSO}_4$  ..... sulfato de manganeso  
 $\text{MnHCO}_3^+$  ..... ion bicarbonato de manganeso  
 $\text{PbOH}^+$  ..... ion monohidróxido de plomo  
 $\text{PbCO}_3$  (aq) ..... carbonato de plomo en disolución acuosa  
 $\text{PbHCO}_3$  (aq) ..... carbonato de plomo en disolución acuosa  
 $\text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$  ..... aguas sódicas bicarbonatadas  
 $\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$  ..... aguas cálcicas bicarbonatadas  
 $\text{SO}_4^{2-} - \text{HCO}_3^-$  ..... aguas sulfatadas bicarbonatadas  
D ..... deuterio  
 $^{18}\text{O}$  ..... oxígeno 18

## RESUMEN

La vida como se conoce, se desarrolla en su mayoría en disoluciones acuosas. El agua es tan familiar que se ha llegado a considerar como un líquido insípido de carácter simple, sin embargo, es una sustancia reactiva desde el punto de vista químico con propiedades físicas extraordinarias. Las estructuras y los procesos biológicos sólo pueden comprenderse con base en las propiedades físicas y químicas del agua (Arreola, 2015).

En el presente trabajo se realizó un estudio sobre la química del agua de manantiales y pozos adyacentes al campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. Hasta la fecha no se cuenta con reportes publicados sobre el contenido de componentes mayores y elementos traza en dichos manantiales y pozos, por lo que el objetivo de este trabajo es realizar un estudio sobre la composición química del agua en los manantiales y pozos periféricos al yacimiento geotérmico de Los Humeros, Puebla, sentando de esta manera las bases para aportar los primeros datos sobre la química del agua en esta zona de estudio.

Para realizar el trabajo se seleccionaron 23 sitios en la zona adyacente al campo geotérmico, en los que se han observado temperaturas que oscilan entre 9.5 y 34.1 °C, valores de pH en su mayoría con tendencia a la neutralidad en un rango entre 6.31 y 7.7, concentraciones de oxígeno disuelto hasta 9.34 mg/L, valores de conductividad eléctrica entre 63.8 y 1,871  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y valores de alcalinidad total entre 0.85 y 14.79 meq/L.

El tipo de agua presente en la zona de acuerdo al diagrama de Piper es en casi todos los sitios tipo  $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$  y para los dos pozos re inyectores del campo geotérmico de Los Humeros es del tipo  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$ , entonces, se puede considerar que el agua en la zona de estudio es de reciente infiltración debido a que el anión encontrado a concentraciones más altas es el  $\text{HCO}_3^-$  y el catión predominante es  $\text{Ca}^{2+}$ .

En cuanto a la especiación química, se observó que se presentó arsénico, principalmente como  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$ ; el hierro como  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ ; el cobre como  $\text{CuCO}_3(\text{aq})$  y  $\text{Cu}^{2+}$ ; el manganeso como  $\text{Mn}^{2+}$ , reportándose otras especies en menor proporción:  $\text{MnCO}_3(\text{aq})$ ,  $\text{MnSO}_4$  y  $\text{MnHCO}_3^+$  y el plomo como  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{PbCO}_3(\text{aq})$  y  $\text{PbHCO}_3$ .

*Palabras Clave:* Química del agua; manantiales; diagrama de Piper; elementos traza; especiación química.

## ABSTRACT

Life as it is known, is developed mostly in aqueous solutions. The water is so familiar that it has come to be considered as an insipid liquid of simple character, however, it is a chemically reactive substance with extraordinary physical properties. Structures and biological processes can only be understood based on the physical and chemical properties of water (Arreola M. 2015).

In the present work a study on the water chemistry of springs and wells adjacent to the geothermal field of Los Humeros, Puebla, is carried out. So far, there are no published reports on the content of major components and trace elements in such springs and wells, so the objective of this work was to carry out a study on the chemical composition of the water in the springs and peripheral wells to the geothermal deposit of Los Humeros, Puebla, thus laying the bases to contribute the first data on the chemistry of the water in this zone.

To carry out this work, 23 sites were selected in the geothermal field adjacent area. These temperatures ranging from 9.5 to 34.1°C have been observed, pH values mostly with a tendency to the neutrality in a range between 6.31 and 7.7, dissolved oxygen concentrations up to 9.34 mg / L, electric conductivity values between 63.8 and 1.871  $\mu\text{S} / \text{cm}$  and, total alkalinity values between 0.85 and 14.79 meq / L.

The type of water in the area according to the Piper diagram is for almost all sites type  $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$  and for the two reinjection wells of the geothermal field of Los Humeros is  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$  type then, it can be considered that the water in the studied area is of recent infiltration because the anion found at higher concentrations is the  $\text{HCO}_3^-$  ion and the predominant cation is  $\text{Ca}^{2+}$ .

As for the chemical speciation, it was observed that arsenic was present as  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  and  $\text{HAsO}_4^{2-}$ ; iron (III) was forming  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ; copper was observed as  $\text{CuCO}_3(\text{aq})$  and  $\text{Cu}^{2+}$ ; manganese, was found as  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{MnCO}_3(\text{aq})$ ,  $\text{MnSO}_4$  and  $\text{MnHCO}_3$ ; and lead was found as  $\text{Pb}_2^+$ ,  $\text{PbOH}^+$ ,  $\text{PbCO}_3(\text{aq})$  and  $\text{PbHCO}_3$ .

**Keywords:** Water chemistry; springs; Piper diagram; trace elements; chemical speciation.

## CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida y todas las personas deben disponer de un suministro suficiente, accesible e inocuo (OMS 2006). La calidad de los distintos tipos de agua se ha valorado partiendo de variables físicas, químicas y biológicas evaluadas de manera grupal o individual, estos parámetros dan información extensa de la naturaleza de las especies químicas presentes en el agua así como sus propiedades físicas (Samboni *et al.*, 2007; Gouse *et al.*, 2018).

El agua, es un elemento imprescindible para la vida y el componente presente con mayor extensión en la superficie de nuestro planeta. El agua potable, en este marco, es la apta para el consumo por parte del ser humano. Se trata de un líquido inodoro, insípido e incoloro que se puede beber sin dañar al organismo.

Es de vital importancia que el agua potable cuente con una calidad adecuada para prevenir y evitar la transmisión de enfermedades gastrointestinales y otras, para ello se requiere no sobrepase los límites máximos permisibles recomendados por la normatividad respecto a sus características fisicoquímicas, microbiológicas y organolépticas, esto para asegurar y preservar la calidad del agua para uso y consumo humano (DOF, 1994).

El agua es un recurso vital para el suministro económico en el medio urbano y rural, juega un papel fundamental en el bienestar del ser humano y de muchos ecosistemas acuáticos. A nivel mundial, los acuíferos están experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y mineras, por esta razón existe la necesidad de proteger y evaluar la calidad natural del agua (Foster *et al.*, 2002). Si el agua destinada a consumo humano sobrepasa los límites permisibles por la legislación deberá ser sometida a un tratamiento antes de su distribución (DOF, 1994). Entre las fuentes principales que suministran agua para consumo humano se encuentran los acuíferos, estos son formaciones geológicas subterráneas que almacenan y transmiten agua en cantidades significativas.

Por lo general conforman grandes extensiones y se recargan por el aporte de aguas pluviales, corrientes superficiales y lagos que se infiltran en el suelo. En el interior del acuífero el agua escurre en función del potencial hidráulico desde las zonas de recarga hacia las de descarga, las cuales pueden ser ríos, lagos o manantiales. Estas aguas se extraen mediante el bombeo en pozos (Price, 2007).

La composición química del agua puede ser controlada por factores naturales o antropogénicos. Los naturales son el clima, su interacción con el medio geológico por el cual circula y el tiempo de residencia. Los antropogénicos están directamente relacionados con actividades humanas (López-Álvarez *et al.*, 2013; Abul *et al.*, 2018). A partir de la Revolución Industrial el tema de la contaminación en todos los ambientes dio un giro importante, al existir un incremento de materias primas útiles en los procesos industriales y el uso de nuevas fuentes de energía. Éstos aumentaron la escala de impactos ambientales.

La introducción de componentes de mayor o menor toxicidad en el medio natural supera la capacidad de “auto limpieza” de los ecosistemas dando como resultado la acumulación de contaminantes como los metales pesados (Martin, 2008; Baat *et al.*, 2018)

El agua es un compuesto familiar para el ser humano y sumamente importante para la vida sobre la Tierra, ya que constituye del 70 al 90% del peso de la mayor parte de los seres vivos. Gran parte de su relevancia radica en el hecho de que es una sustancia que si bien se encuentra mayoritariamente como líquido, también puede encontrarse como sólido o vapor de agua en las condiciones climatológicas naturales experimentadas en el planeta (Doménech y Peral, 2006).

El capítulo I refiere a la introducción del trabajo de investigación mencionando la justificación, hipótesis y objetivos, además de comentar algunos trabajos nacionales e internacionales que han hecho investigaciones similares al presente trabajo.

El capítulo II habla sobre las generalidades del agua como la sustancia más importante en este planeta, su disponibilidad y calidad; se indican qué actividades humanas son las principales responsables de la introducción de ciertos contaminantes en el agua subterránea mencionando dónde y cómo pueden encontrarse, y señalando los posibles efectos en la población humana. Este capítulo también aborda la importancia de analizar los parámetros fisicoquímicos y el por qué es importante conocer la especiación química de los elementos químicos presentes en el agua.

El capítulo III refiere a la zona de estudio: localización, descripción, geomorfología, hidrología y clima de los lugares donde se realizó la toma de muestras indicadas en mapas de la zona de estudio. En este capítulo también se da una breve explicación de cómo está conformado el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla

El capítulo IV expone la metodología y materiales utilizados para lograr los objetivos establecidos para este trabajo de investigación.

El capítulo V presenta los resultados obtenidos del muestreo, lo que se midió en campo: temperatura, pH, oxígeno disuelto, conductividad eléctrica, alcalinidad y sólidos disueltos totales. Lo que se analizó en laboratorio: aniones, cationes, elementos traza e isótopos estables del agua colectada. Se analizan los resultados de la especiación química realizada al arsénico, cobre, hierro, manganeso y plomo. Se muestra el resultado obtenido del diagrama de Piper así como los resultados de los ‰ de los isótopos estables analizados. En este capítulo también se presentan las relaciones hidrogeoquímicas de los sitios analizados, referente a la interacción roca-agua.

El capítulo VI menciona la discusión y conclusiones del presente trabajo.

## 1.1 Justificación

El trabajo que se presenta forma parte de un proyecto de investigación entre México y la Unión Europea que tiene como objetivo hacer más rentable y factible la generación de energía para producir electricidad y calor.

Estudios previos permiten suponer que el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, puede incrementar su capacidad de generación de energía eléctrica, por lo que el proyecto de investigación antes mencionado está orientado a aumentar el conocimiento y la experiencia en este tipo de sistemas de generación de energía limpia, que permitan en un futuro escalar esta explotación. Hasta la fecha se cuenta con pocos reportes sobre la química del agua en la zona periférica al campo geotérmico, que permitan inferir una posible relación o no con el yacimiento geotérmico, por lo que este trabajo está enfocado en realizar un estudio de la química del agua de manantiales y pozos aledaños a ese campo geotérmico.

## 1.2 Hipótesis

Los manantiales y pozos de agua potable de la zona de estudio presentan un origen que no tiene relación química con el yacimiento geotérmico de Los Humeros, Puebla.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Realizar un estudio sobre la composición química del agua en los pozos de agua potable y manantiales periféricos al yacimiento geotérmico de los Humeros, Puebla y determinar si existe una posible relación química con el yacimiento geotérmico.

### 1.3.2 Objetivos particulares

- Realizar una caracterización química del agua, a través del análisis de componentes mayores y elementos traza.
- Determinar el tipo de agua mediante la construcción de un diagrama de Piper.
- Determinar el comportamiento de las especies químicas predominantes mediante la modelación de su movilidad química.
- Comparar los resultados de la química del agua en los manantiales y pozos estudiados con las características químicas de los pozos reinyectores del campo geotérmico.

## 1.4 Antecedentes

Singh *et al.* (2014) estudiaron la química del agua en manantiales termales y fríos ubicados en el distrito de Dumka en Jharkhand, India. Las temperaturas de tales manantiales oscilaron entre 42 °C y 70 °C y son de naturaleza casi neutra a moderadamente alcalina (pH = 6.9 - 9.5). La posición del agua termal en el diagrama de Piper sugiere que las fuentes son de tipo Na-Cl y la química de dichas aguas es compatible con la roca de la zona. Los manantiales fríos del área son casi neutros (pH = 7.4-7.5) en la naturaleza y caen en el campo Ca-HCO<sub>3</sub> en el diagrama de Piper, lo que indica que la circulación de los manantiales de agua fría es a través de formaciones sedimentarias. La temperatura estimada osciló entre 92°C y 138°C; lo que indica que estos manantiales termales son adecuados para sistemas geotérmicos de baja entalpía.

Gemici *et al.* (2002), en Turquía, realizó estudios de manantiales termales y pozos que se encuentran en el Eynal, que son parte del campo geotérmico de Simav. Los estudios fueron llevados a cabo para obtener las principales características químicas y físicas de los manantiales que se encuentran dentro y fuera del campo geotérmico. Las temperaturas inferiores de los pozos perforados alcanzaron 163 °C con un total de sólidos disueltos alrededor de 2,225 mg / kg. Las temperaturas superficiales de los manantiales termales varían entre 51°C y 90°C. Todas las aguas termales pertenecen a facies Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. Las aguas subterráneas no termales son del tipo Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>. La disolución de roca huésped e intercambio iónico en el reservorio del sistema geotérmico cambian del tipo de Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> de aguas subterráneas a aguas termales del tipo Na<sup>+</sup>-HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>. El ascenso de los fluidos térmicos produce vapor y aguas líquidas que resultan en un aumento de las concentraciones de los constituyentes en las aguas de descarga. El pH del reservorio fue mucho más bajo que el pH medido en la fase líquida separada en condiciones atmosféricas, ya que este último experimentó una gran pérdida de gases ácidos, principalmente CO<sub>2</sub>. La evaluación de los diversos geotermómetros químicos y modelos geoquímicos sugiere que las temperaturas del dicho yacimiento varían entre 175 °C y 200 °C.

Kavouridisa *et al.* (1997) en Grecia, realizaron una evaluación química e isotópica de manantiales que se encuentran por encima de dos reservorios geotérmicos que se encuentran debajo de una caldera volcánica. El reservorio más profundo tiene temperaturas superiores a 330°C y una composición química e isotópica de acuerdo con una modificación térmica del agua de mar por agua: interacción de rocas y procesos de ebullición en profundidad. El menos profundo tiene temperaturas por debajo de 170°C y su contenido de sal y composición isotópica se encuentra mezclado entre los del agua de mar y las aguas subterráneas locales. El vapor producido en el borde de la caldera de la zona estudiada, tiene D y <sup>18</sup>O de -42‰ y -6.1‰ respectivamente mientras que el producido dentro de la caldera muestran valores promedio de -11‰ y +2.5‰ para D y <sup>18</sup>O respectivamente.

Dichos valores son indicativos de diferentes aguas madre para los dos acuíferos anteriores. Datos de geotermómetros de esa zona de estudio indican temperaturas de reservorio entre 100-350°C.

Oyun-Erdene (2013), en Mongolia, presentaron un informe sobre la composición química de fluidos geotérmicos en pozos de producción de tres campos geotérmicos de baja temperatura, y 7 manantiales de baja temperatura.

La composición química de estos fluidos se analizó por métodos estándar. Se utilizó el diagrama de Piper para clasificar los tipos de agua de acuerdo con el estado de equilibrio a temperaturas determinadas. Los análisis químicos para fluidos geotérmicos se utilizaron para evaluar el probable equilibrio químico existente entre los tres campos y para estimar temperaturas en dichos sistemas. Las temperaturas de los fluidos geotérmicos de los campos están en los rangos de 64 °C a 78 °C y las temperaturas de las aguas termales de Mongolia oscilan entre 25°C y 88°C.

En México, Silva *et al.* (2016) determinaron la química del agua de manantiales y pozos en la cuenca del Río Duero. Utilizaron el diagrama de Piper para definir las distintas facies químicas de agua prevaletientes en la cuenca. El área de mayor concentración de parámetros químicos se relaciona con la zona de influencia del campo geotérmico de Ixtlán de los Hervores, así como con la porción central orientada en el sentido de la falla geológica Pajacuarán.

Gutiérrez-Viggiano *et al.* (2003) analizaron la zona termal de Araró, Michoacán, estudiando cincuenta manantiales ubicados en la parte central de la zona, así como el agua de pozos de uso agrícola cercanos, reportando que los manantiales de esa zona son de aguas salinas con conductividades eléctricas promedio de 4600  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y salinidades del orden de los 2340 mg/L. Los manantiales fueron considerados del tipo clorurado sódico, con concentraciones de cloruros de 825 mg/L en promedio.

El estudio sugirió que las aguas de los manantiales provienen de una mezcla entre aguas geotérmicas profundas con acuíferos someros. Esto se corroboró por las temperaturas de equilibrio obtenidas mediante la aplicación de geotermómetros convencionales que arrojaron temperaturas de fondo superiores a 200°C, esa temperatura provino de un conjunto de análisis de muestras colectadas de los manantiales de la zona. Otros manantiales cercanos, como los de Aztimba y San Bartolomé (Michoacán), resultaron con baja salinidad de aguas tipo  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$  y concentraciones muy bajas de  $\text{Cl}^-$  (máximo 15 mg/L).

Tello-Hinojosa *et al.* (2006; 2014), estudiaron la hidrogeoquímica del campo geotérmico de Los Azufres (Michoacán). Observaron, a través de estudios geoquímicos, que el  $\text{Cl}^-$  y el  $\text{Na}^+$  son los elementos que dominan la composición electrolítica de las aguas geotérmicas de la zona. La concentración de  $\text{Cl}^-$  osciló entre 1485 mg/L y 7297 mg/L y la concentración de  $\text{Na}^+$  varió entre 914 mg /L y 4442 mg/L. Los manantiales muestreados mostraron altas concentraciones de  $\text{SiO}_2$ , K y B, mientras que el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  presentaron bajas concentraciones. El estado de equilibrio y las temperaturas del sistema geotérmico fueron deducidos a través del diagrama ternario de Piper. Parte del agua de las muestras tomadas de los manantiales localizados alrededor del campo geotérmico de Los Azufres coinciden con la características químicas del agua del reservorio del campo, lo que sugirió que existe relación química entre los manantiales aledaños y el reservorio geotérmico.

## CAPITULO II. MARCO TEÓRICO

### 2.1 Generalidades

#### 2.1.1 El agua

La vida como se conoce se desarrolla en su mayoría en disoluciones acuosas. El agua es tan familiar que se ha llegado a considerar como un líquido insípido de carácter simple, sin embargo es un líquido reactivo desde el punto de vista químico con propiedades físicas extraordinarias. Las estructuras y los procesos biológicos sólo pueden comprenderse con base en propiedades físicas y químicas del agua (Voet y Voet, 2006; D'Acunha *et al.*, 2019) El agua es una sustancia pura, incolora, inodora e insípida. En el medio natural el agua presenta una gran variedad de compuestos que alteran significativamente sus propiedades organolépticas.

#### 2.1.2 Disponibilidad del agua

El 70% de la superficie de la Tierra es agua, la disponibilidad del agua promedio en el mundo es de aproximadamente  $1.386 \times 10^6 \text{ km}^3$ , de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5% es agua dulce; de esta cantidad alrededor del 70% no está disponible para consumo humano porque se encuentra en los glaciares, en la nieve y en el hielo. Del agua disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos, cuya renovación es producto de la infiltración (CONAGUA, 2010). En México los estudios realizados por la CONAGUA, el INEGI y el INECC, han identificado 1471 cuencas hidrográficas, las cuales se han subdivido en cuencas hidrológicas, organizadas en 37 regiones hidrológicas. Respecto a las aguas subterráneas, México cuenta con 653 acuíferos (SEMARNAT, 2011).

#### 2.1.3 Calidad del agua

La calidad del agua potable a lo largo de la historia, ha sido un factor determinante del bienestar humano. Las enfermedades propagadas por agua “potable” contaminada con materia fecal diezmaron a la población de ciudades enteras. Actualmente, el agua contaminada por fuentes naturales o humanas sigue causando grandes problemas a las personas que la usan de manera obligada, tanto para beber como para la irrigación de hortalizas y otras plantas comestibles crudas (Manahan, 2007; Alcamo, 2018) La calidad del agua subterránea evoluciona rápidamente a medida que pasa a través de las vías del subsuelo, dentro del suelo y la zona no saturada y de allí a la zona saturada del acuífero (Edmunds *et al.*, 2003; Daoliang *et al.*, 2018).

### 2.1.3.1 Clasificación de los tipos de agua

De acuerdo con su origen, los suministros de agua se clasifican en tres categorías (Ramalho, 1996; Restrepo, 2007):

- 1.- *Aguas superficiales*. Comprenden los cauces (ríos), océanos, lagos, manantiales y aguas embalsadas. Son aquellas aguas que se encuentran transitoriamente discurriendo, o en reposo, sobre un suelo, otros cuerpos de agua u otro material.
2. *Aguas subterráneas*. Es el agua existente bajo la superficie terrestre en una zona de saturación llenando los espacios vacíos del suelo y del subsuelo, procedente de la infiltración por precipitaciones y escorrentías. El agua infiltrada circula por el subsuelo hasta llegar a una zona de acumulación limitada por capas impermeables, formando un manto, denominado acuífero que abastece pozos y manantiales.
3. *Aguas meteorológicas*. La precipitada sobre la tierra en forma de lluvia, nieve y granizo, originada por la condensación del vapor acuoso de la atmósfera.

### 2.1.4 Contaminación del agua

Se considera contaminación al exceso de materia o energía (calor) que perturbe negativamente las actividades que normalmente se desarrollan cerca o dentro del agua. Entonces, no existe una división precisa entre las aguas contaminadas y las no contaminadas; este calificativo se atribuye en función del uso, las exigencias higiénicas y del grado de avance de la ciencia y tecnología para determinar los efectos y medir los contaminantes (Jiménez, 2001).

En la actualidad la mayor preocupación sobre la seguridad del agua es la presencia potencial de contaminantes químicos. Éstos pueden incluir productos químicos orgánicos e inorgánicos y metales pesados, procedentes de efluentes industriales, agrícolas y de la escorrentía urbana.

#### 2.1.4.1 Contaminación del agua subterránea

Uno de los principales problemas que presenta en la actualidad el agua subterránea y que repercuten en la salud del humano es la contaminación por sustancias químicas como los metales pesados y metaloides.

Las actividades humanas han introducido ciertos contaminantes a la hidrósfera a través de la quema de combustibles fósiles, la fundición de minerales, las aguas residuales municipales, industriales, efluentes de minería, vertederos, evacuación subterránea de desechos tóxicos, etc., estos contaminantes se dispersan fácilmente en los sistemas acuáticos y tienden a acumularse en los organismos vivos, provocando diversos trastornos y enfermedades en los ecosistemas (Jang-Soon *et al.*, 2009). Algunos metales pesados están entre los más dañinos de los contaminantes elementales, y son de gran interés debido a su toxicidad.

#### 2.1.4.2 Contaminación por metales pesados

Los metales pesados pertenecen a los contaminantes prioritarios más peligrosos, pueden entrar en los depósitos de agua y participar en diversas reacciones químicas, en estas reacciones la especiación de metales puede cambiar (Sedykh *et al.*, 2000). La descarga de metales pesados en el medio acuático es de gran preocupación en todo el mundo. Bajo ciertas condiciones ambientales, los metales pesados pueden acumularse a una concentración tóxica y causar daños ecológicos (Ömer *et al.*, 2008; Evans, 2019). La contaminación de los sistemas acuáticos con metales pesados por causas naturales o antropogénicas, es actualmente un serio problema ambiental. Los metales pesados son elementos con una densidad mayor o igual a 5 g/cm<sup>3</sup>.

Actualmente, también se consideran dentro de este grupo algunos metales y metaloides de menor densidad. Debido a su movilidad en los ecosistemas acuáticos naturales y a su toxicidad para las formas superiores de vida, los iones de metales pesados presentes en los abastecimientos de aguas superficiales y subterráneas, se les considera como los contaminantes inorgánicos más importantes. Los metales pesados pueden ser detectados en su estado elemental o enlazados en complejos con sales (Cañizares, 2000; Mesa *et al.*, 2007).

Pueden encontrarse en el aire, agua o suelo, cambiando su estado de oxidación o incorporándose a los seres vivos (Panigatti, 2003). La cantidad de metales liberada anualmente al ambiente es impactante, y hay estudios que indican que la toxicidad total de los metales movilizados por las actividades humanas es superior a los desechos radiactivos y orgánicos. Esto puede producir efectos nocivos en la flora y fauna, así como un aumento de enfermedades crónicas en la población humana, y la limitación del uso múltiple del agua en varias regiones del mundo (Moore, 1991).

### 2.1.5 Parámetros fisicoquímicos

Para evaluar la química del agua se estudia una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos, también conocidos como indicadores de calidad del agua (Nissen *et al.*, 2000). Los parámetros fisicoquímicos proporcionan información extensa de la naturaleza de las especies químicas presentes en el agua. Los principales parámetros a evaluar para la determinación de la calidad del agua son pH, temperatura, alcalinidad total, acidez total, dureza total, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, DBO, DQO, cationes y aniones.

### 2.1.6 Especiación química

El conocimiento sobre la especiación del metal, es decir, la forma química en la que pueda presentarse, se considera importante para la comprensión y predicción del comportamiento y el impacto que éste pueda tener en cualquier sistema ambiental. La especiación química de un metal depende de su estado de oxidación y de sus interacciones con otros componentes del sistema (Tipping *et al.*, 1998; Fotini *et al.*, 2017).

Los factores más importantes que predicen la especiación química de un elemento son el Eh (potencial de oxidación) y pH. Por ejemplo, el agua, en condiciones oxidantes las mayores concentraciones de As (V) (arsénico) se pueden derivar de la oxidación de minerales de sulfuro, principalmente arsenopirita (Romić *et al.*, 2011; Funes *et al.*, 2017).

## CAPÍTULO III. ÁREA DE ESTUDIO

### 3.1 Localización

El Campo Geotérmico Los Humeros, se ubica en el extremo Noreste de la Cuenca de Libres-Oriental, en el extremo Oriental de la fisiografía de la Faja Volcánica Trans-Mexicana que atraviesa todo el país con dirección OE, en intersección con la Sierra Madre Oriental.

La Figura 1 muestra la localización de los Estados de Puebla y Veracruz, donde se realizaron la toma de muestras de agua.

Las poblaciones cercanas más importantes son: Teziutlán, Puebla, al Noreste y Perote, Veracruz, al Sureste, siendo éste último con el que hay comunicación mediante un camino pavimentado transitable en todo momento. Las principales vías de acceso son la autopista 140D y la carretera federal 140, que comunican a la población de Perote con las ciudades de México, D.F., Puebla, Teziutlán, Xalapa, Veracruz, y el Puerto de Veracruz.

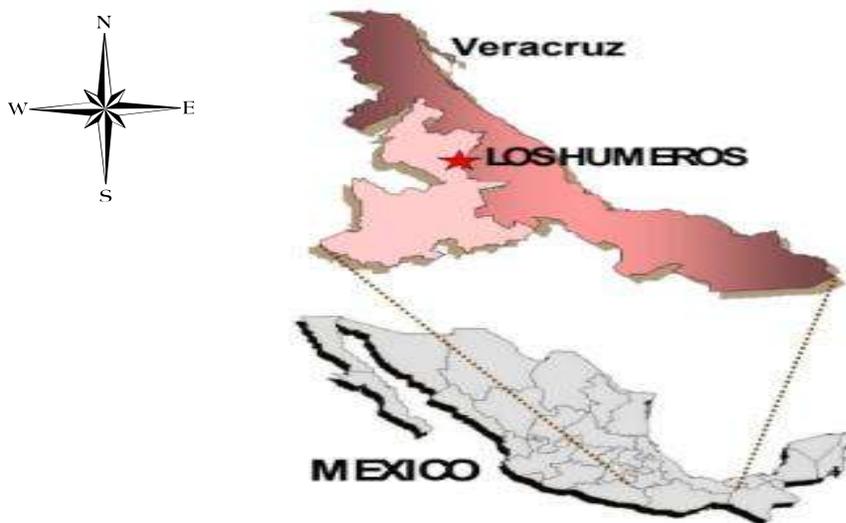


Figura 1. Localización de la zona de estudio. Tomado de CFE, 2014.

### 3.2 Descripción

El campo geotérmico de Los Humeros es el tercero en importancia dentro del país y el segundo de los campos localizado en la Faja Volcánica Trans-Mexicana. Está localizado en el extremo oriental del estado de Puebla y occidental del estado de Veracruz, a una elevación promedio de 2,800 msnm.

A partir de 1968 inician los trabajos de exploración geofísica, geológica, geoquímica y geohidrología; y en abril de 1981 comienza la construcción de pozos profundos. En 1982 se inicia a extraer fluido del yacimiento y es hasta 1990 cuando entra en operación la primera unidad de 5 MW. La capacidad efectiva actual en el campo geotérmico Los Humeros es de 68.6 MW que corresponde a dos unidades de 26.8 MW (U-9 y U-10) y tres unidades de 5 MW. Actualmente está en pruebas operativas una unidad de 27.4 MW (U-11), con lo cual se alcanzará una capacidad efectiva de 81 MW. (CFE, 2014).

A la fecha se han perforado 53 pozos, cuyas profundidades en promedio van de los 1,800 a 2,500 m, teniendo un pozo de 3,104 m (H-12), y otro de 3,280 m (H-24) de profundidad. 24 pozos suministran vapor y están integrados al sistema de generación (la mayoría con vapor saturado seco), 5 se encuentran en etapa de evaluación, 2 pozos son re inyectores, 5 de exploración, 1 en observación y 14 pozos fueron dados de baja. (CFE, 2014).

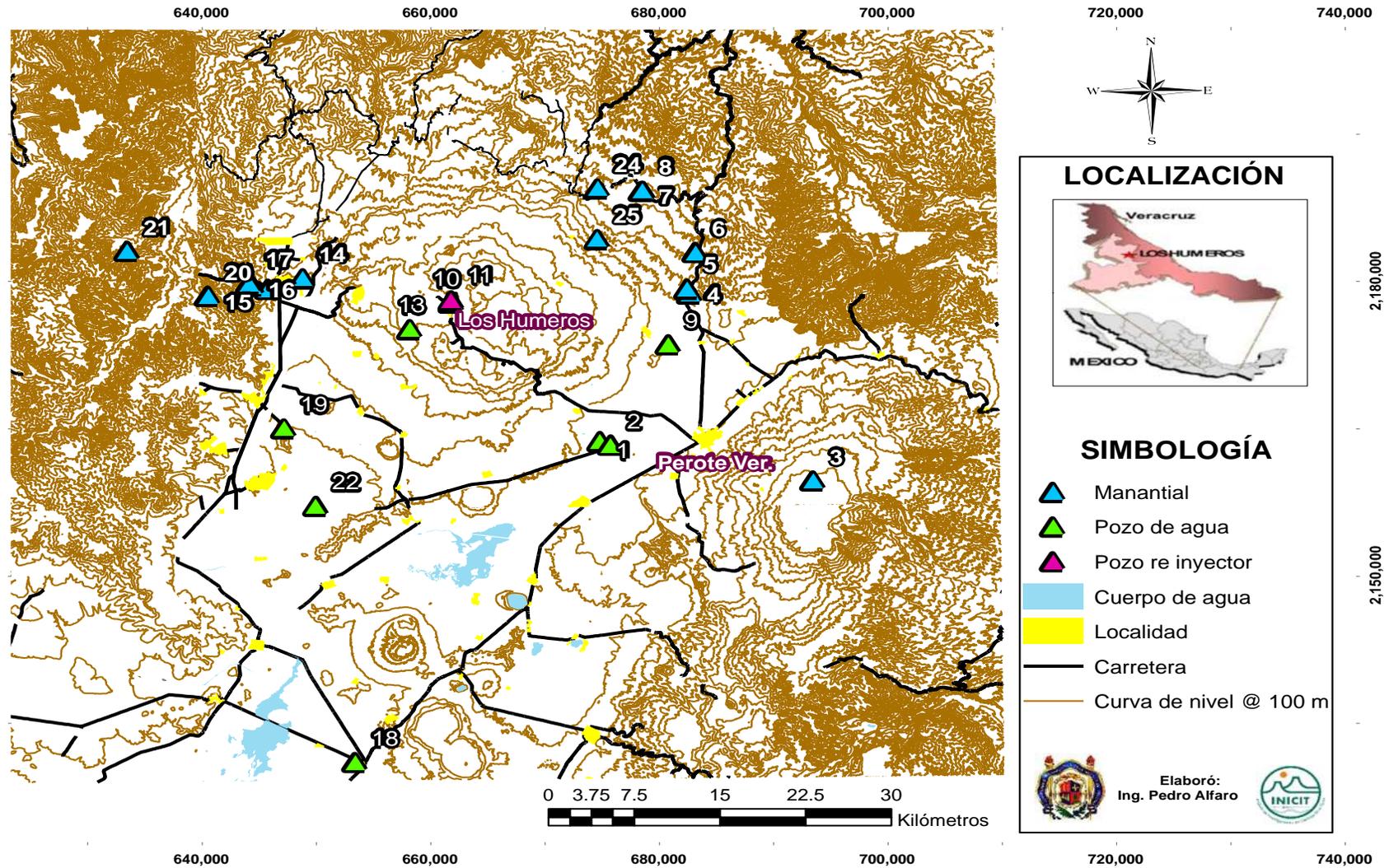


Figura 2. Mapa de la zona de estudio.

### 3.3 Geomorfología

Geomorfológicamente, el campo geotérmico de Los Humeros presenta los caracteres típicos de un sistema montañoso de pendiente moderada con altitudes de 2,800 a 2,950 msnm.; las mayores cotas se detectan a lo largo y ancho de la cadena montañosa de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (Pico de Orizaba –5,700 m-, Popocatepetl – 5,465 m-, Nevado de Toluca – 4,691 m-, Nevado de Colima –4,450 m-).

Los rasgos geomorfológicos del campo de Los Humeros son el resultado de una serie de eventos magmáticos de tipo explosivo que ocurrieron durante el Terciario y el Cuaternario, produciendo ignimbritas y concluyendo con derrames de composición ácida. Esta actividad vació parcialmente la cámara magmática, provocando el desplome de la estructura y originándose de esta manera la cámara por hundimiento sucediéndole así una serie de derrames de andesita basáltica (Ferriz y Mahood, 1984).

Los Humeros se encuentran en la porción oriental de la Faja Volcánica Trans-Mexicana, donde se presentan diferentes formas volcánicas como los cineríticos, domos y la gran caldera de Los Humeros, que empieza en el semigraben de Libres-Oriental. El relleno de este graben se produjo por actividad volcánica y por depósitos vulcano-clásticos y aluviales del Terciario al Cuaternario (Ferriz y Mahood, 1984).

### 3.4 Geología

La geología del área de estudio, ha sido descrita por diversos autores, entre los que se encuentran Yáñez (1980), Ferriz y Mahood (1984), Negendank *et al.*, (1985), y Martínez (1993). El basamento local está constituido por un complejo paleozoico metamórfico de esquistos de clorita-moscovita, le sobreyace una secuencia sedimentaria mesozoica plegada, intrusiones sieníticas y granodioritas del Terciario Inferior y andesitas pliocénicas.

La actividad inicial en esta zona está representada por lavas ferrobasálticas de la formación Tezuitlán, cuya edad varía de 3.5 a 1.5 Ma (Yáñez y Durán, 1982). La mayor parte de las unidades volcánicas del área se emplazaron hace menos de 0.5 Ma, siendo acompañadas por la formación de calderas. El colapso de la caldera de Los Humeros fue provocado por la erupción de la ignimbrita Xáltipan (0.46 Ma), (Ferriz y Mahood, 1984).

Después del colapso, se formaron varios domos silíceos (0.3Ma). La emisión de la ignimbrita Zaragoza (0.1 Ma) provocó el colapso de Los Potreros, y las emisiones de andesitas, andesitas basálticas y lavas, pómez y cenizas (0.08 a 0.04 Ma) dieron origen a la estructura del Xalapasco. La actividad más reciente se encuentra representada por basaltos de olivino (0.02 Ma) (Ferriz y Mahood, 1984). Por otra parte, Verma (2000) plantea que los magmas máficos son producidos por fusión parcial del manto superior.

Dentro de la caldera de Los Potreros hay dos estructuras circulares también muy importantes: Colapso Central y Xalapazco Maztaloya. Ambas estructuras son intersectadas por la falla normal de Los Humeros, la cual junto con otra estructura regional de orientación NO (solamente inferida en el basamento y sin evidencia en superficie) son las estructuras más importantes en este campo (Viggiano y Gutiérrez, 1995).

Se elaboró un mapa geológico con base en los datos del INEGI de la zona de estudio (Figura 3). En el mapa se ubican los puntos de muestreo observando que la mayoría de los sitios se encuentran sobre rocas ígneas extrusivas a excepción de 4 puntos ubicados sobre rocas sedimentarias (Sitios 16,17, 18, 20, 21,22; Tabla 1).

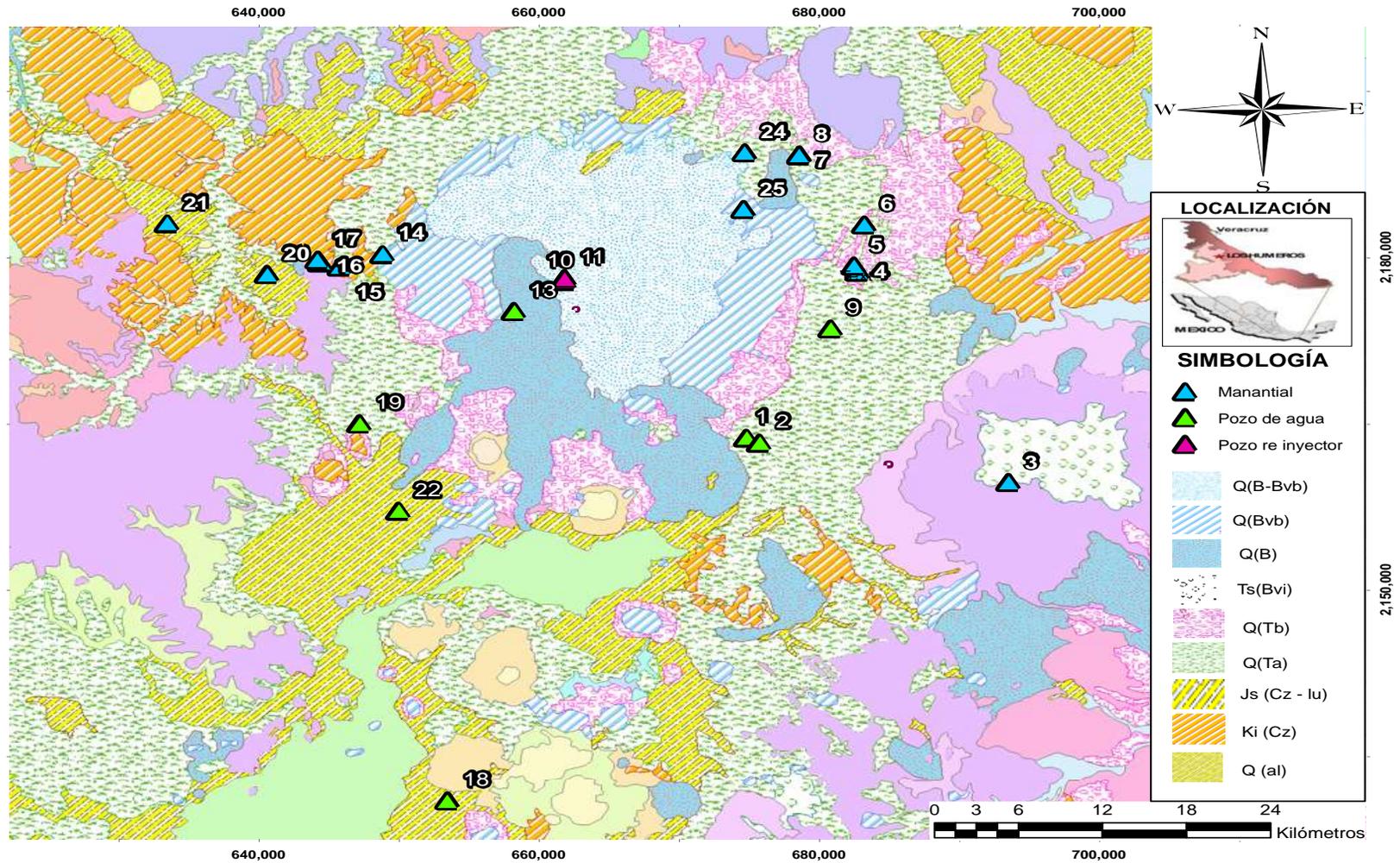


Figura 3. Mapa geológico de la zona de estudio.

Tabla 1. Unidades geológicas superficiales presentes en los sitios de muestreo.

Sitio	Num. de muestra	Tipo	Clave
Rancho Jardín Dorado-Pozo2	1	Toba ácida	Q(Ta)
Rancho Jardín Dorado-Pozo1	2	Toba ácida	Q(Ta)
Cofre de Perote "El Conejo"	3	Brecha volcánica intermedia	Ts(Bvi)
Mazapa 3	4	Toba ácida	Q(Ta)
Mazapa	5	Toba ácida	Q(Ta)
Zoatzingo-El Tesoro	6	Toba básica	Q(Tb)
<i>Santa Rosalía</i>	7	Toba básica	Q(Tb)
El Chicaco - Aguacatlán	8	Toba básica	Q(Tb)
Rancho Los Sauces	9	Toba ácida	Q(Ta)
Pozo 29-Humeros	10	Basalto-Brecha volcánica básica	Q(B-Bvb)
Pozo 38-Humeros	11	Basalto-Brecha volcánica básica	Q(B-Bvb)
PGH4 Humeros	13	Basalto	Q(B)
Huitzitzilapan	14	Brecha volcánica básica	Q(Bvb)
Tehuapan-San Miguel	15	Toba ácida	Q(Ta)
La Olímpica1	16	Caliza	Ki(Cz)
La Olímpica2	17	Caliza	Ki(Cz)
Zacatepec, Villa del Carmen	18	Alubial	Q(Al)
Puchintoc	19	Toba básica	Q(Tb)
Sesder	20	Caliza-Lutita	Js(Cz-Lu)
Buenavista	21	Caliza-Lutita	Js(Cz-Lu)
San Miguel Barrientos	22	Alubial	Q(Al)
La Quinta	24	Toba ácida	Q(Ta)
El Progreso	25	Brecha volcánica básica	Q(Bvb)

### 3.5 Hidrología

De acuerdo a la clasificación de regiones hidrológicas del INEGI, en la zona de estudio se localizan tres: RH-18 (Región hidrológica Balsas), RH-27 (Región hidrológica Norte de Veracruz Tuxpan-Nautla) y RH-28 (Región hidrológica Papaloapan).

Los acuíferos importantes en la zona de estudio son el acuífero de Los Humeros, el acuífero de Perote y el acuífero de Tepeyahualco.

De acuerdo a las características de las cuencas de la región, que son endorreicas, la recarga de los acuíferos es prácticamente continua durante las lluvias, ya que la estratigrafía presente en superficie entre los valles de Tepeyahualco y Perote, se encuentra conformada por andesitas basálticas, que se comportan como verdaderos filtros permitiendo que el agua meteórica se infiltre directamente y además, en los valles que están constituidos en su zona superficial por tobas de caída libre, presentan buena permeabilidad, lo que facilita la infiltración hacia los acuíferos mencionados. (Tello, 1987).

### 3.6 Clima

De acuerdo al sistema de clasificación climática de Köppen, modificado por Enriqueta García y en apoyo con el mapa de unidades climáticas de INEGI (2000), la zona de estudio corresponde a los siguientes tipos de climas: templados húmedos, templados subhúmedos, semifríos subhúmedos y fríos.

De acuerdo a Cedillo-Rodríguez *et al.* (1987), en los valles separados por aparatos volcánicos y sierritas de rocas sedimentarias, comprendidos en la cuenca Libres-Oriental, el clima es seco, con verano cálido temperatura media anual entre 12 °C y 18 °C, siendo la temperatura más baja entre -3 °C y 15 °C y la del mes más cálido mayor de 18 °C. En las partes altas de la Sierra Cofre de Perote-Pico de Orizaba, el clima es del tipo polar, con temperatura media anual menor de 10 °C. En la parte Norte donde se localizan las subcuencas de los arroyos: Xiacayucan, Puxtla, Acateno, Jalacingo y Altotonga; el clima es tropical lluvioso, con temperatura media mensual mayor de 18 °C y precipitación media anual superior a 1,000 mm. En general, la temperatura media anual en la zona es de 14 °C y una precipitación media anual de 590 mm, la temporada de lluvia abarca los meses de abril a octubre, siendo agosto y septiembre los más lluviosos, la evaporación potencial media anual es de 1,460 mm/año y la evaporación real media es de 472 mm/año. La disponibilidad de agua es variable hacia la porción Sur y Sureste del Valle de Perote, es de clima desértico.

## CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA

### 4.1 Selección de los sitios de estudio

Se seleccionaron 23 sitios de muestreo representativos del área de estudio (Tabla 2), la localización de los sitios de estudio se presentó en la Figura 2 del capítulo anterior.

Tabla 2. Localización de los sitios de muestreo.

Núm. de muestra	Sitio	Fecha (dd/mm/año)	Tipo	X (m)	Y (m)	Alt. (m.s.n.m.)
1	Rancho Jardín Dorado-Pozo2	14/06/2017	Pozo	674862	2163723	2367
2	Rancho Jardín Dorado-Pozo1	14/06/2017	Pozo	675819	2163313	2363
3	Cofre de Perote m4 "El Conejo"	11/06/2017	Manantial	693561	2159699	3393
4	Mazapa 3	10/06/2017	Manantial	682806	2178713	2273
5	Mazapa	10/06/2017	Manantial	682518	2179263	2221
6	Zoatzingo-El Tesoro	10/06/2017	Manantial	683257	2182945	2061
7	<i>Santa Rosalía</i>	11/06/2017	Manantial	676367	2190668	1876
8	El Chicaco - Aguacatlán	11/06/2017	Manantial	678592	2189267	1905
9	Rancho Los Sauces	13/06/2017	Pozo	680863	2173551	2407
10	Pozo 29-Humeros	13/06/2017	Pozo reinyección	661880	2177836	2794
11	Pozo 38-Humeros	13/06/2017	Pozo reinyección	661866	2178110	2788
13	PGH4 Humeros	13/06/2017	Pozo	658264	2175116	2761
14	Huitzitzilapan	06/06/2017	Manantial	648880	2180326	2509
15	Tehuapan-San Miguel	06/06/2017	Manantial	645866	2179181	2436
16	La Olímpica	06/06/2017	Manantial	644457	2179520	2435
17	La Olímpica	06/06/2017	Manantial	644236	2179782	2345
18	Zacatepec, Villa del Carmen	08/06/2017	Pozo	653493	2131005	2363
19	Puchintoc	05/06/2107	Pozo	647263	2165018	2416
20	Sesder	07/06/2017	Manantial	640647	2178480	2205
21	Buenavista	06/06/2017	Manantial	633513	2183084	2392
22	San Miguel Barrientos	05/06/2107	Pozo	650030	2157135	2355
24	La Quinta	12/06/2017	Manantial	674704	2189494	1939
25	El Progreso	12/06/2017	Manantial	674627	2184327	1965

## 4.2 Colecta de muestras

Se realizó una colecta de muestras en el mes de junio 2017, siguiendo las recomendaciones de la Norma Oficial Mexicana NOM-230-SSA1-2002 y del manual APHA-AWWA-WPCF (1995) para cada uno de los parámetros indicados.

### *Toma de muestras para parámetros fisicoquímicos*

La toma de muestras se realizó en botellas de HDPE de 1L que se llenaron tratando de minimizar la presencia de aire con el objeto de evitar cambios químicos. Se marcó cada recipiente con la fecha y el sitio de muestreo y se siguió el procedimiento indicado en la normatividad mexicana (NOM-230-SSA1-2002).

En cada sitio se tomaron 2L de muestra que se trasladaron en una hielera para mantener una temperatura de 4°C durante su traslado al laboratorio. La temperatura, la conductividad eléctrica, el pH y el oxígeno disuelto fueron medidos *in situ* (APHA-AWWA-WPCF 1995).

### *Toma de muestras para metales pesados y arsénico*

Se utilizaron recipientes de HDPE de 120 mL previamente descontaminados de la siguiente manera: cada frasco con su tapa y contratapa se introdujeron en una solución de HNO<sub>3</sub> al 10% durante una semana, posteriormente se cambiaron a una solución de HNO<sub>3</sub> al 1% durante una semana; después se enjuagaron tres veces y se llenaron con agua desionizada. En el lugar de muestreo se utilizó una de estas botellas como blanco, vaciándola y volviéndola a llenar con agua desionizada, con el objeto de obtener datos referentes a posibles contaminantes locales adquiridos en el manejo de las muestras. Otra botella se vació y llenó con la muestra. Todas las botellas se marcaron con la fecha y el sitio de muestreo, se indicó de manera correcta el blanco. Las muestras se depositaron en una hielera para su traslado al laboratorio (Alfaro *et al.*, 2002; APHA-AWWA-WPCF, 1995).

### 4.3 Análisis de parámetros

En este trabajo se determinaron los parámetros fisicoquímicos tanto *in situ* (temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto) como en laboratorio (dureza y alcalinidad total,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  metales pesados y arsénico. Las técnicas de análisis que se utilizaron están basadas en la normatividad mexicana (DOF 1981; DOF 1981a; DOF 1987; DOF 2000; DOF 2001; DOF 2001a; DOF 2001b; DOF 2001d; DOF 2001e; DOF 2001f) y en el manual APHA-AWWA-WPCF (1995).

Las técnicas para la medición de temperatura, conductividad eléctrica, OD y pH *in situ* están basadas en el manual APHA-AWWA-WPCF (1995). En la determinación de los parámetros fisicoquímicos que se evaluaron en el laboratorio se utilizaron técnicas analíticas de potenciometría, volumetría y espectrometría de absorción atómica.

La determinación de arsénico y de metales pesados se realizó mediante ICP-MS.

El equipo que se utilizó en las pruebas de campo y de laboratorio se indica en la Tabla 3. El material que se utilizó para realizar los análisis fue el de uso común en el laboratorio.

Tabla 3. Equipo requerido para realizar las determinaciones de campo y laboratorio.

PARÁMETRO	EQUIPO
Fisicoquímicos ( <i>in situ</i> )	Termómetro de inmersión (Branan) Potenciómetro (Corning Checkmate II)
Fisicoquímicos (laboratorio)	Potenciómetro (Corning Checkmate II) Espectrofotómetro de absorción atómica (PerkingElmer Aanalyst 200)
Arsénico	Espectrómetro de Masas con fuente de Plasma de Acoplamiento Inductivo.

#### 4.4 Tipo de agua en la zona de estudio

La composición química del agua es el resultado de continuos procesos de interacción entre el agua de precipitación que se infiltra en el terreno y la litología por donde circula. Durante el trayecto del flujo subterráneo ocurren procesos hidrogeoquímicos como el intercambio iónico, reacciones ácido-base, procesos óxido-reducción, disolución, precipitación, posibles mezclas de aguas, reducción bacteriana y degradación (Deutsch, 1997; Morán *et al.*, 2013).

De acuerdo con la secuencia de Chevotareb, las aguas subterráneas de reciente infiltración comienzan siendo, según la condición de la naturaleza del medio sólido que determina la solubilidad y abundancia de elementos químicos, y el tiempo de reacción, en términos generales, según la concentración de aniones: bicarbonatadas, luego sulfatadas y finalmente cloruradas. Para los cationes; cálcicas, magnésicas y después sódicas, después de un largo tiempo de residencia, y por consecuencia del contacto del agua infiltrada con la roca, la composición de los iones se invierte (Arango *et al.*, 2008; Peña *et al.*, 2012).

La gran variedad de la composición química del agua y la búsqueda del entendimiento de la interacción entre el agua subterránea y los materiales rocosos que conforman el acuífero han generado diferentes técnicas para reportar los componentes químicos del agua (Peña *et al.*, 2012). La composición mayor de los iones presentes en el agua subterránea se utiliza para clasificar las aguas en diversos tipos, se basa en la concentración de cationes y aniones dominantes. Para representarlo de manera gráfica se utilizan los diagramas de Piper o diagramas trilineales. Este tipo de diagramas cualitativos permiten identificar el agua presente en familias de agua o facies hidrogeoquímicas, así como establecer la evolución hidrogeoquímica del agua subterránea (Deutsch, 1997; Morán *et al.*, 2013).

El diagrama de Piper o trilineal muestra las concentraciones relativas de los iones mayoritarios en porcentaje de meq/L, los cationes y aniones se representan en un triángulo respectivamente, y se proyectan a un punto en un cuadrilátero que representa los aniones y cationes, de esta manera se construye el diagrama de Piper (Deutsch, 1997). En este trabajo se utilizó el programa Triplot para la construcción de este diagrama y los diagramas Stiff, que son representaciones gráficas de análisis químicos utilizados para mostrar la principal composición de iones de una muestra de agua. Los iones son representados en meq/L y el resultado de los diagramas facilita la visualización la composición química que tiene cada sitio de muestreo.

## 4.5 Isótopos estables

La información química e isotópica sirve para determinar el origen de los fluidos geotérmicos, las temperaturas probables del reservorio y las características corrosivas o incrustantes principalmente.

Algunos de los isótopos de los elementos ligeros, es decir, con números atómicos pequeños, son estables, por lo que siempre permanecen con la configuración atómica que les es propia. Tal es el caso del  $^1\text{H}$  y del  $^2\text{H}$ ; este último conocido también como Deuterio (D). Otros, como el  $^3\text{H}$ , conocido también como Tritio (T) son inestables. Esto significa que su configuración atómica no puede permanecer y decaen o se transforman en otra configuración distinta. Al hacerlo, emiten radiación, que puede ser de tres tipos diferentes: partículas alfa, beta o gama (Giggenbach *et al.*, 2014). En este trabajo se analizaron el Deuterio y el Oxígeno-18.

Estos isótopos comparten ciertas propiedades, entre otras: son elementos ligeros, abundan en la naturaleza y su movilidad es grande dado que participan en muchas reacciones y cambios de fase. Esto los hace útiles como trazadores de los procesos naturales (Contreras *et al.*, 2012).

Las propiedades fisicoquímicas de los isótopos de un mismo elemento son semejantes, ya que la configuración electrónica de las moléculas es la misma. Sin embargo, debido a la diferencia de masa atómica la energía vibracional de las moléculas es diferente para cada isótopo, siendo ligeramente mayor para el isótopo de menor masa, por ejemplo, el  $^{16}\text{O}$  posee una energía vibracional mayor que el  $^{18}\text{O}$ . Como consecuencia, las propiedades fisicoquímicas varían ligeramente dentro los isótopos de un mismo elemento (Dafny *et al.*, 2006).

Así, la presión de vapor del D y del  $^{18}\text{O}$  es menor que la del H y del  $^{16}\text{O}$  por lo que, durante el proceso de evaporación, los isótopos ligeros (H y  $^{16}\text{O}$ ) cambian a fase vapor con una tasa proporcionalmente mayor que la de los isótopos pesados (D y  $^{18}\text{O}$ ), dando por resultado que, en fase vapor, habrá una proporción mayor de isótopos ligeros que en la fase líquida remanente. A este fenómeno se le conoce como “fraccionamiento isotópico” (Giggenbach *et al.*, 1983).

Los cambios de fase, las reacciones de precipitación y disolución y las de oxidación y reducción, son los principales procesos naturales en los que ocurre el fraccionamiento isotópico. Esto es, la proporción original de los isótopos ligeros y pesados de un mismo elemento varía en los productos resultantes del proceso, ya sea que se incremente la proporción de isótopo pesado a ligero (Portugal *et al.*, 1994).

Debido al fraccionamiento isotópico, la abundancia natural del  $^{18}\text{O}$  varía en los materiales naturales de la corteza terrestre. El agua de mar tiene un valor delta alrededor de cero ya que es el patrón de referencia. Las aguas continentales (aguas dulces) poseen, por lo general, valores negativos ya que se originan de la evaporación del agua de mar y, por lo tanto, están empobrecidas con  $^{18}\text{O}$  (Portugal *et al.*, 1994).

Cuando hablamos del contenido isotópico de una sustancia, llamamos isótopo pesado al átomo con la mayor masa atómica, por ejemplo, el Deuterio o el  $^{18}\text{O}$ , y llamamos isótopo ligero de menor masa, ejemplo  $^1\text{H}$  ó el  $^{16}\text{O}$ . A su vez, en un proceso hablamos de empobrecimiento o enriquecimiento del isótopo pesado al cambiar la sustancia de fase o cuando se produce una nueva; como ejemplo, cuando el agua se evapora, el vapor se empobrece de  $^{18}\text{O}$  y el agua remanente se enriquece con dicho isótopo (Arango *et al.*, 2008).

## CAPÍTULO V. RESULTADOS

### 5.1 Análisis de parámetros

Se realizó una colecta de 23 muestras en el mes de junio del 2017 para la cual se obtuvieron los siguientes resultados.

#### 5.1.1 Parámetros *in situ*

La Tabla 4 muestra los resultados obtenidos de temperatura (°C), pH, oxígeno disuelto (mg/L) conductividad eléctrica (µS/cm), alcalinidad total (meq/L) y sólidos disueltos totales (mg/L) de cada uno de los sitios de estudio representados en las Figuras 6 a 11.

Tabla 4. Resultados de parámetros fisicoquímicos *in situ*.

Sitio	Num. de muestra	T (°C)	pH	O <sub>2</sub> D. (mg/L)	E.C. (µS/cm)	Alcalinidad (meq/L)	SDT (mg/L)
Rancho Jardín Dorado-Pozo2	1	23.5	7.5	4.16	1,755	14.79	1,123.2
Rancho Jardín Dorado-Pozo1	2	25.1	7.25	3.27	1,871	13.59	1,197.44
Cofre de Perote m4 "El Conejo"	3	9.5	6.79	9.34	63.8	1.10	40.83
Mazapa 3	4	15	6.69	7.38	144.5	1.70	92.48
Mazapa	5	20	7.23	3.4	96.1	0.85	61.504
Zoatzingo-El Tesoro	6	15.6	6.71	5.48	104.1	1.35	66.624
Santa Rosalía	7	15.5	7.07	8.31	83.7	1.10	53.568
El Chicaco - Aguacatlán	8	18	7.6	6.92	122	1.00	78.08
Rancho Los Sauces	9	20.1	7.31	3.57	593	6.00	379.52
Pozo 29-Humeros	10	33.3	7.7	5.56	1,028	2.05	657.92
Pozo 38-Humeros	11	34.1	7.66	4.43	1,069	2.20	684.16
PGH4 Humeros	13	23.3	7.05	3.07	317	3.90	202.88
Huitzitzilapan	14	14.2	7.04	5.81	148	1.30	94.72
Tehuapan-San Miguel	15	16.8	7.04	6	602	6.50	385.28
La Olímpica 1	16	15.3	6.94	1.56	554	6.90	354.56
La Olímpica 2	17	14.6	7.04	4.45	503	6.00	321.92
Zacatepec, Villa del Carmen	18	18.4	6.73	1.66	1,871	13.14	1,197.44
Puchintoc	19	20	7.02	2.18	561	2.50	359.04
Sesder	20	20	7.11	3.1	603	4.60	385.92
Buenavista	21	17.9	6.31	2.08	201	1.80	128.64
San Miguel Barrientos	22	18.4	6.82	6.35	356	2.65	227.84
La Quinta	24	17	6.64	6.75	205	1.40	131.2
El Progreso	25	16.4	6.88	6.18	187	1.80	119.68

La temperatura más alta del agua se observó en los sitios 10 y 11 y la más baja en el sitio 3. No existe en la normatividad vigente para agua potable un límite permisible para la temperatura (Figura 4).

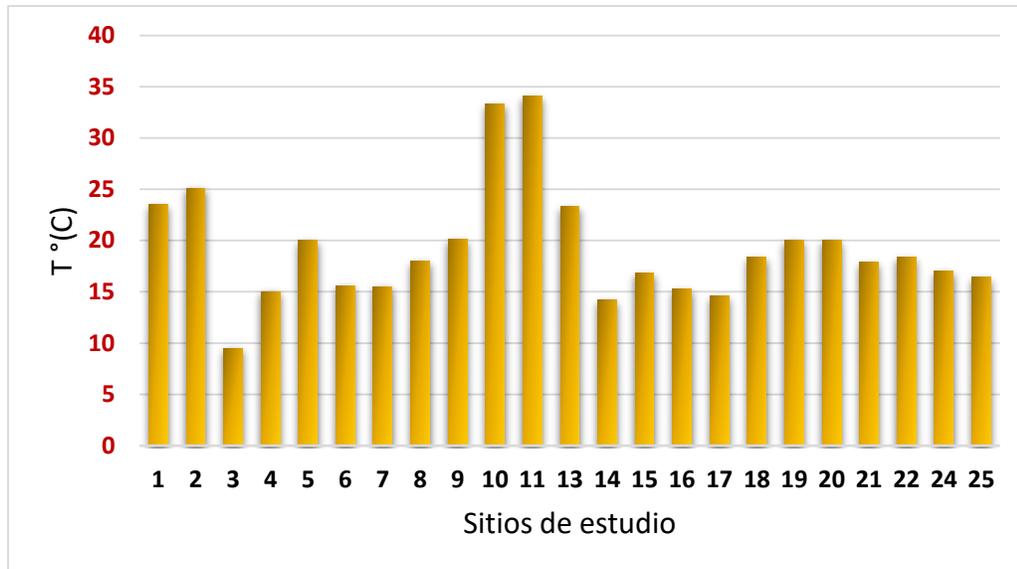


Figura 4. Valores de temperatura en los sitios de estudio.

El pH del agua tuvo variaciones entre 6.31 y 7.7; el sitio con el valor más bajo fue el sitio 21 y el que presentó el valor más alto fueron los sitios 10 y 11 (Figura 5).

Se presentan valores cercanos a la neutralidad en todos los sitios, en este rango se favorece la presencia de  $\text{HCO}_3^-$  y ausencia de  $\text{CO}_3^-$ .

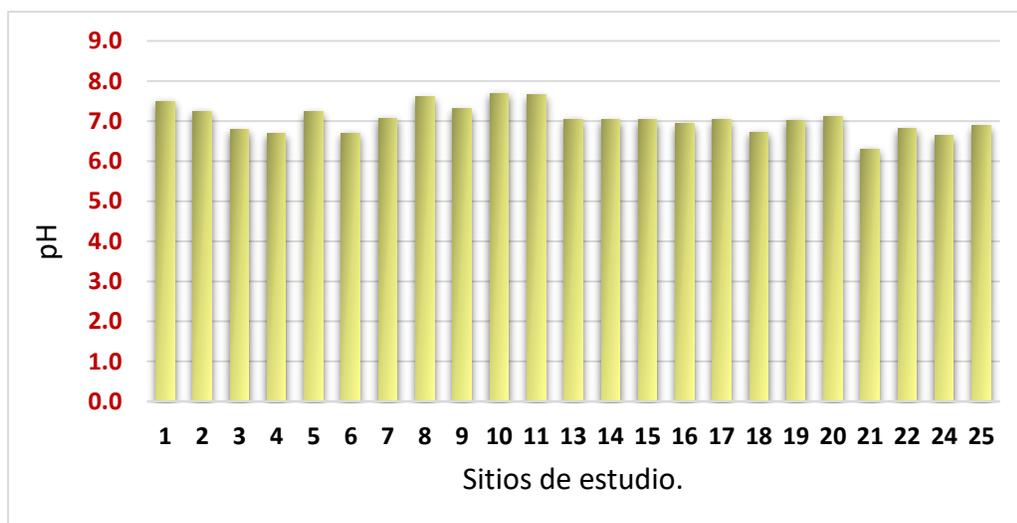


Figura 5. Valores de pH en los sitios de estudio.

Para el oxígeno disuelto (Figura 6), se observó la mayor concentración en el sitio 3 y la menor concentración en el sitio 16; se puede observar la relación inversa entre el oxígeno disuelto y la temperatura. La concentración de oxígeno disuelto afecta las reacciones en las que participan el hierro, manganeso, cobre y los compuestos que contienen nitrógeno.

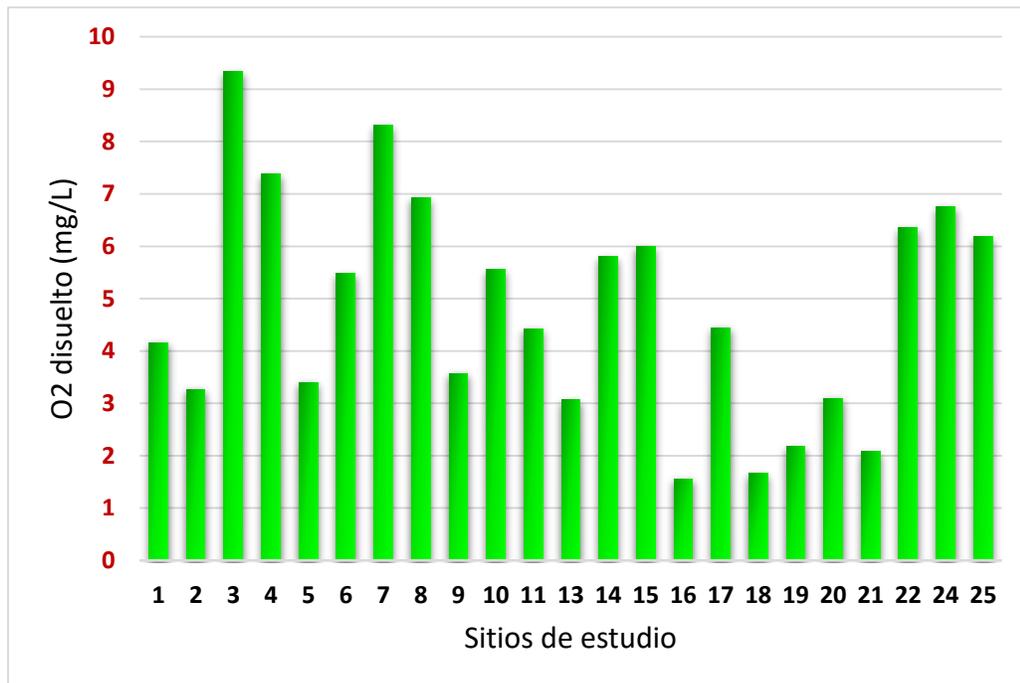


Figura 6. Valores de oxígeno disuelto en los sitios de estudio.

La conductividad eléctrica (Figura 7), presentó valores entre 63.8 y 1871  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . La muestra con el valor más bajo fue el sitio 3 y los valores más altos fueron los sitios 1, 2, 18, 10 y 11. Se comprueba que existe una relación entre las concentraciones iónicas y la conductividad eléctrica, lo que se observa en los resultados obtenidos en el presente trabajo (Figura 10).

Este parámetro indica la presencia de iones disueltos y su determinación es de gran importancia pues da una idea del grado de mineralización del agua.

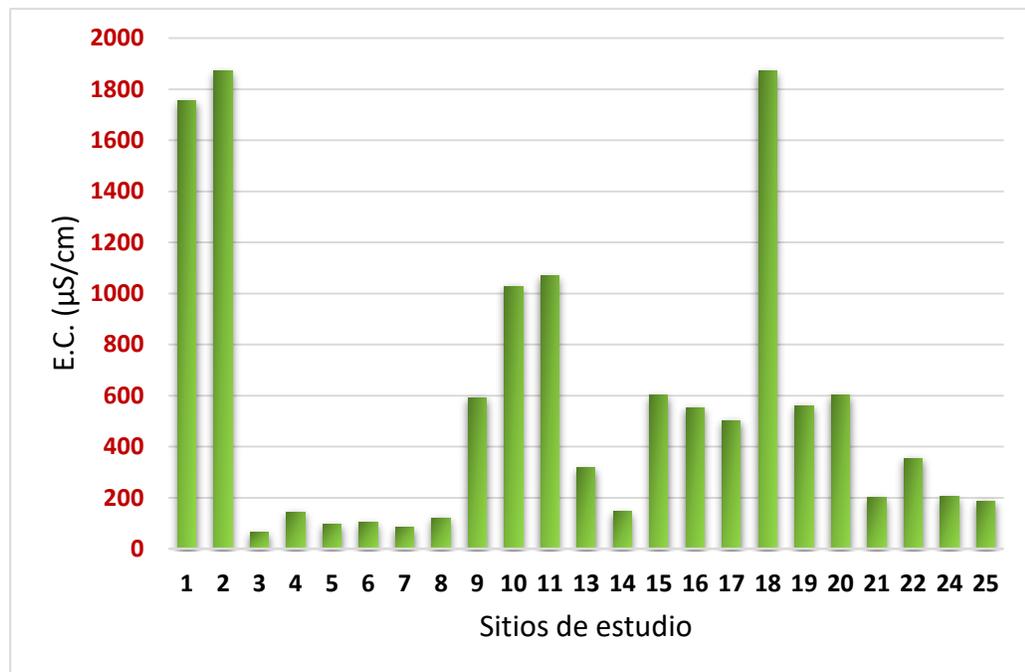


Figura 7. Valores de conductividad eléctrica en los sitios de estudio.

### 5.1.2 Parámetros fisicoquímicos

La determinación de los parámetros fisicoquímicos permite obtener información sobre la interacción entre el fluido y la matriz sólida, y puede aportar información sobre el transporte de contaminantes en el agua subterránea. En las Figuras 7 a 12 se pueden apreciar los resultados obtenidos para estos parámetros. Los resultados obtenidos no sobrepasan los límites establecidos en la normatividad correspondiente para agua potable, lo que puede indicar que el agua de todos los sitios es apta para este uso.

Para la alcalinidad total (Figura 8), se observa que el sitio Mazapa presenta el valor más bajo y Rancho Jardín Dorado pozo 2 el más alto. La alcalinidad se adquiere mediante la disolución de rocas básicas carbonatadas, que además aportan al medio hídrico cationes mayoritarios como  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (Rodríguez y Marín, 1999). En este estudio, se debe principalmente a la presencia de  $\text{HCO}_3^-$ , así como a los  $\text{OH}^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y  $\text{SiO}_3^{2-}$ .

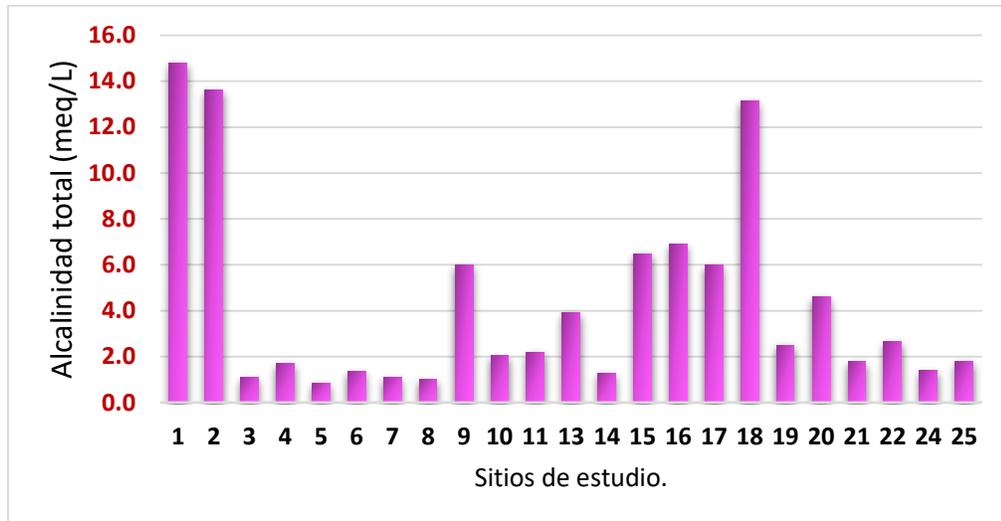


Figura 8. Valores de alcalinidad en los sitios de estudio.

En cuanto a los sólidos disueltos totales, se supera el límite máximo establecido por la normatividad para agua potable que es de 1,000 mg/L en los sitios 1, 2 y 18, encontrándose un valor mínimo de 40.83 mg/L en el sitio 3 (Figura 11).

La OMS menciona que las aguas con concentraciones menores a 600 mg/L de sólidos disueltos son buenas para consumo humano.

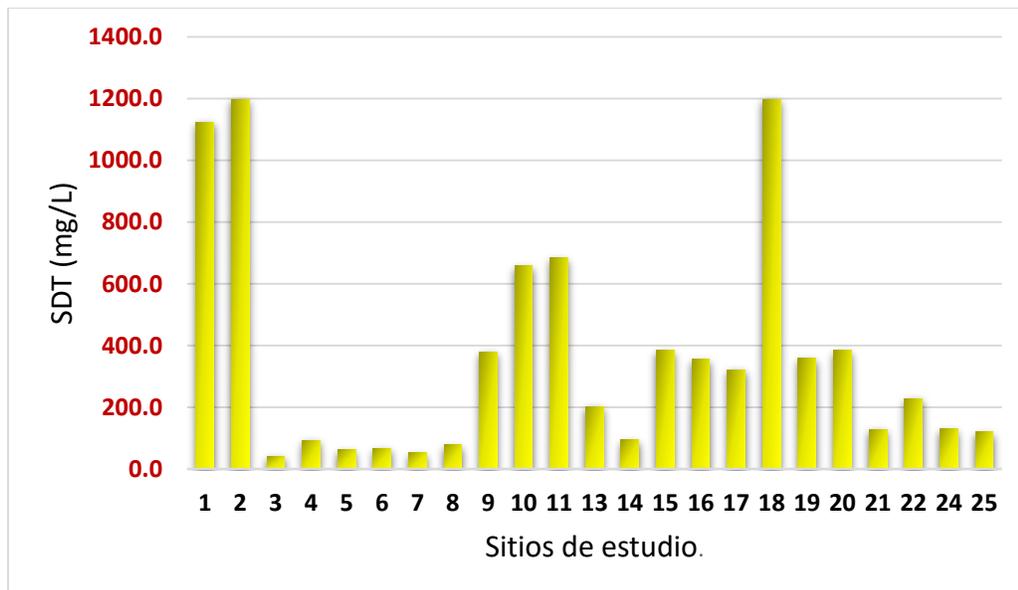


Figura 9. Valores de sólidos totales disueltos en los sitios muestreados.

La Figura 10 permite apreciar la relación entre la conductividad eléctrica, los sólidos disueltos totales y la alcalinidad total.

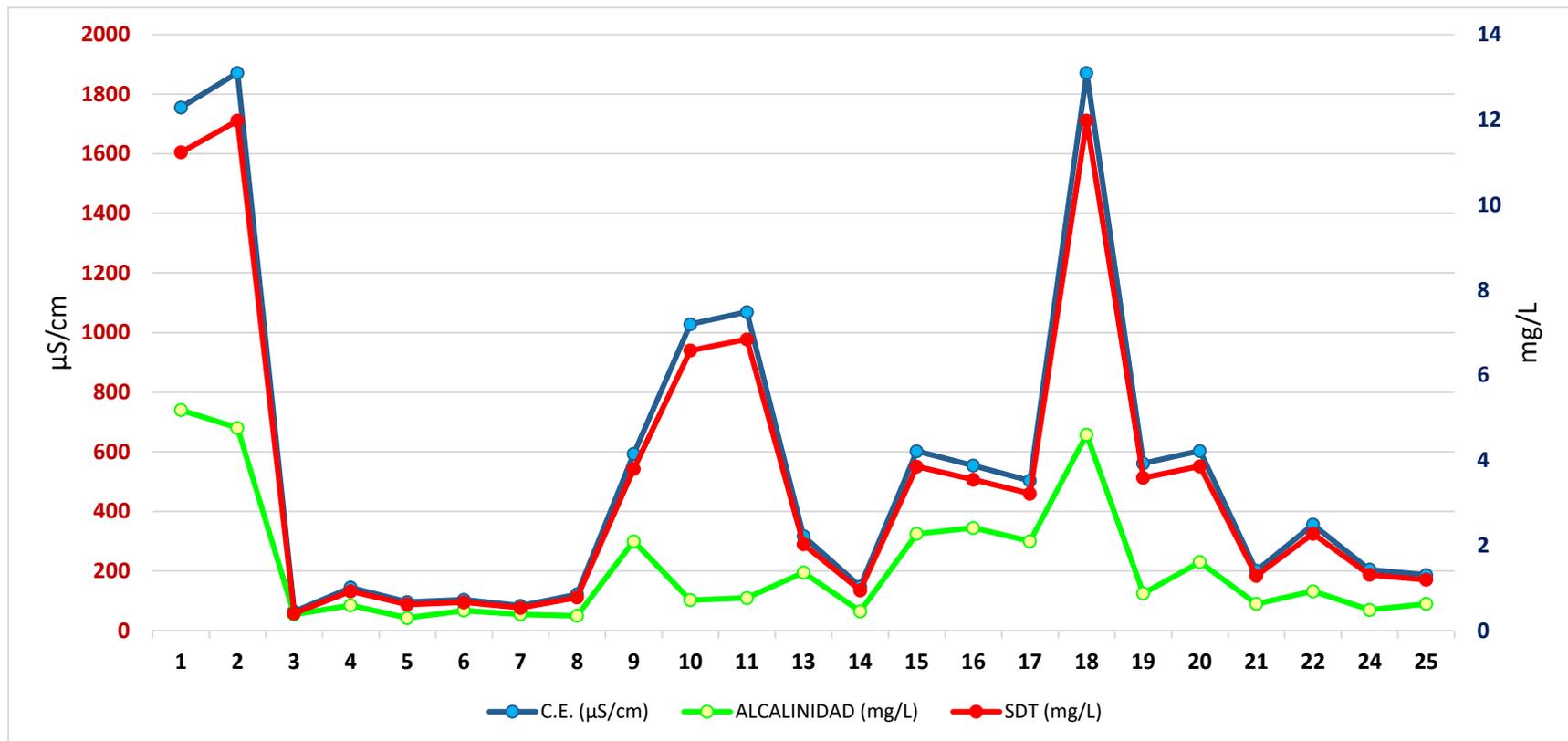


Figura 10. Relación entre la alcalinidad, la conductividad eléctrica y sólidos totales disueltos en los sitios de estudio.

### 5.1.2.1 Componentes mayores

En las Tablas 5 y 6 y Figuras 11 a 20 se presentan las concentraciones obtenidas de iones mayoritarios en los 23 sitios de estudio.

Tabla 5. Concentración de cationes en los sitios de estudio.

Sitio	Num. de muestra	Concentración (mg/L)			
		Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
Rancho Jardín Dorado-Pozo2	1	69.45	28.83	261.15	81.92
Rancho Jardín Dorado-Pozo1	2	71.49	25.23	188.43	82.13
Cofre de Perote m4 "El Conejo"	3	9.81	7.04	6.33	2.32
Mazapa 3	4	22.86	14.64	7.31	5.09
Mazapa	5	7.68	6.80	6.17	2.28
Zoatzingo-El Tesoro	6	15.27	10.21	8.19	2.52
<i>Santa Rosalía</i>	7	8.88	5.84	10.70	2.50
El Chicaco - Aguacatlán	8	13.23	9.07	9.04	5.10
Rancho Los Sauces	9	24.49	12.69	85.03	22.61
Pozo 29-Humeros	10	4.23	15.36	88.75	0.51
Pozo 38-Humeros	11	3.55	16.14	98.62	0.49
PGH4 Humeros	13	40.01	5.94	30.36	10.83
Huitzitzilapan	14	7.74	5.40	4.89	1.46
Tehuapan-San Miguel	15	72.29	46.98	2.77	1.61
La Olímpica 1	16	177.48	109.78	6.53	5.34
La Olímpica 2	17	122.74	91.77	7.64	4.83
Zacatepec, Villa del Carmen	18	336.97	200.21	72.61	97.90
Puchintoc	19	55.90	39.15	20.29	5.17
Sesder	20	93.12	60.19	21.80	4.79
Buenavista	21	28.34	18.55	12.83	8.39
San Miguel Barrientos	22	26.41	19.34	21.71	8.76
La Quinta	24	20.04	16.85	9.41	8.36
El Progreso	25	27.55	17.67	11.05	10.38

Tabla 6. Concentración de aniones en los sitios de estudio.

Sitio	Num. de muestra	Concentración (mg/L)					
		F <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
Rancho Jardín Dorado-Pozo2	1	<0.05	210.3	0.95	3.43	24.74	901.37
Rancho Jardín Dorado-Pozo1	2	<0.05	197.9	0.81	1.96	21.31	828.86
Cofre de Perote m4 "El Conejo"	3	0.77	<0.25	<0.25	<0.25	1.39	67.08
Mazapa 3	4	0.62	4.75	<0.25	20.46	10.56	103.67
Mazapa	5	0.48	1.48	<0.25	3.67	1.68	51.81
Zoatzingo-El Tesoro	6	0.7	1.37	<0.25	13.77	5.3	82.33
<i>Santa Rosalía</i>	7	0.9	0.99	<0.25	4.16	3.09	67.06
El Chicaco - Aguacatlán	8	0.85	4.32	<0.25	16	6.29	60.88
Rancho Los Sauces	9	<0.05	35.11	0.49	3.2	16.9	365.63
Pozo 29-Humeros	10	<0.05	34.63	<0.25	<0.25	264.5	124.74
Pozo 38-Humeros	11	<0.05	39.37	<0.25	<0.25	265.6	133.89
PGH4 Humeros	13	<0.05	1.16	<0.25	<0.25	9.13	237.77
Huitzitzilapan	14	0.06	1.91	<0.25	6.27	4.74	79.26
Tehuapan-San Miguel	15	0.06	2.59	<0.25	<0.25	37.8	396.28
La Olímpica 1	16	0.09	2.45	<0.25	<0.25	12.12	420.72
La Olímpica 2	17	0.06	5.58	<0.25	0.54	28.22	365.80
Zacatepec, Villa del Carmen	18	0.17	86	<0.25	<0.25	445.2	801.93
Puchintoc	19	0.05	28.14	<0.25	120.2	25.38	152.42
Sesder	20	0.11	3.3	<0.25	0.77	11.94	280.42
Buenavista	21	0.09	2.93	<0.25	0.62	17.19	109.79
San Miguel Barrientos	22	0.05	7.13	<0.25	36.46	10.55	161.60
La Quinta	24	1.81	7.22	<0.25	29.37	17.69	85.38
El Progreso	25	1.93	3.84	<0.25	14.72	19.97	109.76

Las concentraciones de Ca<sup>2+</sup> (Figura 11) se presentan en valores que van desde 3.55 mg/L en el pozo 38-Humeros hasta 336.97 mg/L en el sitio Zacatepec, Villa del Carmen. Se observa que en los pozos re inyectores del campo geotérmico las concentraciones de Ca<sup>2+</sup> son las más bajas en relación a los demás sitios.

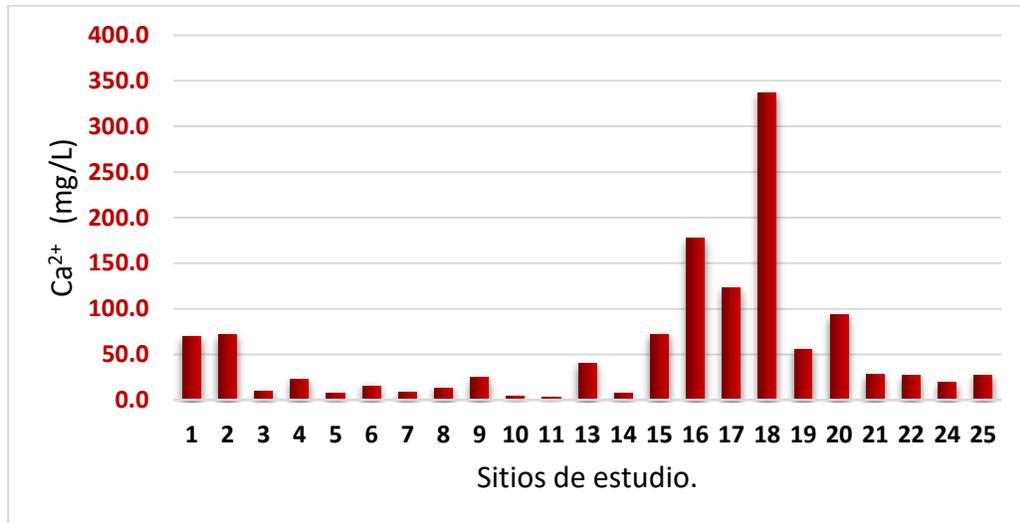


Figura 11. Valores de Ca<sup>2+</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

El Mg<sup>2+</sup> se presenta en valores que van desde 0.49 mg/L en el sitio 11 y hasta 97.9 mg/L en el sitio 18. Este catión también presenta las concentraciones más bajas en los sitios 10 y 11 (Figura 12).

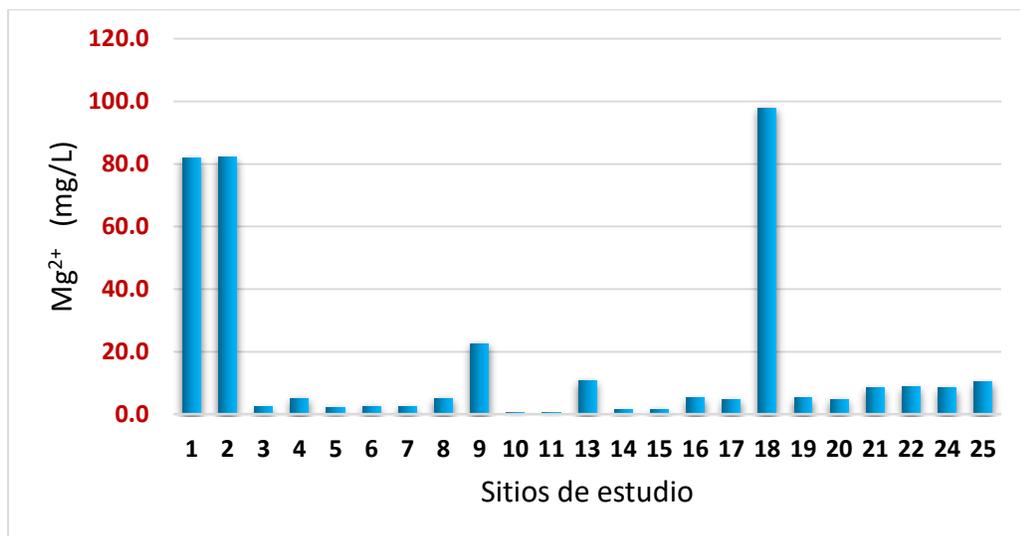


Figura 12. Valores de Mg<sup>2+</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

En cuanto al sodio (Figura 13), el valor mínimo encontrado es de 2.77 mg/L en sitio 15 y el valor más alto fue 261.15 mg/L en el sitio 2.

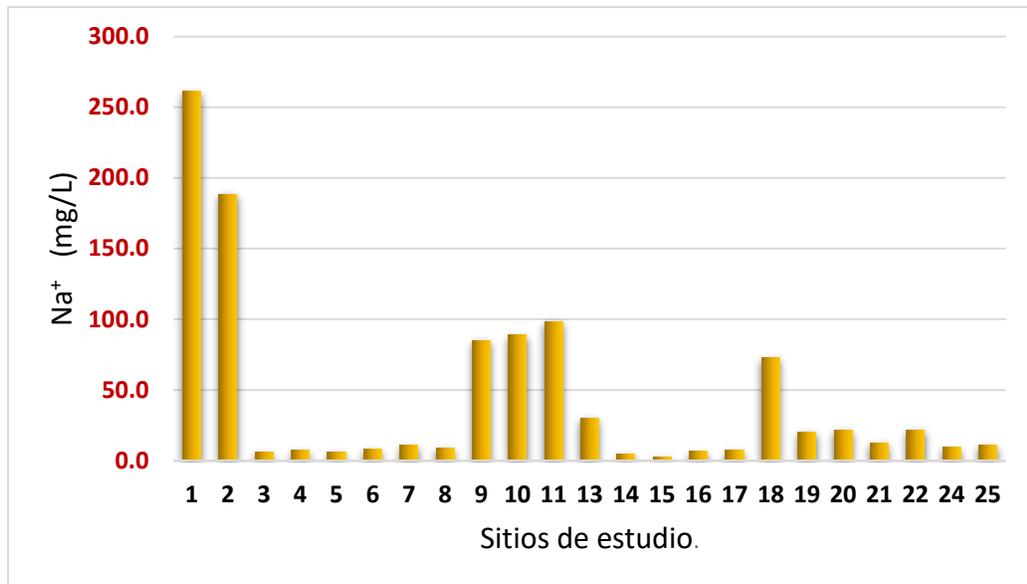


Figura 13. Valores de Na<sup>+</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

El potasio presentó el valor más bajo en el sitio 14 con 5.4 mg/L y el valor más alto en el sitio 18 con 200.21 mg/L (Figura 14).

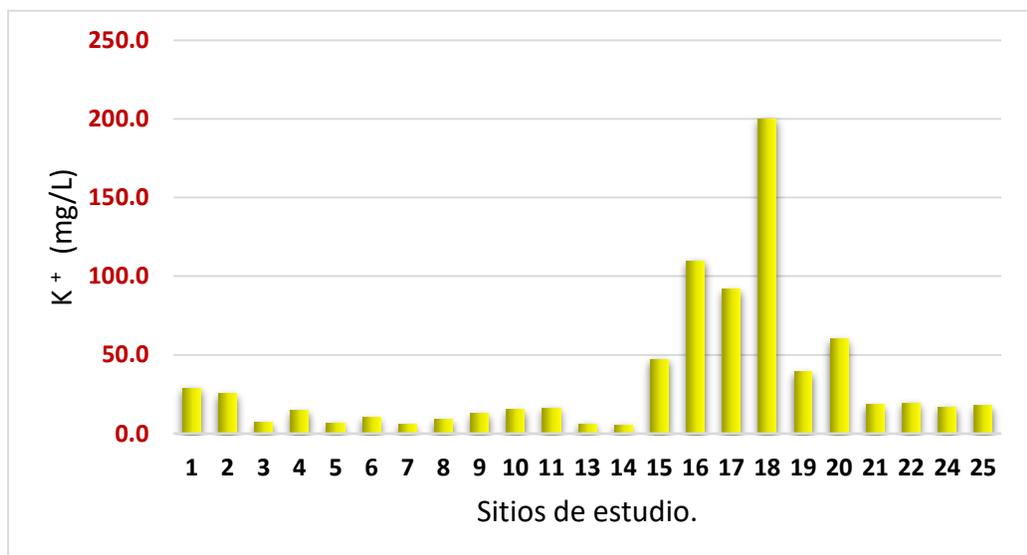


Figura 14. Valores de K<sup>+</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

Para el  $\text{HCO}_3^-$  (Figura 15), se observa que el sitio 1 presenta las concentraciones más altas con 901.37 mg/L, mientras que con 51.81 mg/L el sitio 5 presenta las concentraciones más bajas. Los bicarbonatos predominaron en todas las muestras debido a que los carbonatos sólo se forman en aguas cuyo pH es superior a 8.3.

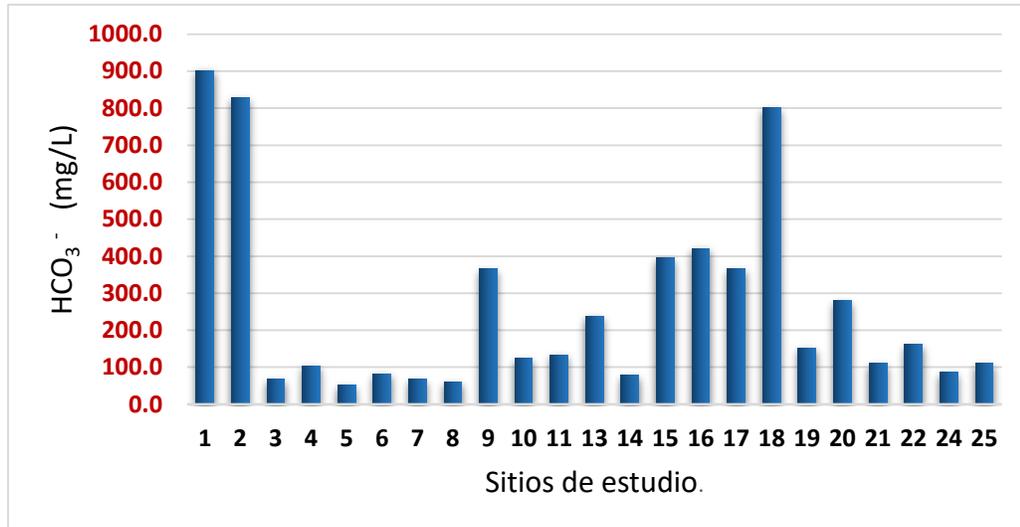


Figura 15. Valores de  $\text{HCO}_3^-$  en los sitios de estudio.

Los sulfatos (Figura 16) se presentan en mayor concentración en el sitio 18 con 445.2 mg/L, esto puede ser debido a que cerca de ese sitio hay establos con gran cantidad de vacas pudiendo estas influir con las altas concentraciones; y la concentración menor fue 1.4 mg/L en el sitio 3. Se observa que las concentraciones de los sitios 10 y 11 son mayores con respecto a los demás.

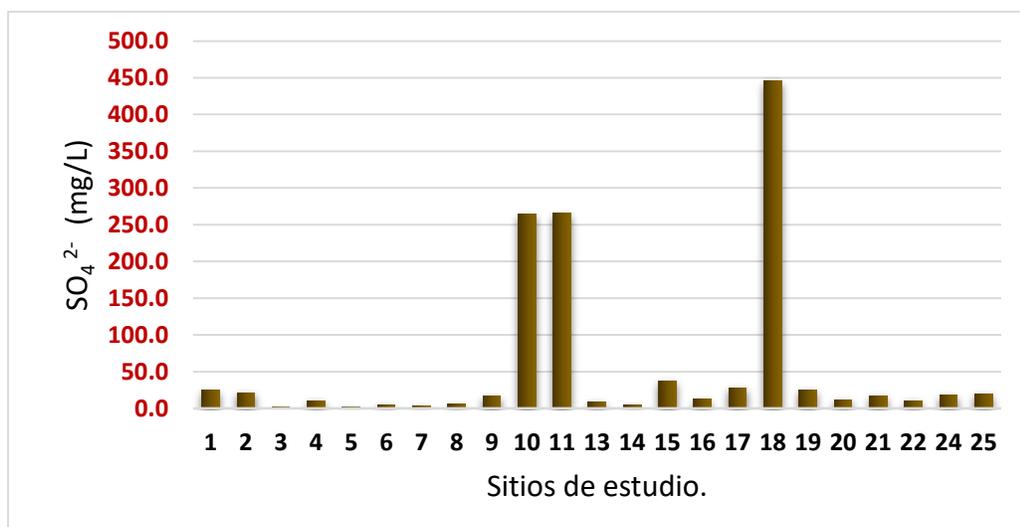


Figura 16. Valores de  $\text{SO}_4^{2-}$  en los sitios de estudio.

Para las concentraciones de cloruros (Figura 17), se tiene la concentración mayor en el sitio 2 con 210.29 mg/L y la menor concentración en el sitio 7 con 0.99 mg/L. No se detectó este anión en el sitio 3.

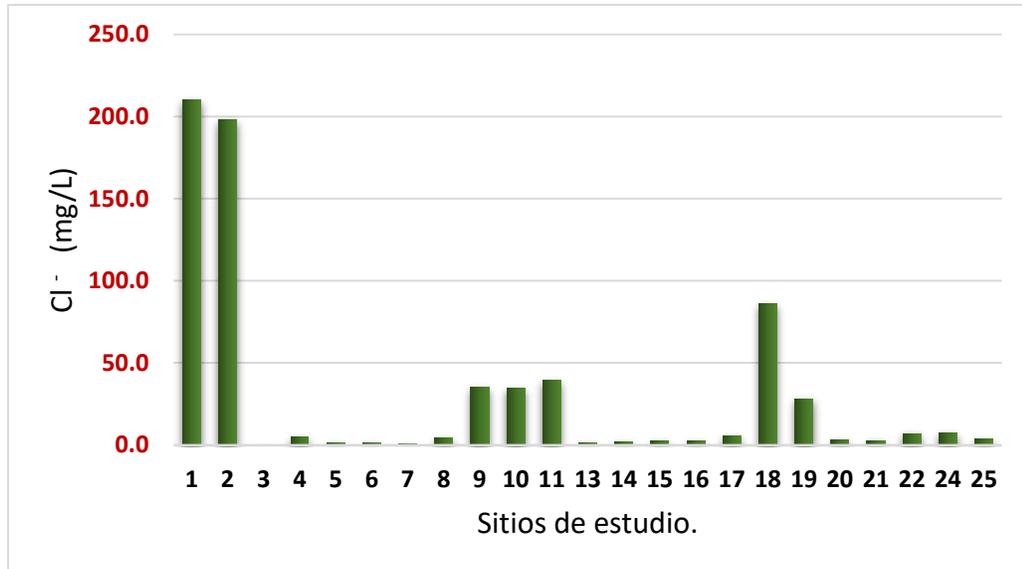


Figura 17. Valores de Cl<sup>-</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

El bromo solo se detectó en 3 sitios teniendo un valor máximo en el sitio 1 con 0.95 mg/L y el valor mínimo con 0.49 mg/L en sitio 7. Figura 18.

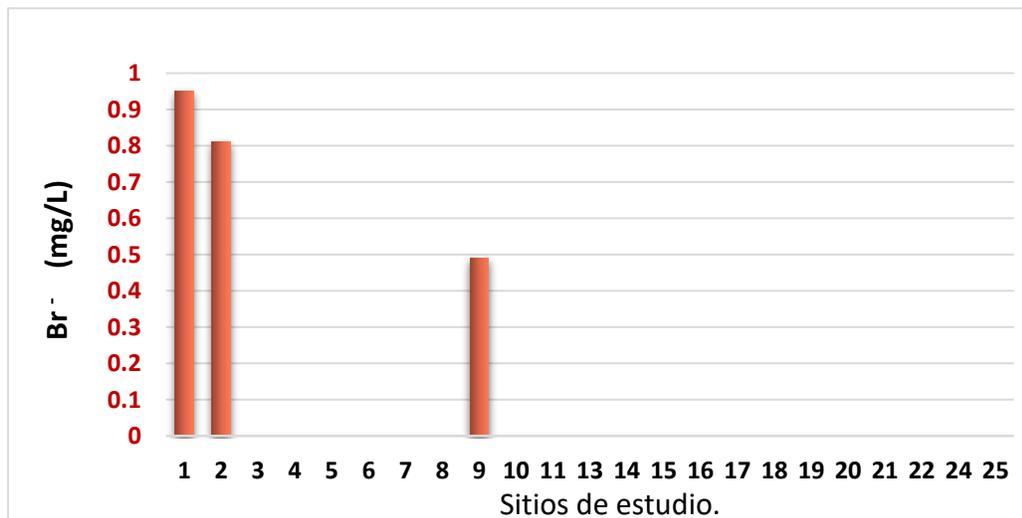


Figura 18. Valores de Br<sup>-</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

En cuanto a los nitratos, se observa que el valor más bajo se obtuvo en el sitio 17 con 0.5 mg/L y el valor más alto con 120.2 mg/L se registró en el sitio 19 (Figura 21).

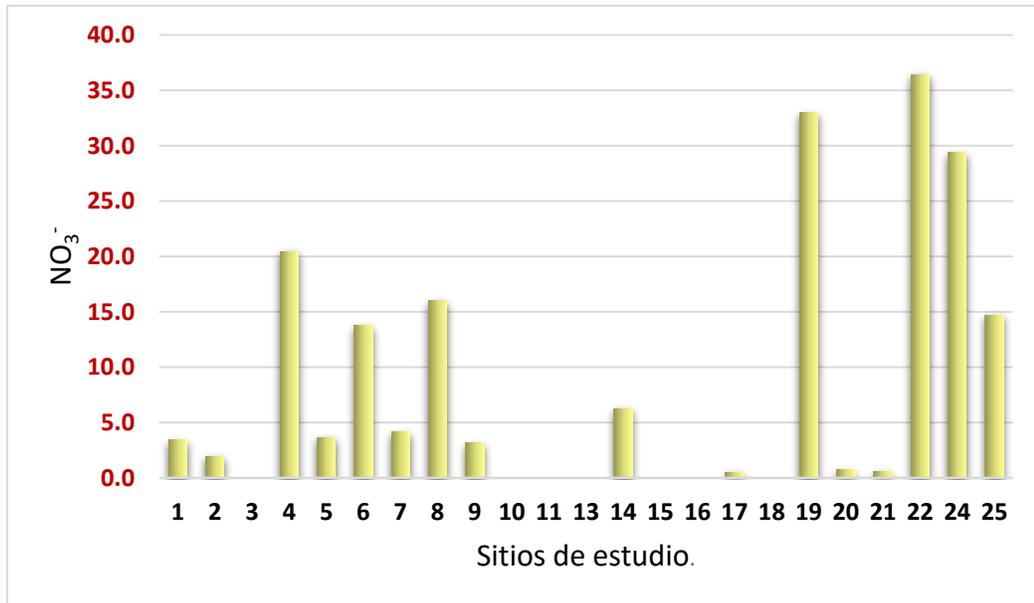


Figura 21. Valores de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

En cuanto a los fluoruros, se observan concentraciones de 0.05 a 1.93 mg/L, las concentraciones máximas se observan en el sitio 25 y las más bajas en los sitios 19 y 22 (Figura 22).

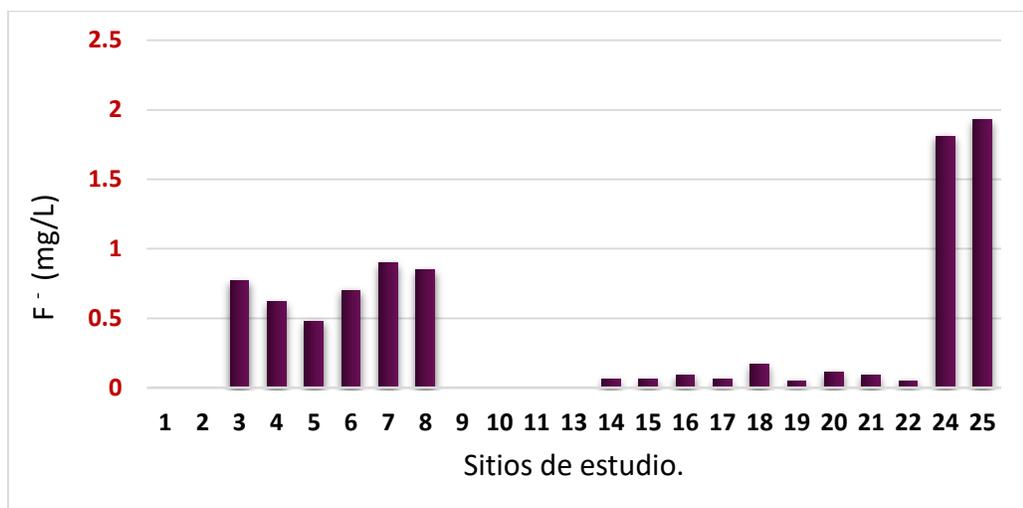


Figura 22 Valores de F<sup>-</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

Con respecto a las concentraciones encontradas de cationes y aniones, se observó el siguiente orden en la mayoría de los sitios de estudio:  $\text{Ca}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$  y  $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{F}^-$ , por lo que se puede suponer la formación de  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  y/o  $\text{NaHCO}_3$ , lo cual ayuda a predecir el tipo de agua en la zona y se refleja al construir el diagrama de Piper (Figura 39).

Se observa que existe una relación en las concentraciones de los 4 cationes, a excepción de los pozos re inyectores donde el catión predominante es el  $\text{Na}^+$ , Figura 23.

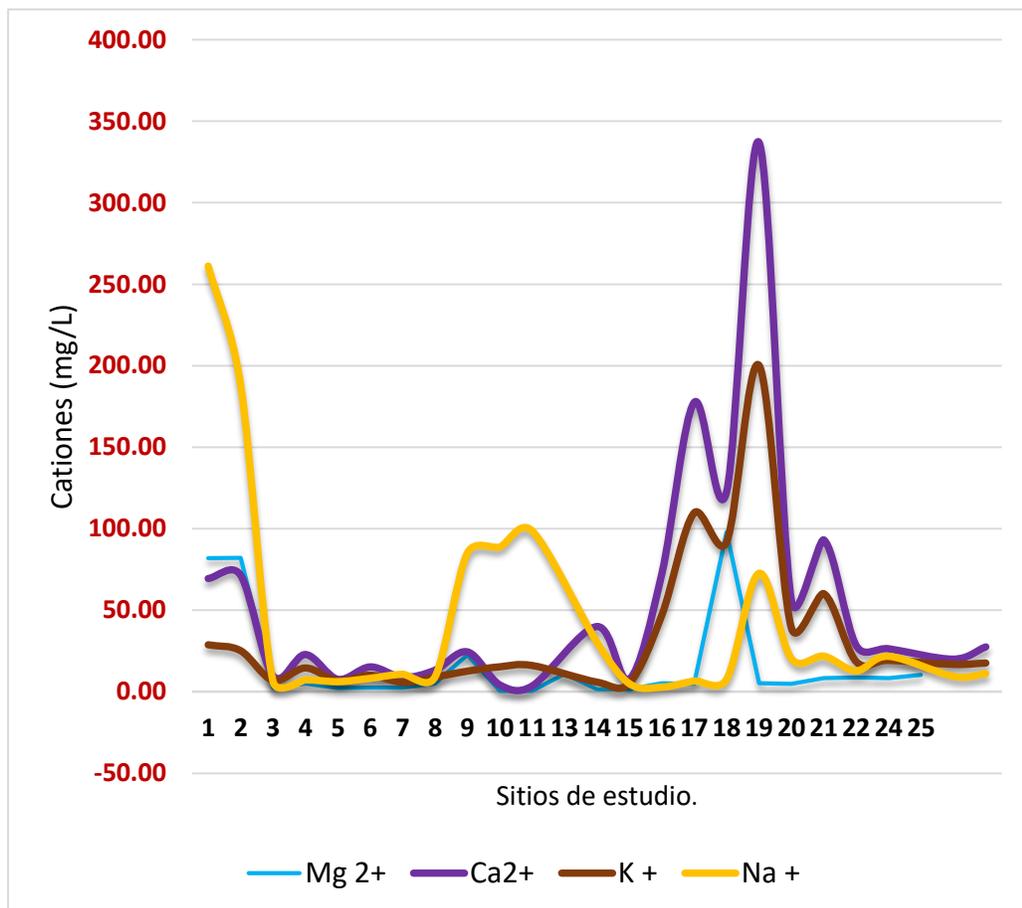


Figura 23. Relación de concentración de cationes<sup>-</sup> (mg/L) en los sitios de estudio.

### 5.1.3 Metales pesados

Se determinaron los metales pesados mediante ICP-MS, los resultados obtenidos se muestran en el Anexo 3. Se modeló la especiación química de los elementos traza más abundante: As, Cu, Fe, Mn, Pb. Las concentraciones se presentan en la Tabla 7. Se observa que algunos resultados superan los límites máximos establecidos por la normatividad mexicana correspondiente para agua potable (NOM-127-SSA1-2000).

Tabla 7. Concentración de elementos traza ( $\mu\text{g/L}$ ).

Sitio	Num. de muestra	As	Cu	Fe	Mn	Pb
Rancho Jardín Dorado-Pozo2	1	4.04	16.205	67.978	84.701	19.915
Rancho Jardín Dorado-Pozo1	2	3.165	8.171	107.03	5.273	48.84
Cofre de Perote m4 "El Conejo"	3	0.175	1.793	37.067	3.314	7.715
Mazapa 3	4	0.174	2.427	24.336	1.408	12.02
Mazapa	5	0.168	4.105	230.78	13.288	6.468
Zoatzingo-El Tesoro	6	0.282	6.715	59.71	3.329	22.411
<i>Santa Rosalía</i>	7	0.206	2.638	60.067	1.957	14.68
El Chicaco - Aguacatlán	8	1.861	2.867	39.165	2.524	13.028
Rancho Los Sauces	9	3.41	3.62	74.559	3.025	12.394
Pozo 29-Humeros	10	4429.5	8.683	233.8	15.187	18.55
Pozo 38-Humeros	11	5044.7	4.509	308.05	20.91	8.818
PGH4 Humeros	13	3.513	3.562	44.518	1.829	4.702
Huitzitzilapan	14	0.078	3.013	9.387	1.816	19.999
Tehuacan-San Miguel	15	0.158	5.198	22.923	2.864	38.16
La Olímpica 1	16	0.556	3.972	13.482	2.066	25.357
La Olímpica 2	17	0.754	7.525	39.853	3.691	45.485
Zacatepec, Villa del Carmen	18	N.D.	2.701	3948.8	141.02	11.707
Puchintoc	19	0.306	2.561	8.66	2.087	17.333
Sesder	20	2.179	1.706	83.993	2.54	11.374
Buнавista	21	0.84	7.099	511.56	201.41	29.253
San Miguel Barrientos	22	2.11	4.168	22.712	1.823	14.236
La Quinta	24	0.463	6.217	43.445	3.23	34.268
El Progreso	25	0.21	2.455	26.947	1.707	10.851
<b>NOM-127-SSA1-1994 (<math>\mu\text{g/L}</math>)</b>		25	2000	300	150	25

N.D.: No detectado, por debajo de los límites de detección del equipo.

El arsénico (Figura. 24) se detectó en mayor concentración en los sitios 10 y 11, que corresponden a los pozos re inyectores con 4,429.48 y 5,044.72  $\mu\text{g/L}$  respectivamente. Las concentraciones de arsénico en los sitios mencionados se deben a que el agua proviene de los reservorios geotérmicos.

Existe una relación química entre As y  $\text{F}^-$  que sugiere una co-ocurrencia de estos elementos en la naturaleza. Se recomienda hacer monitoreo de estas dos especies químicas en las aguas subterráneas, con el propósito de observar el comportamiento de ambos elementos dentro del acuífero, especialmente como indicadores cuando el uso de la tierra cambia y la demanda de agua subterránea aumenta (Reyes *et al.*, 2013; Iris *et al.*, 2017).

Las concentraciones de los sitios 10 y 11 no se muestran en la Figura 24 ya que estas son aproximadamente 100 veces mayores a las de los demás sitios.

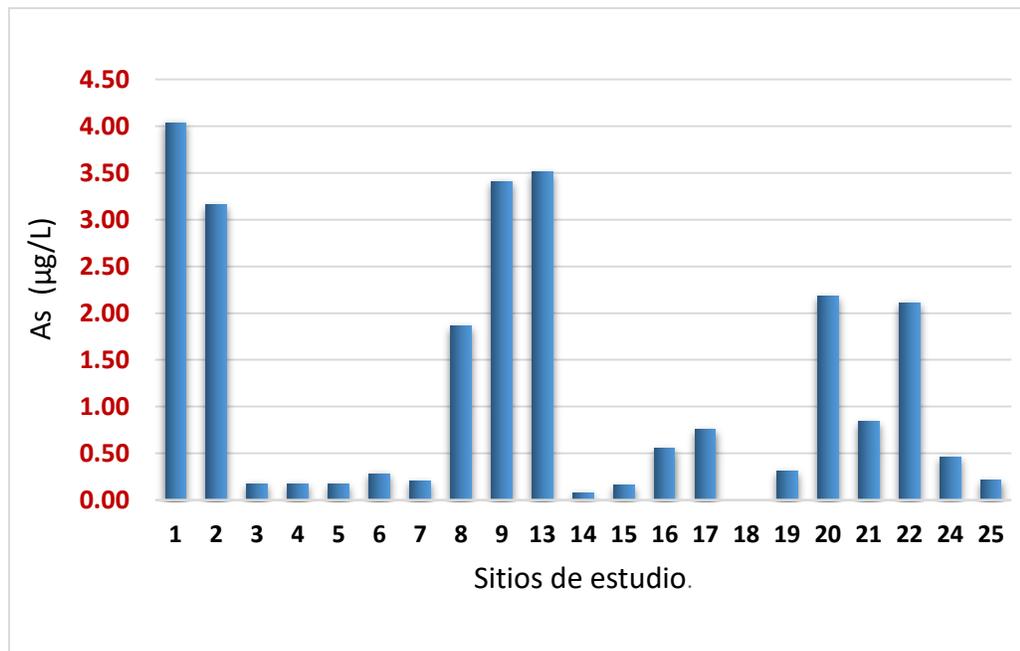


Figura 24. Concentraciones de As para los sitios de estudio.

Para el cobre, se observa que todos los datos están dentro de la especificación de la NOM-127-SSA1-2000 que es 2000  $\mu\text{g/L}$  (Figura 25).

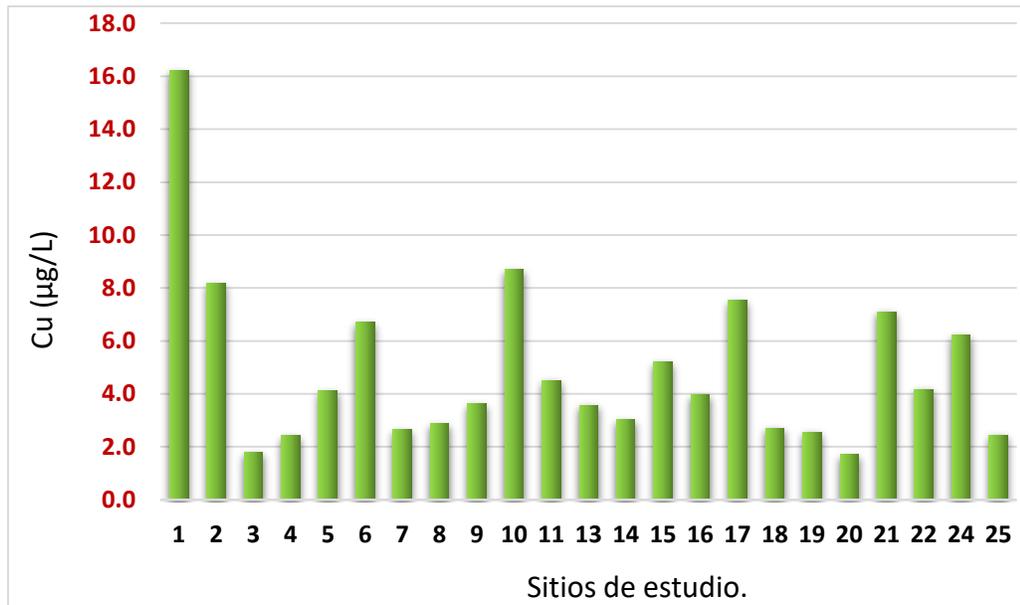


Figura 25. Concentraciones de Cu para los sitios de estudio.

El hierro presentó valores fuera de la Norma (300  $\mu\text{g/L}$ ) para agua potable en el sitio 21 con 511.6  $\mu\text{g/L}$  y en el sitio 18 con 3948.8  $\mu\text{g/L}$  (máximo), este último no se colocó en la Figura 29.

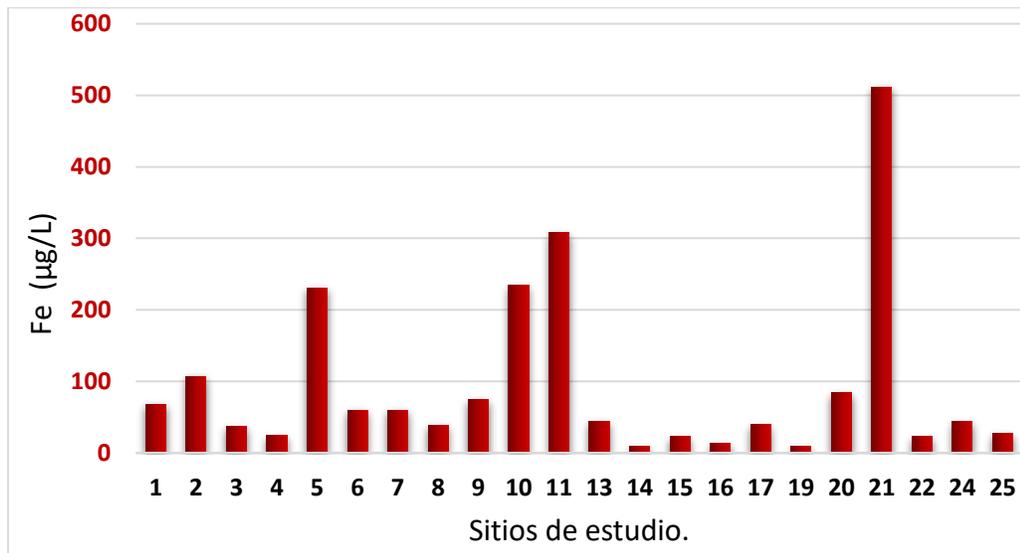


Figura 26. Concentraciones de Fe para los sitios de estudio.

El manganeso sobrepasó el límite máximo permisible (150  $\mu\text{g/L}$ ) para agua potable en el sitio 21 con 201.4 $\mu\text{g/L}$  (Figura 27).

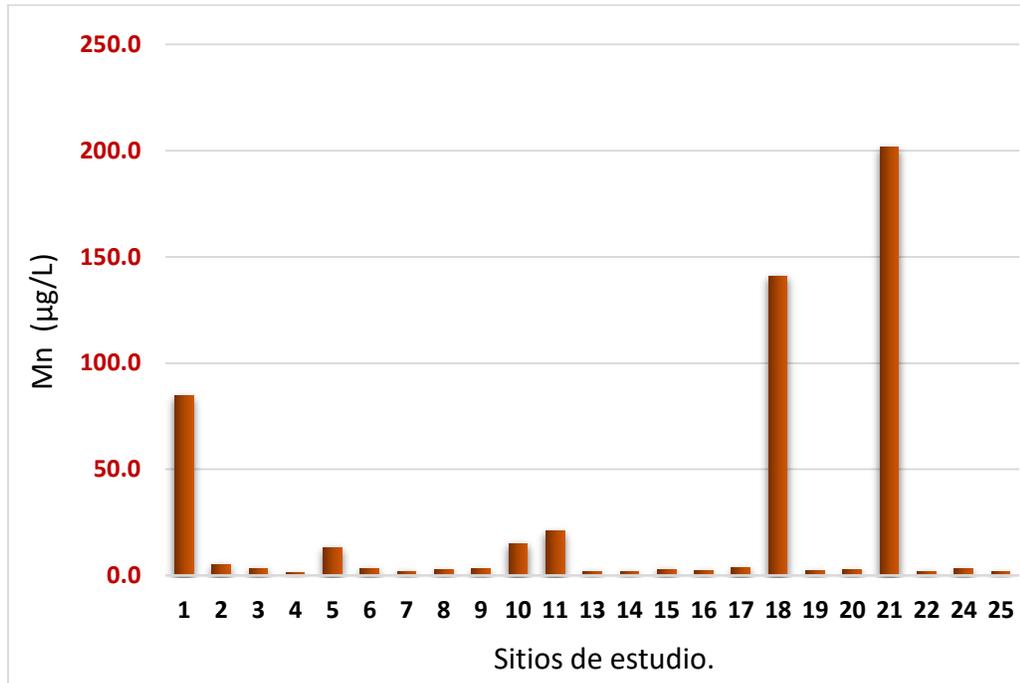


Figura 27. Concentraciones de Mn para los sitios de estudio.

Las concentraciones de plomo que sobrepasaron la normatividad para agua potable (25  $\mu\text{g/L}$ ) se encontraron en el sitio 2 con 48.84, sitio 15 con 38.20, sitio 16 con 25.40, sitio 21 con 29.25 y sitio 24 con 34.27  $\mu\text{g/L}$  (Figura 28).

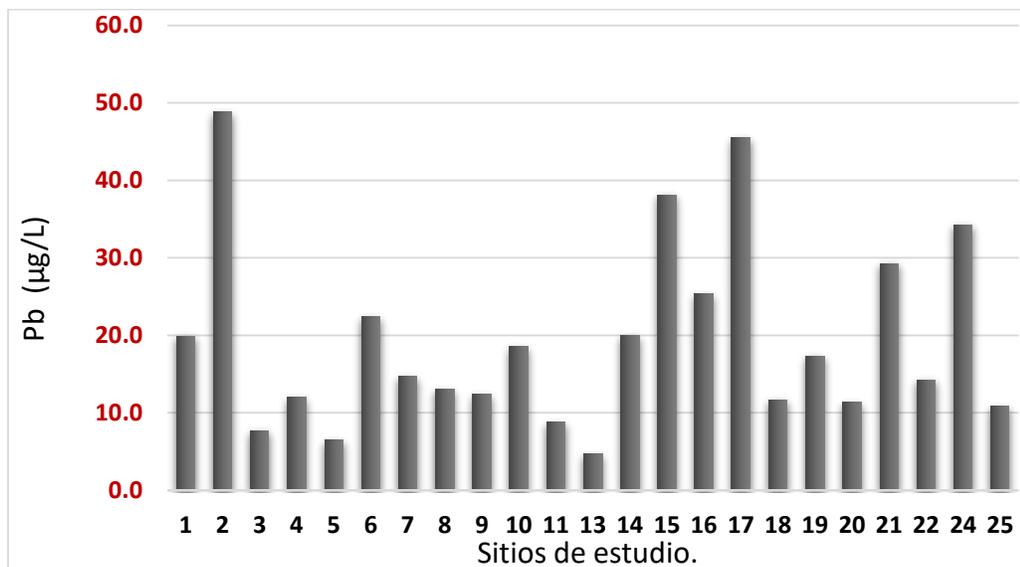


Figura 28. Concentraciones de Pb para los sitios de estudio.

### 5.1.4 Especiación química

La especiación química se realizó con el programa Visual MINTEQ (versión 3.0) para As, Fe, Cu, Mn y Pb.

Las Figuras 29 y 30 representan la forma química en la que se encuentra el As en los sitios de estudio. Se observa la presencia de As (V), siendo  $\text{H}_2\text{AsO}_4^-$  y  $\text{HAsO}_4^{2-}$  los predominantes, a excepción de los sitios 10 y 11 donde también se encuentra  $\text{AsO}_4^{3-}$ .

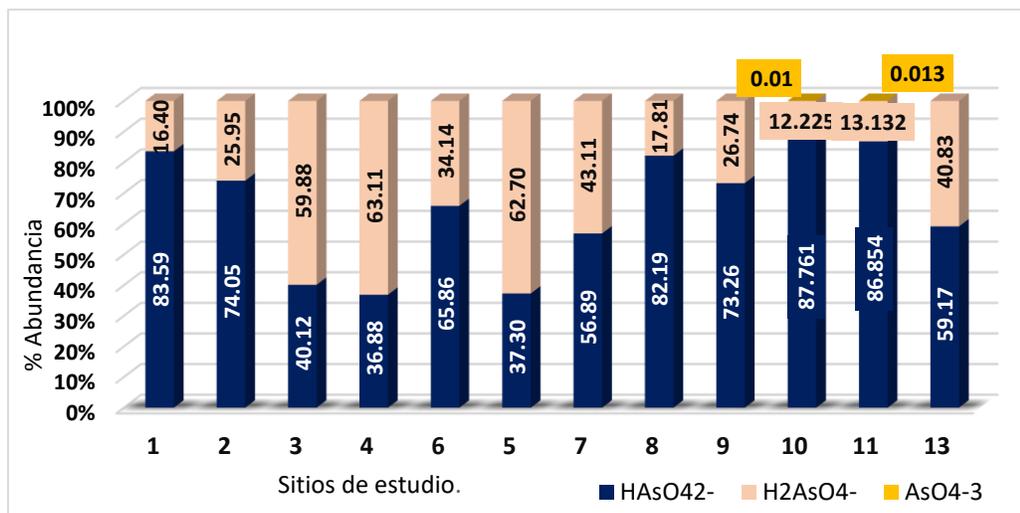


Figura 29. Especiación química de As para los sitios de estudio.

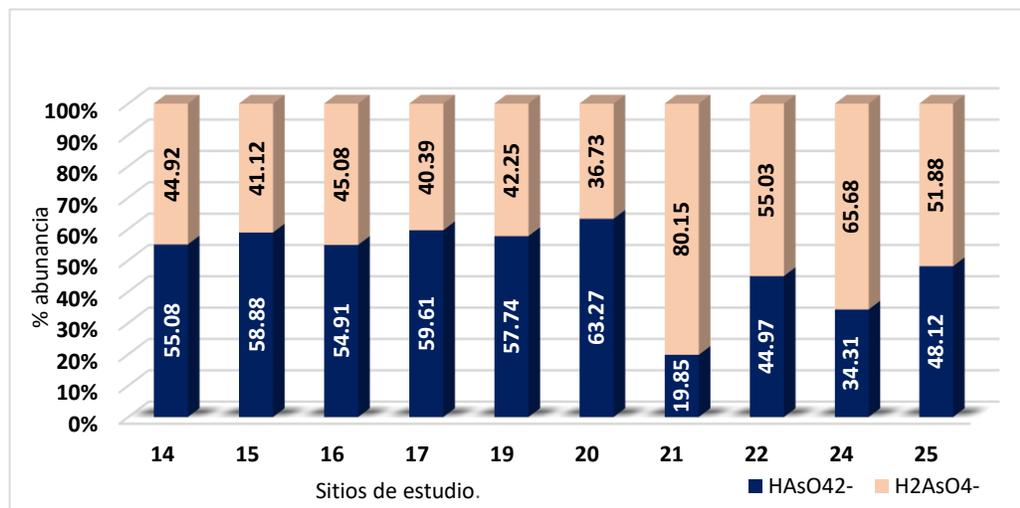


Figura 30. Especiación química de As para los sitios de estudio.

Las Figuras 31 y 32 representan la especiación química del cobre, siendo las especies predominantes  $\text{CuCO}_3(\text{aq})$  y  $\text{Cu}^{2+}$ , además de  $\text{CuOH}^+$  y  $\text{Cu}(\text{CO}_3)_2^{2-}$  en menor proporción. Se observa que para los sitios 24 y 25 se encuentra presente el  $\text{CuF}^+$  que coincide con los datos de mayor concentración de  $\text{F}^-$ .

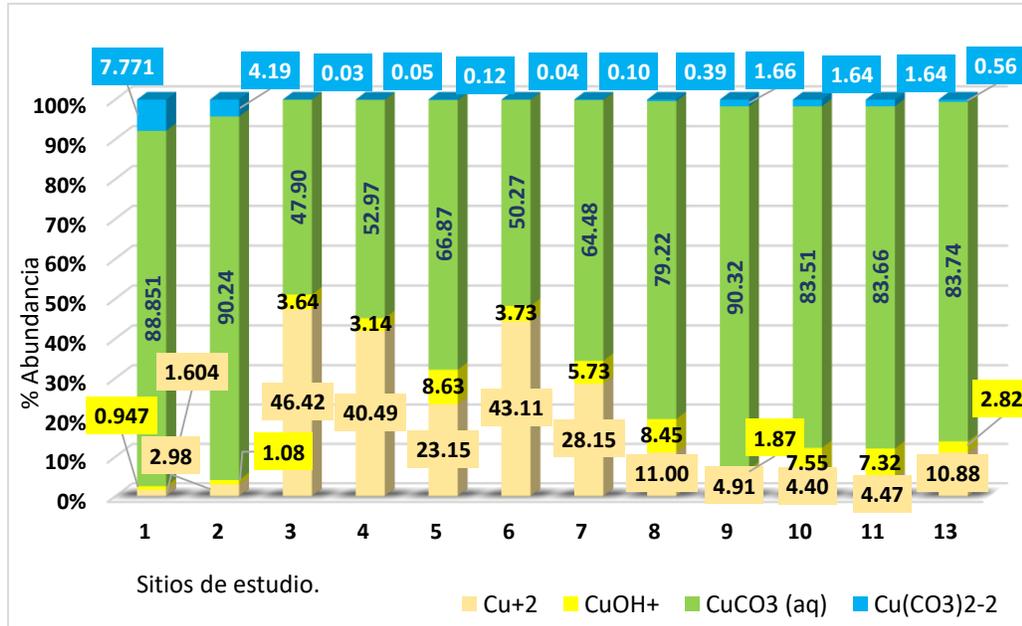


Figura 31. Especiación química del Cu para los sitios de estudio.

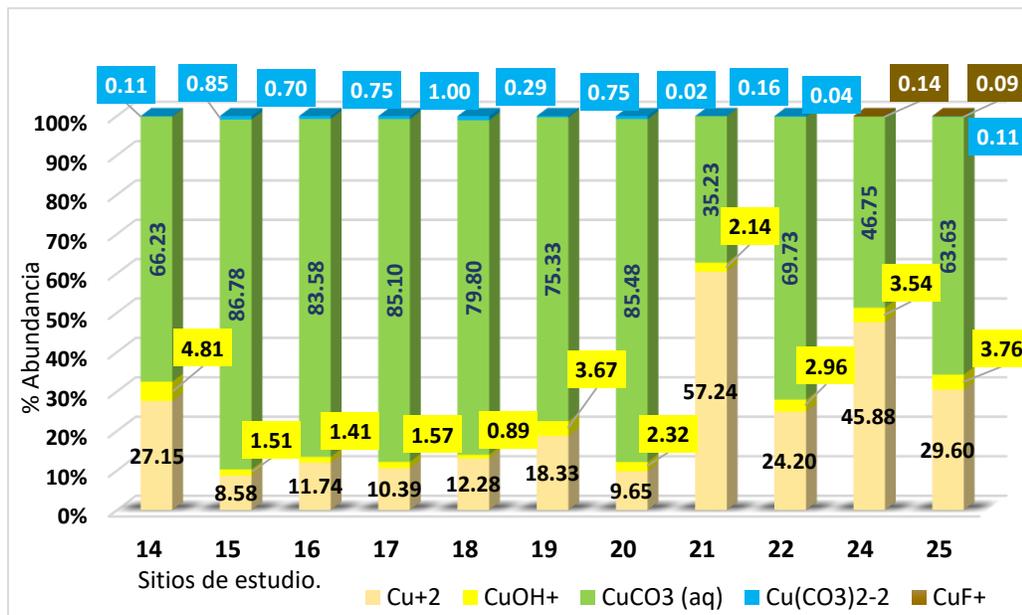


Figura 32. Especiación química del Cu para los sitios de estudio.

En la mayoría de los sistemas acuáticos naturales que son medios ácidos oxidantes, predomina el ion  $Fe^{3+}$ . El hierro soluble se encuentra en el agua subterránea debido a las condiciones reductoras que favorecen el estado de oxidación de  $Fe^{2+}$ , la cual es la forma soluble del metal, a su vez tiende a oxidarse dependiendo del pH que presente el agua, al oxidarse el  $Fe^{2+}$  a  $Fe^{3+}$  se hace en insoluble (Manahan, 2007).

Las Figuras 31 y 32 representan la especiación química de hierro. En todos los sitios el hierro se encuentra como Fe (III) formando distintas especies químicas en disolución, siendo la especie predominante  $Fe(OH)_2^+$ . Otras especies presentes son  $Fe(OH)_3(aq)$  y  $Fe(OH)_4^-$ .

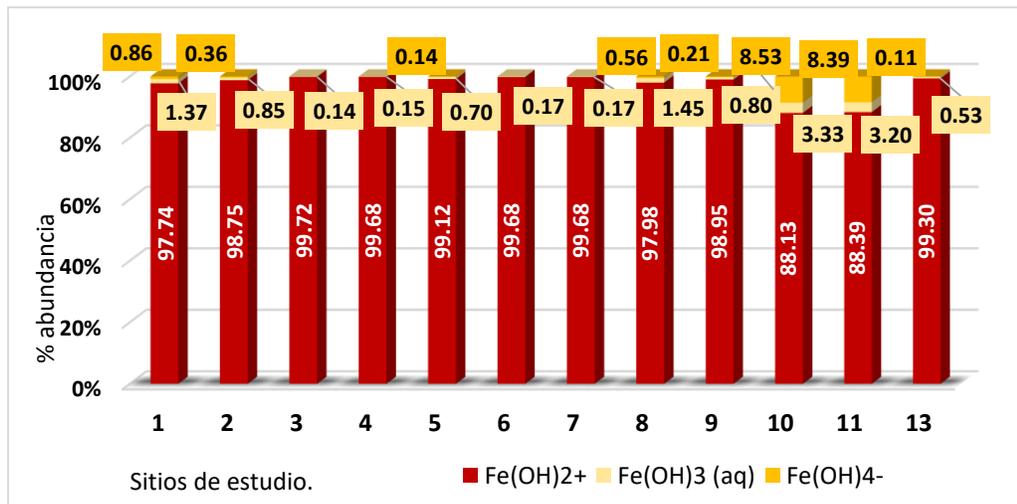


Figura 33. Especiación química del Fe para los sitios de estudio.

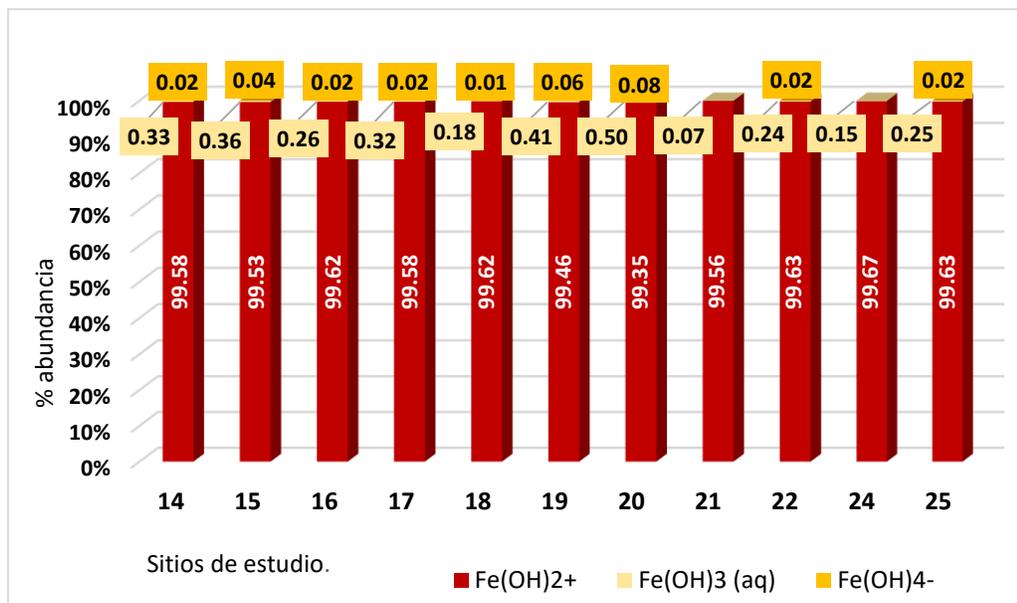


Figura 34. Especiación química del Fe para los sitios de estudio.

Las Figuras 35 y 36 representan la especiación química del manganeso. En todos los sitios la especie predominante fue  $Mn^{2+}$ ; en menor proporción se encontraron  $MnCO_3(aq)$ ,  $MnSO_4$  y  $MnHCO_3^+$ . El  $MnSO_4$  se detecta en mayor concentración con respecto a los demás sitios en los puntos 10 y 11, esto tiene relación con el tipo de agua encontrado en dichos sitios:  $Na^+-SO_4^{2-}$ .

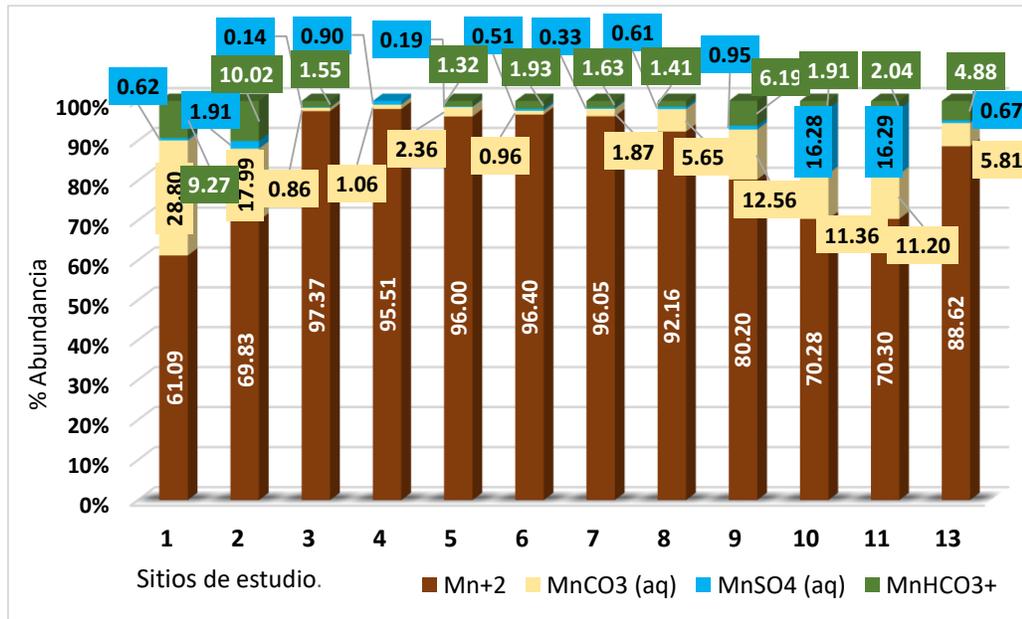


Figura 35. Especiación química del Mn para los sitios de estudio.

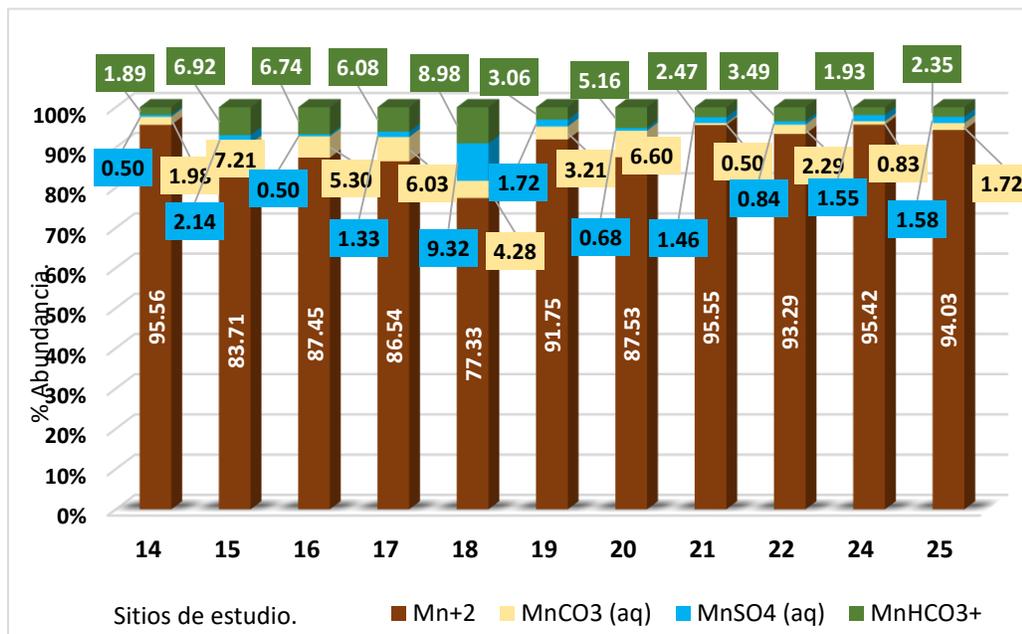


Figura 36. Especiación química del Mn para los sitios de estudio.

Las Figuras 37 y 38 representan la especiación química del plomo. En todos los sitios se encontraron las siguientes especies:  $Pb^{2+}$ ,  $PbOH^+$ ,  $PbCO_3(aq)$  y  $PbHCO_3^+$ .

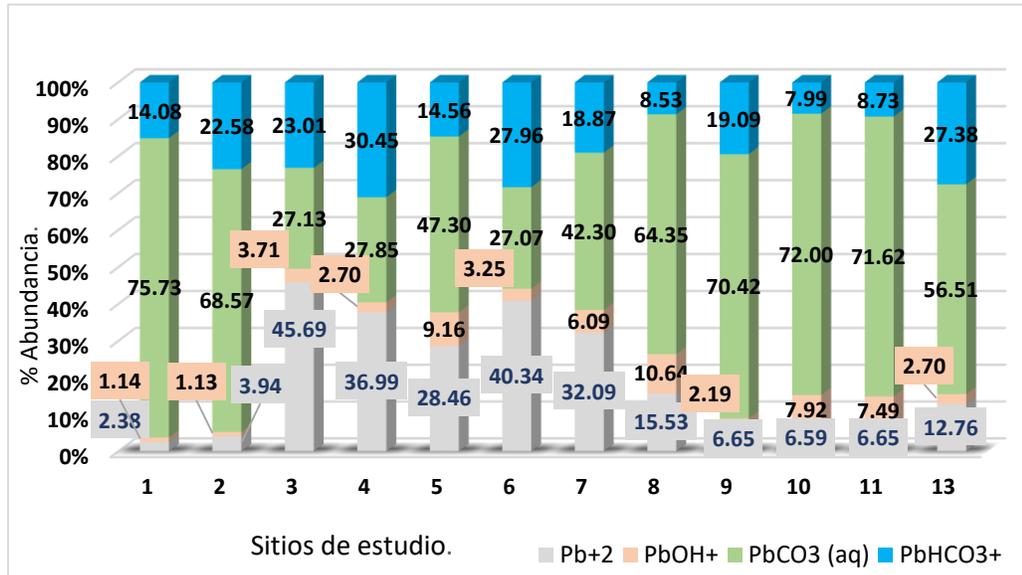


Figura 37. Especiación química del Pb para los sitios de estudio.

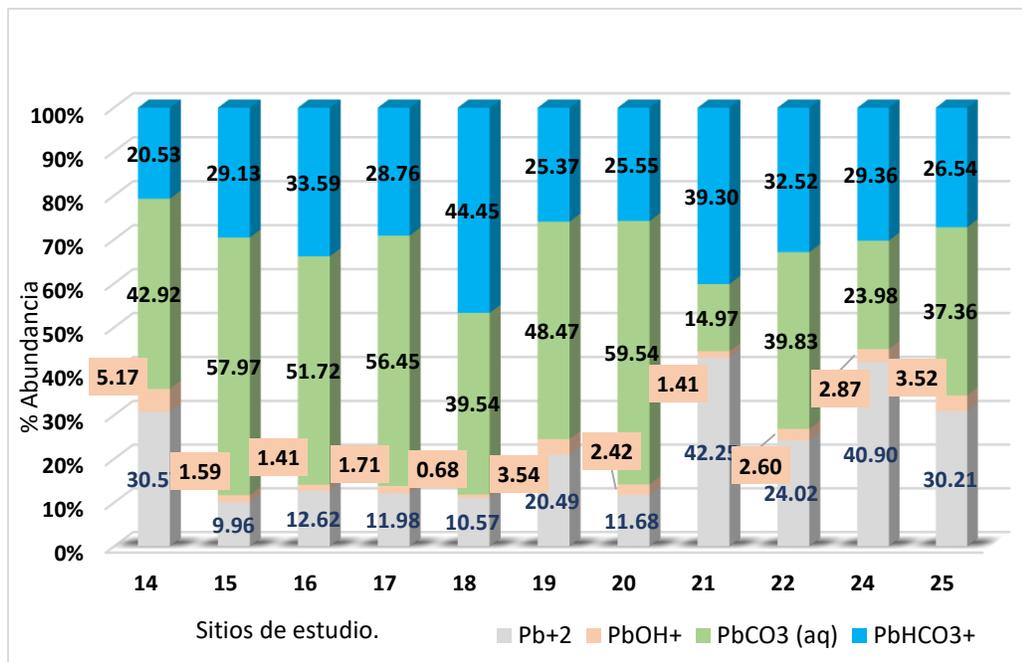


Figura 38. Especiación química del Pb para los sitios de estudio.

### 5.1.5 Tipo de agua en la zona de estudio

El diagrama de Piper o diagrama trilineal muestra las concentraciones relativas de los iones mayoritarios en porcentaje de meq/L y se proyectan a un punto en un cuadrilátero que representa los aniones y cationes, de esta manera se construye el diagrama de Piper (Deutsch, 1997). Se utilizó el programa Triplot para la construcción de este diagrama (Figura 39) y los diagramas Stiff.

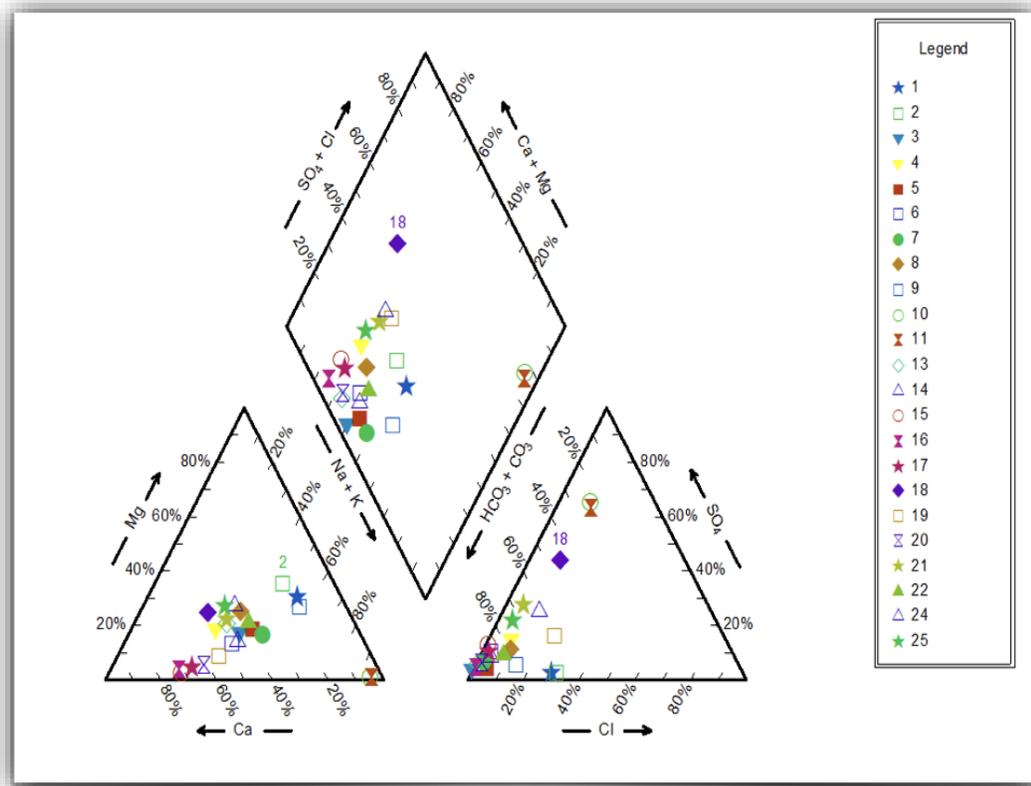


Figura 39. Diagrama de Piper de la zona de estudio.

El tipo de agua presente en la zona de acuerdo al diagrama de Piper es para casi todos los sitios tipo  $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$  y para los dos pozos re inyectores del campo geotérmico de Los Humeros es del tipo  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$ , entonces, se puede considerar que el agua en la zona de estudio es de reciente infiltración debido a que el anión encontrado en mayor concentración es el  $\text{HCO}_3^-$  y el catión predominante es  $\text{Ca}^{2+}$ , de manera general, se considera que el agua en la zona de estudio pertenece a la misma facie,  $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$ .

La presencia de  $\text{Na}^+$  se puede relacionar con el paso del agua a través de las rocas o con un intercambio catiónico en el medio; fenómeno asociado con la presencia de minerales de arcilla, que afecta principalmente los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , consiste en que el terreno cede iones  $\text{Na}^+$  y toma del agua iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ; como resultado el agua se ablanda y tiende a convertirse en sódica (Contreras *et al.*, 2012). El hecho de que se considere el agua como de reciente infiltración puede ser indicativo de que el acuífero presenta sobreexplotación.

Se presentan los diagramas Stiff de cada uno de los sitios en el Anexo 4.

### 5.1.6 Isótopos estables

Los resultados obtenidos en el análisis de isótopos estables a los sitios de estudio se grafican en la Figura 40 donde se observa que todas las muestras se encuentran por debajo del origen V-SMOW2 (Vienna-Standard Mean Ocean Water, creado por el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología, quienes toman como referencia la mezcla aguas oceánicas destiladas de diferentes lugares del mundo como ‘blanco’ para comparar con el agua que se encuentra dentro del continente), señalando así que las aguas de los sitios muestreado provienen de origen meteórico. La Figura 40 muestra cómo solamente dos sitios (10 y 11) presentan  $\delta^{18}\text{O}$  con valores positivos, lo que indica que esas aguas no provienen de agua meteórica, sino de aguas magmáticas que forman parte del reservorio geotérmico, que no tienen relación con los resultados de los sitios adyacentes al mismo.

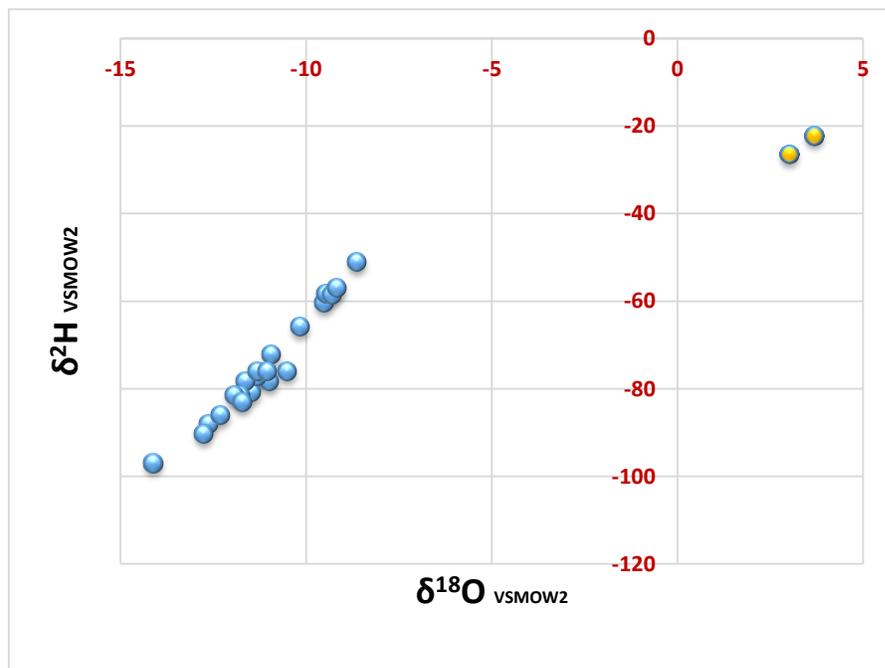


Figura 40. Isótopos estables de los sitios de estudio.

La Tabla 8 muestra los resultados de los isótopos deuterio y oxígeno 18 para cada uno de los sitios estudiados.

Tabla 8. Resultados de isótopos estables de los sitios estudiados.

Sitio	No. de muestra	$\delta^{18}\text{O}$ vsMOW2 ‰	$\delta^2\text{H}$ vsMOW2 ‰
Rancho Jardín Dorado-Pozo2	1	-10.5	-75.92
Rancho Jardín Dorado-Pozo1	2	-10.99	-78.29
Cofre de Perote m4 "El Conejo"	3	-14.11	-97.02
Mazapa 3	4	-10.15	-65.77
Mazapa	5	-9.51	-60.41
Zoatzingo-El Tesoro	6	-9.45	-58.21
<i>Santa Rosalía</i>	7	-10.93	-72.26
El Chicaco - Aguacatlán	8	-8.62	-51.04
Rancho Los Sauces	9	-11.47	-80.87
Pozo 29-Humeros	10	3.01	-26.42
Pozo 38-Humeros	11	3.68	-22.27
PGH4 Humeros	13	-12.61	-88.04
Huitzitzilapan	14	-11.3	-77.17
Tehuapan-San Miguel	15	-11.63	-78.31
La Olímpica 1	16	-11.76	-81.41
La Olímpica 2	17	-11.92	-81.41
Zacatepec, Villa del Carmen	18	-12.75	-90.24
Puchintoc	19	-11.71	-82.96
Sesder	20	-12.29	-86.03
Buenvista	21	-11.29	-76.02
San Miguel Barrientos	22	-11.03	-75.96
La Quinta	24	-9.3	-58.5
El Progreso	25	-9.16	-56.96

### 5.1.7 Hidrogeoquímica

Se dividieron los sitios de muestreo de acuerdo al tipo de roca de cada uno (ígneas y sedimentarias), graficando los resultados de campo, los análisis de componentes mayores y elementos traza como se indican en las siguientes Figuras.

La Figura 41 muestra las concentraciones de los componentes mayores de los sitios de muestreo donde las rocas presentes son volcánicas (basalto, tobas ácida y básica). Las concentraciones se muestran en las Tablas 8 y 9.

La gráfica de la Figura 41 indica que la mayoría de los sitios corresponden a agua del tipo  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ , a excepción de los pozos re inyectores 29-Humeros y 38-Humeros con aguas  $\text{SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-$ , observándose una relación de la química del agua con las rocas ígneas de la zona de estudio.

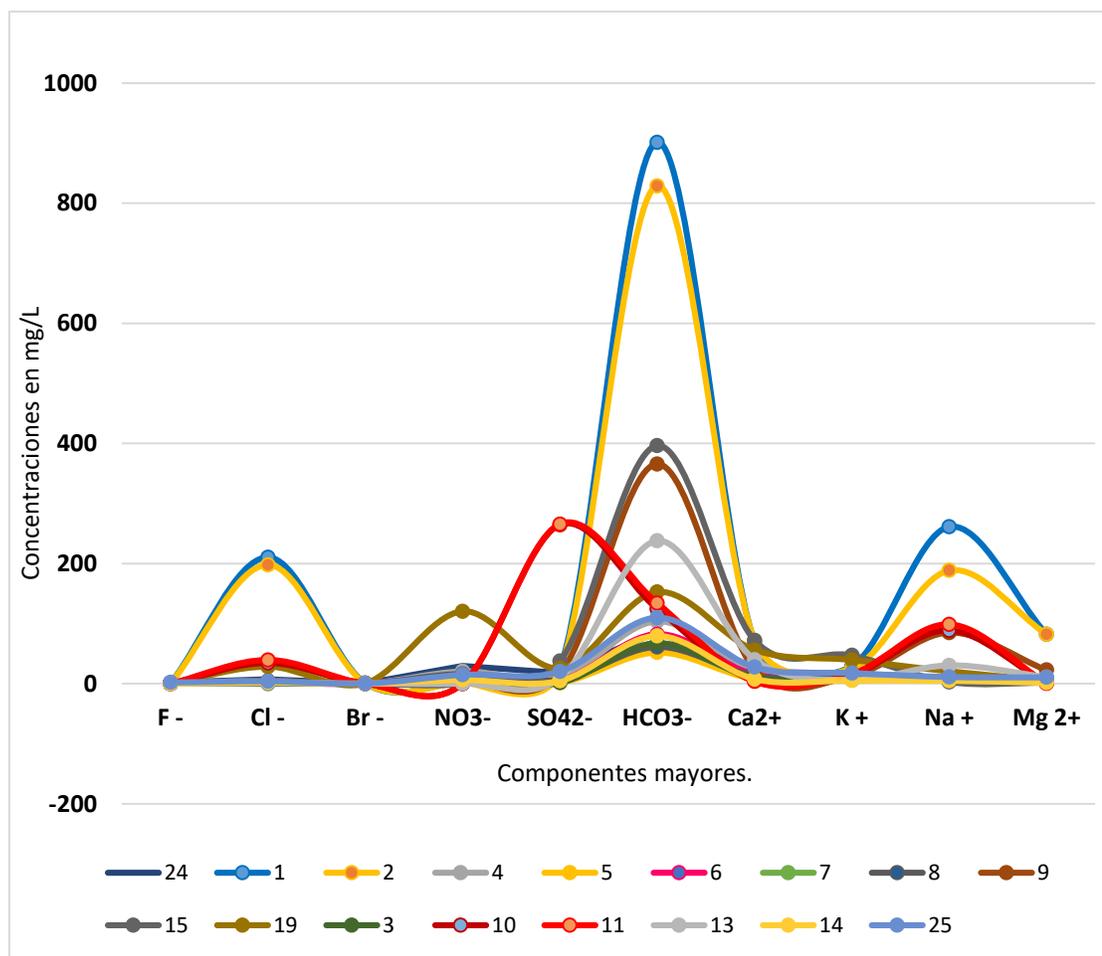


Figura 41. Interacción roca-agua de componentes mayores con rocas ígneas de los sitios de estudio.

La Figura 42 muestra las concentraciones de los elementos traza de los sitios de estudio, donde la roca presente es ígnea. Las concentraciones se muestran en la Tabla 9. En la Figura 42 el eje secundario (concentraciones a la derecha) corresponde a los dos pozos reinyectores 29-Humeros y 38-Humeros.

Se observa que las concentraciones de hierro son mayores que las concentraciones de plomo en los sitios 1, 2, 5, 7 y 9 ubicados al este del campo geotérmico donde la roca es ígnea extrusiva clasificada como toba ácida.

Las concentraciones para los sitios 10 y 11 se presentan en el eje secundario de la derecha de la gráfica, donde se observa un aumento en las concentraciones de As debido a la interacción que tiene esta agua con el tipo de roca presente. El As se encuentra presente de manera natural en los reservorios debido a la disolución de minerales con los que está en contacto.

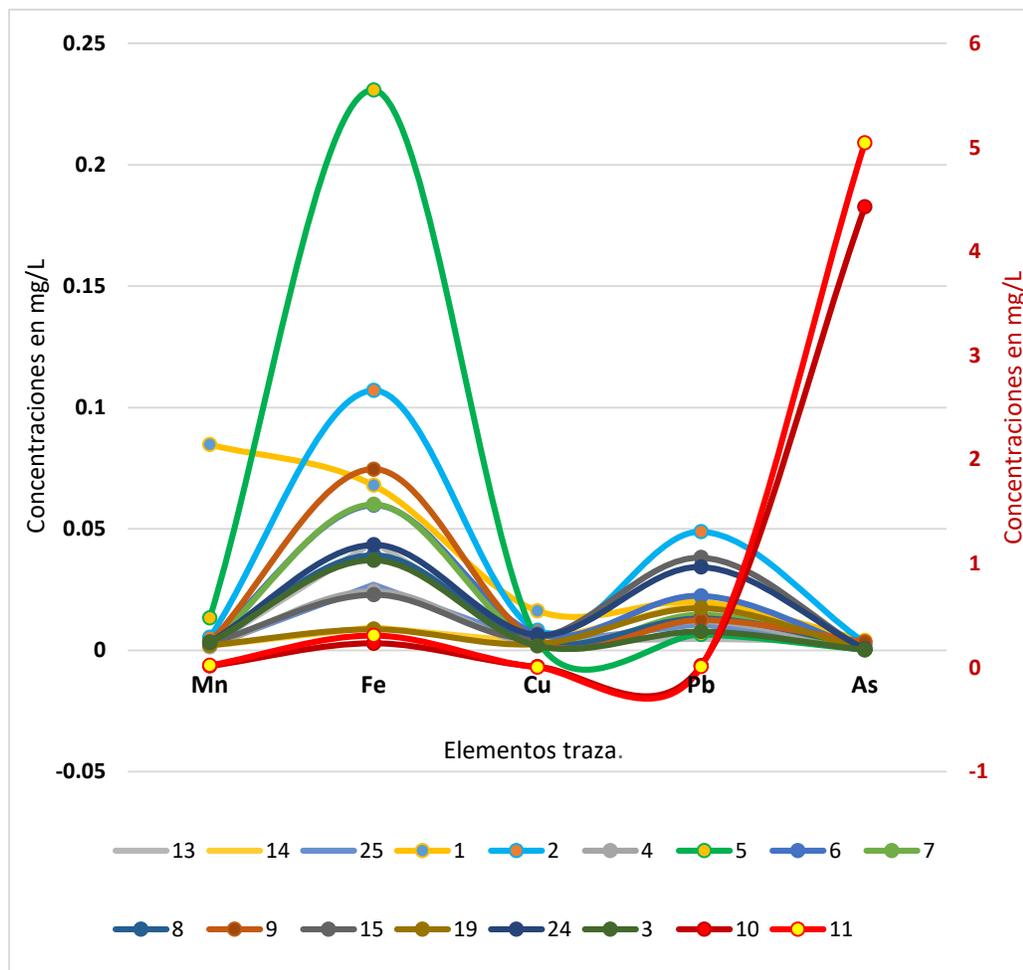


Figura 42. Interacción roca-agua de elementos traza con rocas ígneas de los sitios de estudio.

La Figura 43 muestra las concentraciones de los componentes mayores donde el agua analizada está en contacto con rocas sedimentarias, se observa un aumento en las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ . Se puede observar de manera gráfica que el tipo de agua en estos 6 sitios es  $\text{Ca-HCO}_3^-$ .

Se observa aumento en las concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  de los sitios muestreados donde la interacción del agua es con rocas sedimentarias, principalmente calizas y lutitas.

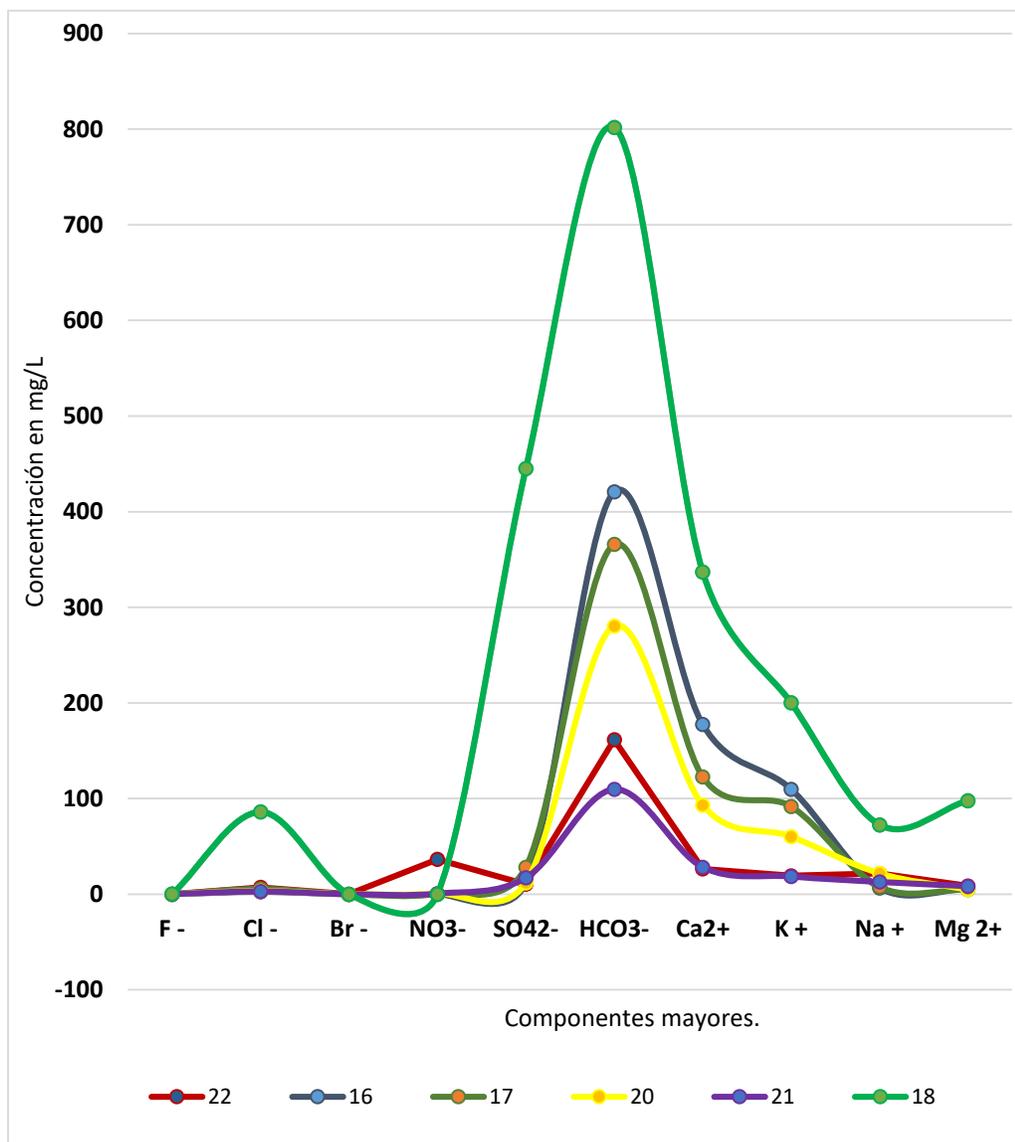


Figura 43. Interacción roca-agua de componentes mayores con rocas sedimentarias de los sitios de estudio.

La Figura 44 muestra las concentraciones de los elementos traza de aguas que están en contacto con rocas sedimentarias, observándose que aumentan las concentraciones de hierro y plomo, de manera similar a los elementos traza de aguas que están en contacto con rocas ígneas, sin existir alguna diferencia significativa entre ambas interacciones con el tipo de roca con la que está en contacto el agua. El eje secundario de la Figura 44, concentraciones a la derecha, corresponde a los sitios: 18, 20 y 21 (líneas negras).

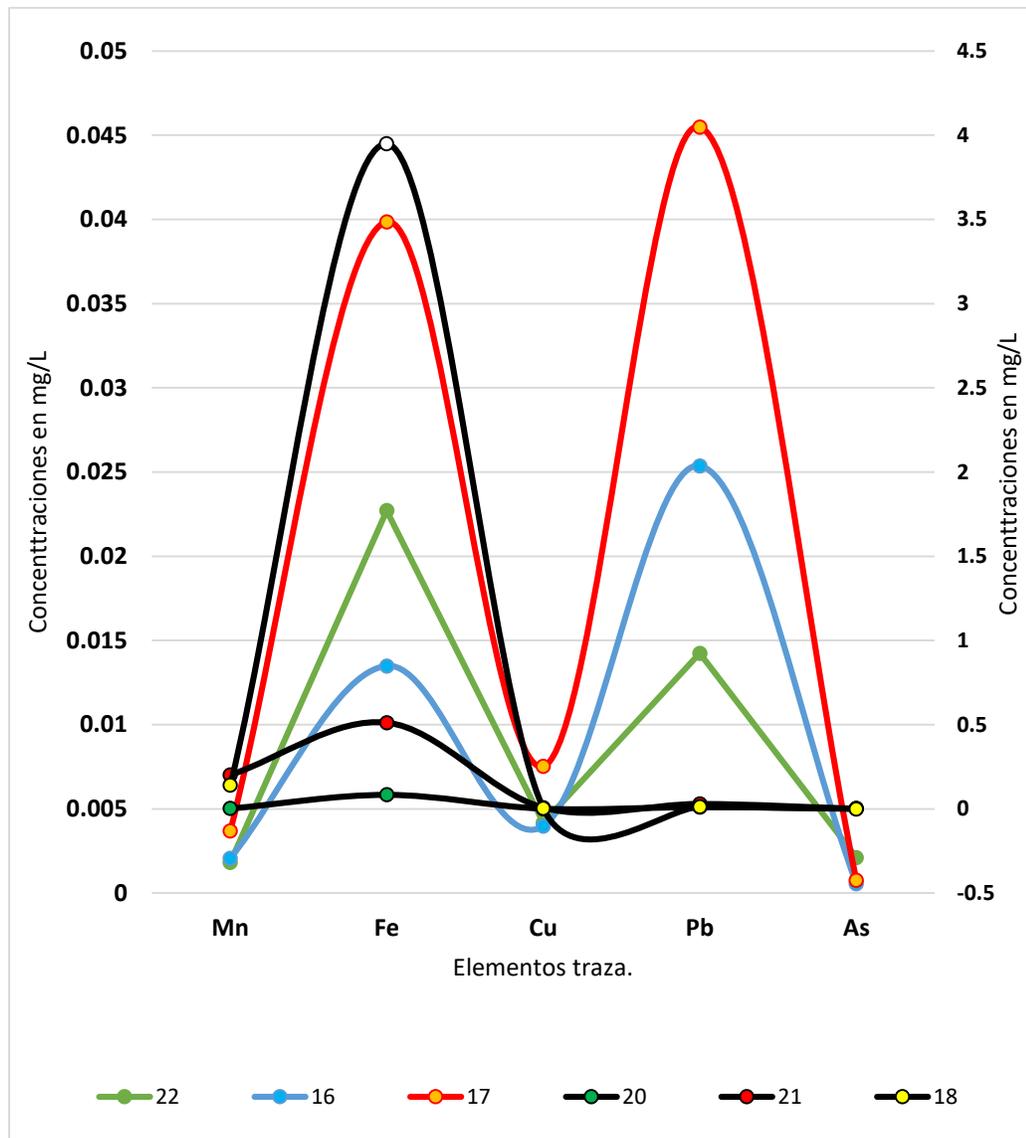


Figura 44. Interacción roca-agua de elementos traza con rocas sedimentarias de los sitios de estudio.

La Figura 45 muestra los 23 sitios de estudio graficando la interacción roca-agua de rocas ígneas y sedimentarias, se concluye que existe diferencia de concentraciones entre el agua que está en contacto entre estos dos tipos de roca, observándose que la concentración del agua aumenta en  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  y tiende a disminuir en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  cuando están en contacto con rocas sedimentarias: calizas y lutitas (líneas negras en la gráfica); y las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  disminuyen cuando están en contacto con rocas ígneas, aumentando las concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$ .

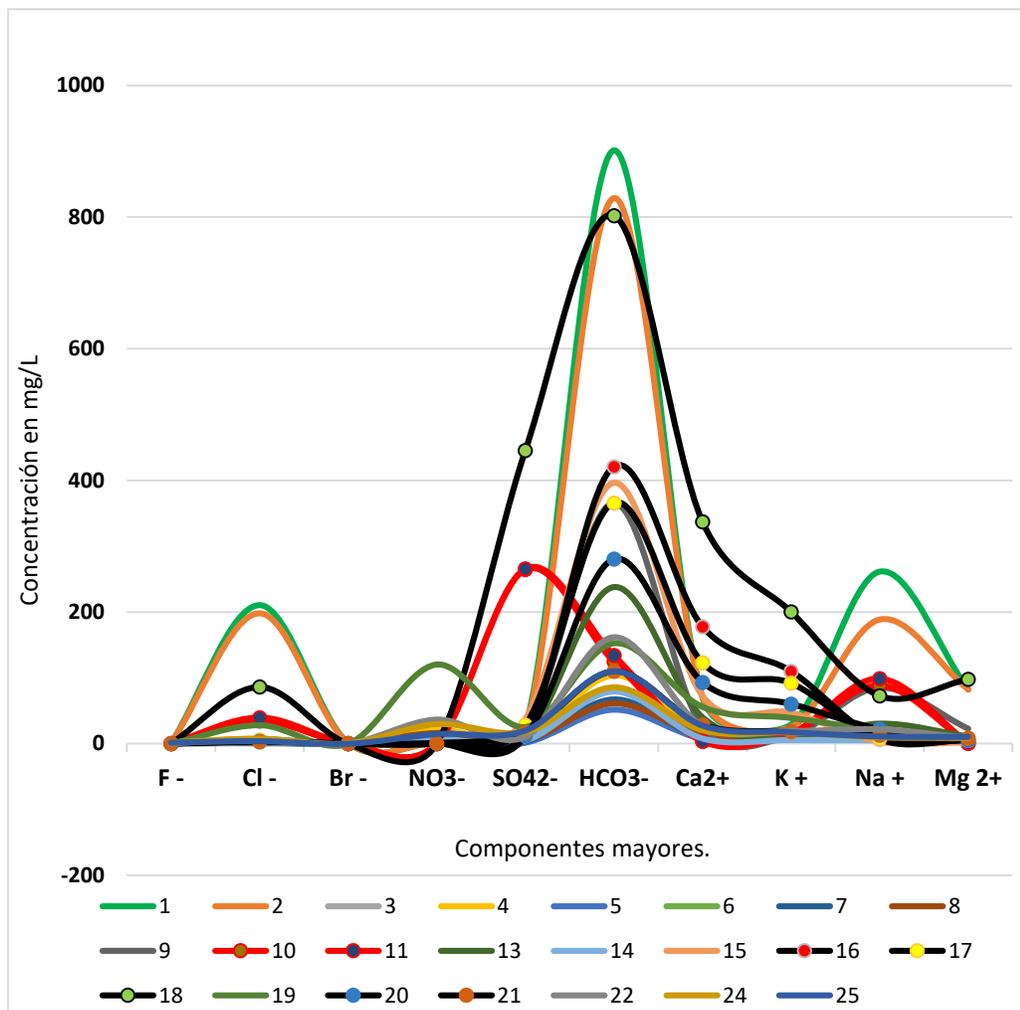


Figura 45. Interacción roca-agua de componentes mayores con rocas ígneas y sedimentarias de los sitios de estudio.

La Figura 46 representa los elementos traza de los veintitrés sitios de muestreo, se observa que todos los sitios presentan mayores concentraciones de Fe y Pb. No se observa una correlación significativa entre el agua que está en contacto con rocas ígneas o sedimentarias a excepción de los sitios 10 y 11 correspondientes al agua del campo geotérmico donde se observa clara diferencia en las concentraciones de As. En la Figura 46, el agua que está en contacto con rocas sedimentarias es representada con líneas color negro, y con líneas azules los sitios que están en contacto con rocas ígneas. Solamente los sitios 10 y 11 fueron representados con líneas rojas, donde se observa diferencia con los demás sitios de estudio.

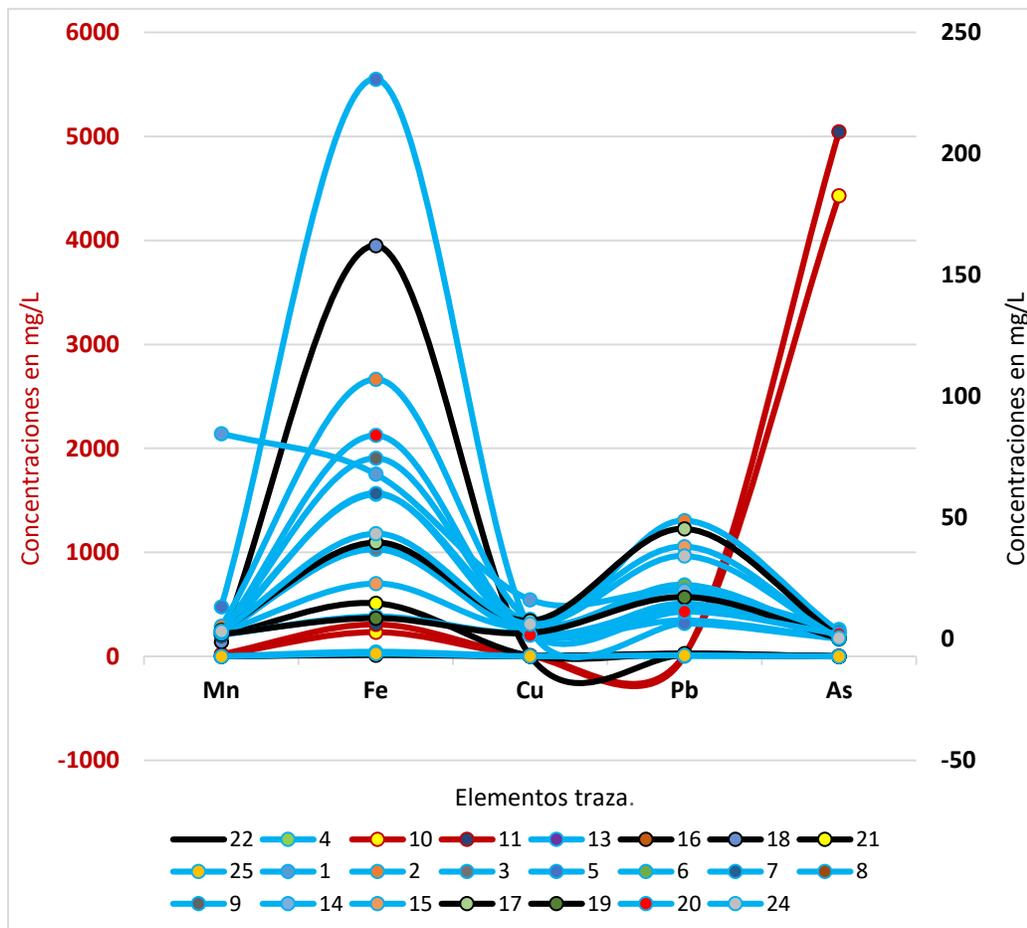


Figura 46. Interacción roca-agua de elementos traza con rocas ígneas y sedimentarias de los sitios de estudio.

## CAPÍTULO VI. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 6.1 Discusión

A partir de los resultados encontrados, aceptamos la hipótesis que establece que los manantiales y pozos de agua potable de la zona de estudio presentan un origen que no tiene relación química con el yacimiento geotérmico de Los Humeros.

La mayoría de los manantiales aledaños al campo geotérmico de Los Humeros, Puebla, son del tipo  $\text{Ca}^+\text{-HCO}_3^-$  y  $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ . Este carácter geoquímico sugiere que se trata de aguas de origen meteórico de reciente infiltración que han circulado a través de roca de tipo volcánico (Tello *et al.*, 2000).

De acuerdo con el estado de equilibrio agua-roca, se puede inferir que el sistema geotérmico de Los Humeros no lo está, esto puede tener relación con el alto contenido de As. Esto ocurre en sistemas geotérmicos asociados con vulcanismo reciente como el de este campo.

El tipo de agua encontrado en la zona aledaña al campo geotérmico sugiere que es de reciente infiltración, por lo tanto, puede suponerse que el acuífero que abastece a los pozos y manantiales está en proceso de sobre explotación (Manahan, 2007).

Las bajas concentraciones de cloruros y altas concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^+$  permiten suponer que están interaccionando con roca a bajas temperaturas como lo menciona también Hinojosa y González (2001).

Las concentraciones de As para los pozos re inyectores fueron diferentes a las de los pozos de agua potable y manantiales, esto debido a que el tipo de agua en dichos pozos proviene de una fuente diferente.

Los resultados de las concentraciones de elementos mayores y parámetros fisicoquímicos de los pozos re inyectores del campo geotérmico guardan relación con respecto a los trabajos de Tello (1992), Barragán *et al.* (1991) por lo que se podría inferir que esa agua proveniente del reservorio se sigue utilizando para la generación de energía eléctrica.

Los resultados de la geoquímica del agua son similares a lo encontrado en los trabajos de López-Romero (2006) y Ledesma (1998), donde se observa que algunos pozos productores y los re inyectores del campo geotérmico son del tipo  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$

Los resultados de la química del agua de algunos pozos y manantiales localizados fuera del campo geotérmico son similares a los publicados por García-Soto (2016) donde se puede verificar que son del tipo  $\text{HCO}_3^-$ , acorde con lo que en este estudio se encontró.

Respecto a los resultados obtenidos de isótopos estables,  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  se tienen valores similares a los obtenidos por Tello *et al.* (2000), Portugal *et al.* (2002), para aguas de manantiales y pozos de agua, comprobando que esas aguas son de origen meteórico, a excepción del agua de los dos pozos re inyectores del campo geotérmico que por los resultados isotópicos evidencian un origen distinto.

De acuerdo con la composición isotópica, los pozos re inyectores de Los Humeros presentan un corrimiento de oxígeno característico de fluidos de origen magmático que se han equilibrado con la roca a altas temperaturas. La mayoría de los manantiales y pozos de agua aledaños al campo se ubican en la zona meteórica.

El aporte de este trabajo estriba en obtener información sobre la química del agua en pozos y manantiales fuera de la caldera de Los Humeros, de los que no se conocían datos fisicoquímicos, de elementos mayores y trazas; así como estimar una posible relación química con el yacimiento geotérmico.

## 6.2 Conclusiones

- Los resultados encontrados muestran que no existe una relación química entre los manantiales y pozos de agua potable con los pozos del campo geotérmico, por lo que se puede inferir que no existe una conexión entre el agua subterránea que abastece agua potable y el campo geotérmico.
- En la especiación química para As, Cu, Mn, Pb y Fe, se observa que no se encuentran en concentraciones de riesgo para la salud de la población que utiliza el agua en la zona.
- Los manantiales y pozos de agua potable pertenecen a la misma facie hidrogeoquímica ( $\text{Na}^+$ - $\text{Ca}^{2+}$ - $\text{HCO}_3^-$ ), considerada de un ambiente volcánico.
- Los resultados isotópicos de oxígeno 18 y Deuterio indican que todas las muestras se localizan en la zona de aguas de origen meteórico, mientras que el agua de los pozos del campo geotérmico son de origen magmático.
- La composición isotópica del agua de los manantiales se agrupa en su mayoría en la línea de agua meteórica y se trata de aguas de reciente infiltración, que no presentan ninguna interacción con fluidos geotérmicos profundos.
- Las concentraciones de plomo en los sitios 16, 17, 21 y 24 sugieren un posible riesgo para la salud debido a que exceden los límites máximos permisibles de la NOM-127-SSA1-1994.
- Se observa una relación de las concentraciones de los componentes mayores, en los sitios donde la interacción roca-agua son rocas ígneas extrusivas, se puede apreciar que en estos sitios las concentraciones de sodio y cloro aumentan con respecto a los demás sitios.
- Las concentraciones de los elementos mayores varía respecto al tipo de interacción roca-agua de la zona, se observa que las concentraciones de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{K}^+$  aumentan y las de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Mg}^{2+}$  bajan cuando están en contacto con rocas sedimentarias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta R.I., González S.H., Moctezuma Z.M., Cárdenas G.J., Martínez J.V. (2012). “*Remoción de Cromo (VI) en solución por la cascara de naranja (citrus sinensis Osbeck)*” Revista Académica de Investigación.
- Alarcón-Herrera M.T., Bundschuh J., Nath B., Nicolli H.B., Gutiérrez M., Reyes-Gómez V.M., Núñez D., Martín-Domínguez I.R. (2012). “*Co-occurrence of arsenic and fluoride in groundwater of semi-arid regions in Latin America: Genesis, mobility and remediation*”. Journal of Hazardous Materials.
- Alcamo J. (2018). “*Water quality and its interlinkages with the Sustainable Development Goals*”. Journal of Environmental Management. Vol. 36. Pags. 126-140.
- Alfaro, R.; Segovia, N.; Peña, P.; López, M.B.E.; Armienta, M.A.; Rangel, J. y Seidel, J.L. (2002). “*Radon behavior in springs and wells around Cuitzeo Lake, Lerma River basin*”. Geofísica Internacional, 41(4): 439-445.
- Arango S.D.P., Martínez D.C., Vargas B.T. (2008) “*Uso de hidroquinona e isótopos ambientales para la evaluación de la conexión hidrológica entre el agua subterránea y el humedal ciénaga Colombia*”. Gestión y Ambiente vol.11, núm. 2, p. 21-37.
- Armienta, M. A.; Zamora, V. y Juárez, F. (1994). “*Manual para el análisis químico de aguas naturales, en el campo y en el laboratorio*”. Comunicaciones Técnicas. Serie de docencia y divulgación No. 4. IGFUNAM.
- Arreola C.M., (2014). “*Evaluación de la calidad del agua subterránea en función de la presencia de arsénico, flúor y boro en Ciudad Hidalgo, Michoacán*” Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia Michoacán México.
- Baat M.L, Bas D.A, Beusekom S.A.M, Droge S.T.J. (2018). “*Nationwide screening of surface water toxicity to algae*”. *Science of the Total Environment*. Vol. 645. Pags. 780-787.
- Barragán R.M, Nieva D, Santoyo E, Gonzalez P, Verma M. P, Lopez M. (1991). “*Geoquímica de fluidos del campo geotérmico de Los Humeros (México)*”. Revista Mexicana de Geoenergía. Vol.7. Pags. 23-47
- Berehanu B., Azagegn T., Ayenew T., Masetti M. (2017). “*Inter-Basin Groundwater Transfer and Multiple Approach Recharge Estimation of the Upper Awash Aquifer System*” Journal of Geoscience and Environment Protection. P.P. 76-98.
- Bernard-Romero R.A., (2008). “*Nuevos datos geoquímicos de yacimientos geotermales de alta temperatura del cinturón volcánico mexicano: isótopos de helio, boro, nitrógeno y elementos traza*. Tesis de Maestría del Instituto de Geofísica UNAM.

- Bonte M., Breukelen B.M., Stuyfzand P.J. (2013). “*Temperature-induced impacts on groundwater quality and arsenic mobility in anoxic aquifer sediments used for both drinking water and shallow geothermal energy production*”. Water Research 47 5088-5100.
- Birkle P. (2005). “*Compositional link between thermal fluids in Mexican deep reservoirs*”. Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia.
- Bundschuh J., Litter M., Ciminelli V., Morgada M.E., Cornejo L., Garrido H.S., Hoinkis J., Alarcón-Herrera M.T., Armienta M.A., Bhattacharya P. (2010). “*Emergin mitigation needs and sustainable options for solving the arsenic problems of rural and isolated urban áreas in Latin America – A critical analysis*”. Water Research (44) 5828-5845.
- CNA (1999). Comisión Nacional del Agua, Gerencia de Saneamiento y Calidad del Agua.
- CNA (2007). Comisión Nacional del Agua. “*Diseño de plantas potabilizadoras tipo tecnología simplificada*” Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. México D.F. pp 329.
- CFE (2014). Comisión Federal de Electricidad. “*Estudio geohidrológico en el campo geotérmico de los Humeros, Puebla*” Capítulos I, III, IV, V, VI, VII.
- CONAGUA (2004). Comisión Nacional del Agua. “*Estadísticas del agua en México*” México D.F.
- CONAGUA (2010). Comisión Nacional del Agua. “*Estadísticas del agua en México*” Capitulo 8. México D.F.
- Cañizares V. R. (2000). “*Biosorción de metales pesados mediante el uso de biomasa microbiana*”. Revista Latinoamericana de Microbiología (42) 131-143.
- Cárdenas G.F., Acosta R.I. (2010). “*Remoción de Cromo Hexavalente por el Hongo Paecilomyces sp. Aislado del medio ambiente*”. Universidad Autónoma de San Luis Potosí, Centro de Investigación y de Estudios de Posgrado. 22 (1). 9-16 2011.
- Cervantes C., Sánchez M.R., (1999). “*Contaminación Ambiental por metales pesados. Impacto en los seres vivos*”. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Químico – Biológicas, Morelia Michoacán. 1era reimpresión 2007. Pp 157.
- Chacón G. L., Molina F.N., Oropeza O.A., Gaona E., Juárez L.L (2011). “*Análisis de la concentración de fluoruro en agua potable de la delegación Tláhuac, Ciudad de México*”. Contaminación Ambiental 27(4) 283-289.
- Contreras C.T, Vargas I., Badilla E. (2012). “*Hydrochemical and isotopic properties of the groundwater in the middle part of the Tulián River watershed, Puerto Cortes, Honduras*”. Revista Geologica de America central 46:179-188.
- Corroto C., Pérez C.A., Calderón E., Fernández C. (2006). “*Alternativas de Remoción de Arsénico en Aguas de Rechazo de Plantas de Osmosis Inversa*” CETA (centro de Estudios Transdisciplinarios del Agua) Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad de Buenos Aires.
- Dafny E., Burg A., Gvirtzman H. (2006). “*Deduction of groundwater flow regime in a basaltic aquifer using geochemical and isotopic data: The Golan Heights, Israel case study*” Journal of Hydrology Elsevier. pp 506-524.

- D'Acunha B, Johnson M. (2018). “*Water quality and greenhouse gas fluxes for stormwater detained in a constructed wetland*”. Journal of Environmental Management. Vol. 231. Pags. 1232-1240.
- Davis M., Masten S. (2005). “*Ingeniería y ciencias Ambientales*” Editorial McGraw-Hill Interamericana pp 749.
- Deutsch W.J. (1997). “*Groundwater geochemistry fundamentals and applications to contamination*”. International Standard Book Number 0-87371-308-7.
- Doménech X., Peral P. (2006). “*Química Ambiental de los sistemas terrestres*” Editorial Reverté pp 229.
- DOF (1981). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-046-1981. Determinación de Arsénico. México.
- DOF (1981a). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-074-1981. Determinación del Ion Sulfato. México. DOF (1993). Diario Oficial de la Federación. NOM-014-SSA1-1993. Procedimientos Sanitarios para el Muestreo de Agua para uso y Consumo Humano en Sistemas de Abastecimiento de Agua Públicos y Privados. México.
- DOF (1994). Diario Oficial de la Federación. NOM-127-SSAI-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.
- DOF (2000). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-093-SCFI-2000. Determinación de la Conductividad Electrolítica- Método de Prueba. México.
- DOF (2000a). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-007-SCFI-2000. Determinación de la temperatura en aguas naturales, residuales y residuales tratadas. Método de prueba. México.
- DOF (2001). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-063-SCFI-2001. Determinación de boro en aguas naturales, residuales y residuales tratadas- Método de prueba. México.
- DOF (2001a). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-073-SCFI-2001. Determinación de Cloruros Totales en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas- Método de Prueba. México.
- DOF (2001b). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-077-SCFI-2001. Determinación de Fluoruros en Aguas Naturales, Residuales y Residuales tratadas. México.
- DOF (2001c). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-051-SCFI-2001. Determinación de Metales por Absorción Atómica en Naturales, Potables, Residuales y Residuales Tratadas – Método de Prueba.
- DOF (2001e). Diario Oficial de la Federación. NMX-AA-036-SCFI-2001. Determinación de Acidez y Alcalinidad en Aguas Naturales, Residuales y Residuales Tratadas- Método de Prueba. México.
- Dong Z, Kang S, Qin D, Qin X, Yan F, Du W, Wei T. ( 2017). “*Temporal and diurnal analysis of trace elements in the Cryospheric water at remote Laohugou basin in northeast Tibetan Plateau*”. Chemosphere Vol. 171. Pags 386-398.

- Etxabe Z.I., Cotín C.K., Olalde O.C., y Alonso V.J. (2010). “*Cesión de plomo y otros metales desde las tuberías al agua de consumo en la Comunidad Autónoma del País Vasco*” *Gac. Sanitaria* 24(6) pp 460 – 465.
- Esparza M.L. y Medina M.W. (1998). “*Abatimiento de Arsénico en Aguas Subterráneas para zonas rurales*” XXVI Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental.
- Evans A, Sagsta M.J, Qadir M, Boelee E, Ippolito A. (2018). “*Agricultural water pollution: Key knowledge gaps and research needs*”. *Current Opinion in Environmental Sustainability*. Vol. 36. Pags. 20-27
- Fagundo C.J.R., Monteagudo Z.V., Rodríguez P.M., Perez L.T., González H.P., Suarez M.M, Melián R.C., Abraham A.A. (2007). “*Geoquímica de la aguas subterráneas que drenan carbonatos del intervalo Jurásico-Paleógeno*”. *Revista de Geociencias*.
- Ferriz, H. y Mahood A. 1986. “*Strong compositional zonation in a silic magmatic system. Los Humeros, Mexican Neovolcanic Belt. Department of applied earth sciences, and Department of Geology*”, Stanford University., pp. 172-208.
- Fotini N, Panagiotis T. 2016. “*Concentration of heavy metals and trace elements in soils, waters and vegetables and assessment of health risk in the vicinity of a lignite-fired power plant*” *Science of The Total Environment*, pags. 377-385
- Foster S., Hirata R., Gomes D., Mónica D., Paris M. (2002). “*Protección de la Calidad del Agua Subterránea*” *Guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales*. pp127.
- Funes I.,Salomon V, Gil R, Mastrantonio L, Bottini R, Piccoli P, (2018). “*Arsenic and trace elements in soil, wáter, grapevine and onion in Jáchal, Argentina*” *Science of The Total Environment*. Pags 1485-1498.
- Funes I.,Salomon V, Gil R, Mastrantonio L, Bottini R, Piccoli P, (2017). “*Characterization of the As(III) tolerance conferred by plant growth promoting rhizobacteria to in vitro-grown grapevine*”. *Applied Soil Ecology*. Volume 109, Pags. 60-68
- Galvín M.R. (2003). “*Fisicoquímica y Microbiología de los Medios Acuáticos, tratamiento y control de calidad de aguas*” Ed. Díaz de santos. Madrid España pp 310.
- García-Soto A., Pandarinath K., Marreo-Ochoa J., Díaz-Gómez C. (2016). “*Solute geothermometry of Cerro Prieto and Los Humeros geothermal fields, Mexico: considerations on chemical characteristics of thermal wáter*”. *Saudi Society for Geosciences* 2016.
- Gemici Ü., Gültekin T., (2017). “*Hydrogeochemistry of the Simav geothermal field, western Anatolia, Turkey*”. *Journal of Volcanology and Geothermal Reserarch*. P.P. 215-233.
- Giggenbach W.F., Gonfiantini R., Jangi B.L., Truesdell A.H. (1983). “*Isotopic and chemical composition of parbati valley geothermal discharges, NorthWest Himalaya, India*”. *Geothermics* Volume 12, P.P. 199-222.

- Ghosh A., Kakali M., Ghosh S.K., Bidyut s. (2012). “*Sources and toxicity of fluoride in the environment*” Springer Science- Bussines Media Dordrecht, Res Chem Intermed 10(1007).
- Gopal V, Shanmgasundaram A, Nithya B, Magesh N.S. Jayaprakash M. (2018). “*Water quality of the Uppanar esrtuary, Southern India: Implications on the level of dissolved nutrients and trace elements*”. Marine Pollution Bulletin. Vol. 130. Pags 279-286.
- Gouce X, Peng L, Kexin L, Zahan T, Jiaxin Z. (2018). “*Seasonal changes in wáter quality and its main influencing factors in the Dan River basin*”. Journal of Environmental Management. Vol. 173. Pags. 131-140
- Hasan A, Alam B, Unami K, Fujihara M. (2018). “*Holistic wáter quality dynamics in rural artificial shallow water bodies*”, Journal of Environmental Management. Vol 223. Pags. 676-684.
- Hernández Del Valle A., Hernández–Lerma O. “*Elementos de probabilidad y estadística.*” Sociedad matemática mexicana, 2003.
- Hernández-García M. (2015). “*Evaluación de calidad de agua en arroyos ubicados en los municipios de Charo, Hidalgo y Morelia, Michoacán.*” Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, dirigida por la Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva. Morelia Michoacán: UMSNH, 2015.
- Hsin-Fu Y., Hung-I L., Cheng-Haw L., Kuo-Chin H., Chi-Shin W. (2014). “*Identifying Seasonal Groundwater Recharge Using Environmental Stable Isotopes*”. Department of Resources Engineering, National Cheng Kung University, Tainan.
- Iris P, Stefan C, Kanters T, Wassen M, Griffioen J. ( 2017) “*Mobilisation of toxic trace elements under various beach nourishments*” Environmental Pollution. Vol. 231, Part 1. Pags. 1063-1074.
- INEGI (2000). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. “*Los Análisis físico y químicos en la cartografía hidrología del INEGI*” 2000 México D.F.
- Jang-Soon K., Seong-Taek Y., Jong-Hwa L., Soon-Oh K., Ho Y.J. (2009). “*Removal of divalent heavy metals from aqueous solutions using scoria: Kinetics and equilibria of sorption*” Journal Hazardous Materials (174) 307-313.
- Jiménez B.E. (2001). “*La Contaminación ambiental en México. Causas, efectos y la tecnología apropiada*” Ed. Limusa. Colegio de Ingenieros Ambientales de México, A. C., Instituto de Ingeniería de la UNAM y FEMISCA. Pp 911.
- Jun X, Lingqing W (2018). “*Characteristics, sources, water quality and health ris assessment of trace elements in river water and well water in the Chinese Loess Plateau*” Science of The Total Enviroment. Pags 2004-2012
- Karro E., y Uppin M., (2013) “*The ocurrence and hydrochemistry of fluoride and boron in carbonate aquifer system, central and western Estonia*” Environ Monit Assess 185:37353748.
- Kavouridisa T., Kurisa D., Leonisa C., Liberopoulou V., Leontiadisb J., Panichic C., La Ruffac G., Capraic A. (1998). “*Isotope and chemical studies for a geothermal assessment of the island of Nisyros, Greece.*” Geothermics 28 pp 219-239.

- Lacasaña M., Romieu I., McConnell R. (1996). *“El problema de exposición al Plomo en América Latina y el Caribe”* Centro Panamericano de Ecología Humana y Salud. Organización Panamericana de Salud y Organización Mundial de la Salud.
- Ledesma R.M. (1998) *“Pre and post exploitation variations in hydrothermal activity in Los Humeros geothermal field, México”* Journal of Volcanology and Geothermal Research. Pags 313–333
- Daoliang L, Shuangin L. (2018). *“Water quality monitoring and management”*. *Technology and Case Studies*”. Pags. 113-159.
- López- Álvarez B., Ramos-Leal J.A., Moran- Ramírez J., Cardona B.A., y Hernández G. G. (2013). *“Origen de la calidad del agua del acuífero colgado y su relación con los cambios de uso de suelo en el Valle de San Luis Potosí”* Sociedad Geológica Mexicana 65 (1) pp 9-26.
- López R.O. (2006) *“Actualización del modelo geoquímico de Los Humeros, Pue., México”* Geotermia, Vol. 19, No. 1. Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Los Humeros, Carretera Perote-Los Humeros, km. 20, Campamento Maztaloya, Puebla.
- Manahan S.E. (2007). *“Introducción a la química ambiental”* Ed. Reverté. Universidad Nacional Autónoma de México, México D.F. pp 725
- Martin Lara Ma. A., (2008). *“Caracterización y aplicación de biomasa residual a la eliminación de metales pesados”* Tesis Doctoral, Universidad de Granada, Facultad de Ciencias. Departamento de Ingeniería Química pp 347.
- Martinez-Serrano, Raymundo G., Dubois M. *“Chemical variations in chlorite at the Los Humeros Geothermal system, México.”* Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, 04510 Mexico D.F.
- Meenakshi, Maheshwari R.C. (2006) *“fluoride in drinking water and its removal”* Journal of Hazardous Materials (B137) 456-463
- Meenakshi, Garg V.K., Kavita, Renuka, Malik A. (2004) *“Groundwater quality in some villages of Haryana, India: focus on fluoride and fluorosis”* Journal of Hazardous Materials (106B) 85-79
- Mesa J., Bravo A., Morales J., Sánchez L., Valle P., Gutiérrez E., Ledo H. (2007). *“Content of trace metals in groundwater from western región of Maracaibo Lake, Venezuela”* Revista Técnica de la Facultad de Ingeniería, Universidad del Zulia (30).
- Moore J.W., (1991). *“Inorganic Contaminants of surface water”* Springer-Verlag, New York. Pp 64-81.
- Mora A, Mahknecht, Torres-Martinez A. (2018). *“Evolution and multivariable analysis of trace elements in groundwater of an agricultural área in a semi- arid región of Mexico”*, Energy Procedia Vol. 153. Pags. 196-201.
- Morán R.J, Leal R.J.A., Álvarez L.B., Lozada C.S., De León S.G. (2013) *“Comportamiento hidrogeoquímico de flujos subterráneos en acuíferos cársticos fracturados, aplicando modelación inversa: Caso Huasteca Potosina”*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Vol 65, No. 1, p. 71-82.

- Nissen M.J., Garay V.M., Aguilera M.A. (2000). “*Calidad de aguas subterráneas de la décima región de Chile*”. Agro sur, vol.28, no.1, p.25-39.
- OMS (2006a). Organización Mundial de la Salud. “*Guías para la calidad del agua potable*”. Primer apéndice a la tercera edición, volumen 1. pp 408.
- OMS (2006). Organización Mundial de la Salud “*Mitigación de los efectos del arsénico presente en las aguas subterráneas*”.
- Ömer A., Melek T.S. , Ayten K.E. (2008). “*Water quality and heavy metal monitoring in water and sediment samples of the Küçükçekmece Lagoon, Turkey*” Springer science, Istanbul, Turkey.
- Oyun-Erdene G. (2003). “*Interpretation of chemical composition of geothermal fluids from árskógsströnd, dalvík, and hrísey, n-iceland and in the khangai area, Mongolia*”. Institute of Chemistry and Chemical Technology Mongolian Academy of Sciences.
- Páez S.A., (2008). “*Evaluación de la Concentración de As y calidad del Agua Subterránea en Función de su manejo en la cuenca de Cuitzeo, Michoacán*” Tesis de Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia Michoacán México pp 74.
- Palmucci W y Rusi S. (2014). “*Boron-rich groundwater in Central Eastern Italy: a hydrogeochemical and statistical approach to define origin and distribution*” Environ Earth Sci.
- Panigatti C., Torres J.M., Griffa C., Boglione R., (2003). “*Biorremediación de Efluentes con Cromo (VI) proveniente de plantas metalmecánicas*” Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe Argentina.
- Peña H.Y., De León S.G., Salazar C.H. (2012). “*Water Quality in wells of the network of monitoring of the aquifer in the valley of San Luis Potosí, Mexico*”. Aqua-LAC-vol.4, no. 1, p 49-59.
- Portugal E., G. Izquierdo, R. M. Barragán and B. I. Romero (2002). Geofísica Internacional “*Hydrodynamic model of Los Humeros geothermal field, Mexico, based on geochemical, mineralogical and isotopic data*” Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia Geotermia Temixco, Mor. México. . 41, Num. 4, pp. 415-420
- Portugal E., R. M. Barragán, Verma M.P., Mañón A., (1994). “*Geoquímica isotópica de <sup>13</sup>C, D y <sup>18</sup>O de fluidos del sistema geotérmico Los Humeros, Puebla*”. Geofísica Internacional. Vol. 3. Pags. 607-618.
- Price M. (2007). “*Agua subterránea*”. Limusa, Ciudad de México, 330 pp.
- Price M. (2003). “*Use of tritium and helium to define groundwater flow conditions in Everglades National Park*”. Water resources research, vol. 39, no. 9, 1267.
- Prieto Bolívar C.J. (2004). “*El agua: sus formas, efectos, abastecimientos, usos, daños, control y conservación*” ECOE ediciones, 2da edición P.P. 380 Bogotá.

- Prol-Ledesma R.M. (1998). "Pre- and post-exploitation variations in hydrothermal activity in Los Humeros geothermal field, Mexico". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 83 p.p. 313–333
- Ramalho R.S. (1996). "*Tratamiento de Aguas Residuales*" Edición revisada, Editorial Reverté. Reimpresión 2003, Barcelona España pp 696.
- Reyes N.M., Alvarado A.I., Antuna D.M., González V.L., Vázquez A.E., García V.A. (2011). "*Calidad en la determinación de Fluoruros en agua de Consumo Humano*" Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Durango Dgo., México.
- Restrepo Fraume N.J. (2007) "*Diccionario Ambiental*" Editorial ECOE Ediciones, primera edición pp 468.
- Revueña C.C., Álvarez B.J., Benítez A.M., Díez M.P., Rodríguez B.S. (2003). "*Contaminación por As en aguas subterráneas en la provincia de Valladolid: variaciones estacionales*" Instituto tecnológico Agrario de Castilla y León, Departamento de Ingeniería Química (VI).
- Ribeiro C, Couto C, Ribeiro A.R, Maia A.S, Santos M, Tiritan M.E, Pinto E, Almeida A.A. (2018). "*Distribution and environmental assessment of trace elements contamination of water, sediments and flora from Douro River estuary, Portugal*". *Science of the Total Environment*. Vol. 639. Pags 1381-1393.
- Romić Ž, Habuda-Stanić M., Kalajdžić B., Kuleš M. (2011). "*Arsenic distribution, concentration and speciation in groundwater of the Osijek area, eastern Croatia*". *Applied Geochemistry* 26 37-44.
- Samboni R.N., Carvajal E.Y, Escobar J. (2007). "*A review of physical-chemical parameters as water quality and contamination indicators*" Universidad Nacional de Colombia 27 (003) 127-181.
- SEMARNAT (2011). Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. "*Estadísticas del agua en México*" México D.F.
- Singh H., Chandrasekharam D., Trupti G., Singh B. (2014). "*Geochemical Investigations on Thermal and Cold Springs at Dumka District, Jharkhand, India*" *International Journal of Earth Sciences and Engineering*. P.P. 190-194.
- Sedykh E.M., Starshinova N.P., Bannykh L.N., Ershova E. Yu., Venitsianov E.V. (2000). "*Using Inductively Coupled Plasma Atomic Emission Spectrometry and Electrothermal Atomic Absorption Spectrometry*" *Journal of Analytical Chemistry* 55 (4) pp 385-391.
- Sorg T. J., Chen A.S.C., Wang L. (2014). "*Arsenic species in drinking water wells in the USA with high arsenic concentrations*". *Water Research* 48 156-169.
- Tello Hinojosa E., 1987. *Características geoquímicas de las descargas de los pozos Humeros, Pueb., CFE, Gerencia de proyectos geotermoelectricos*, Subgerencia de estudios geotérmicos, Departamento de exploración., pp. 23-40
- Tello Hinojosa E. Mahendra P, Verma, Tovar R. (2000). "*Origin of acidity in the los humeros, méxico, geothermal reservoir*". CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos.

- Tipping E., Lofts S., Lawlor A.J., (1998). “*Modelling the chemical speciation of trace metals in the surface waters of the Humber system*”. The Science of the Total Environment 210/211 63-77.
- Vanderzalm J.L., Jeuken B.M., Wischusen D.H., Pavelic P., Le Gal La Salle C., Knapton A., Dillon P.J. (2011). “*Recharge sources and hydrogeochemical evolution of groundwater in alluvial basins in arid central Australia*”. Journal of Hydrology, Elsevier. P.P. 71-82.
- Velázquez M.A., Pimentel J.L., Ortega M. (2011). “*Estudio de la distribución de boro en fuentes de la cuenca del río Duero, México, utilizando análisis estadístico multivariado*” Universidad Autónoma de México (UNAM), Revista Internacional de Contaminación Ambiental (27) 1 pp. 19-30.
- Verma S, Mohanty B, Sing K.P, Behera B.R, Kumar Ashok. (2018). “*Dependence of precipitation of trace elements on pH in standar water*”. Nuclear Instruments and Methods in Physics. Vol. 420, Pags. 18-22.
- Viggiano G. J., et al., 1989. “*Alteración Hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. III interacción agua-roca*”. Geotermia, Rev. Mex. Geoenergía, Vol.5, No. 3, pp. 411-432.
- Voet D., Voet J.G. (2006). “*Bioquímica*” Editorial Médica Panamericana, 3ra edición. Argentina pp 1776.
- WHO (2004). World Health Organization. “*Chemical safety for drinking-water*”.
- Yáñez García C. y García Durán S., 1982. *Exploración de la región geotérmica Los Humeros-Las Derrumbadas, Estados de Puebla y Veracruz.*, pp. 9-39 y 57-67
- Yazbeck C., Kloppmann W., Cottier R., Sahuquillo J., Debotte G., Huel G. (2005) “*Health impact evaluation of boron in drinking water: a geographical risk assessment in Northern France*”. Environmental Geochemistry and Health 27:419-427.

## ANEXO 1. Localización de los sitios de muestreo

Tabla 5. Localización de los sitios de estudio.

Num. de muestra	Sitio	Fecha (dd/mm/yy)	Tipo	X (m)	Y (m)	Alt. (m.s.n.m)
1	Rancho Jardín Dorado-Pozo2	14/06/2017	Pozo	674862	2163723	2367
2	Rancho Jardín Dorado-Pozo1	14/06/2017	Pozo	675819	2163313	2363
3	Cofre de Perote m4 "El Conejo"	11/06/2017	Manantial	693561	2159699	3393
4	Mazapa 3	10/06/2017	Manantial	682806	2178713	2273
5	Mazapa	10/06/2017	Manantial	682518	2179263	2221
6	Zoatzingo-El Tesoro	10/06/2017	Manantial	683257	2182945	2061
7	<i>Santa Rosalía</i>	11/06/2017	Manantial	676367	2190668	1876
8	El Chicaco - Aguacatlán	11/06/2017	Manantial	678592	2189267	1905
9	Rancho Los Sauces	13/06/2017	Pozo	680863	2173551	2407
10	Pozo 29-Humeros	13/06/2017	Pozo reinyección	661880	2177836	2794
11	Pozo 38-Humeros	13/06/2017	Pozo reinyección	661866	2178110	2788
13	PGH4 Humeros	13/06/2017	Pozo	658264	2175116	2761
14	Huitzitzilapan	06/06/2017	Manantial	648880	2180326	2509
15	Tehuapan-San Miguel	06/06/2017	Manantial	645866	2179181	2436
16	La Olímpica	06/06/2017	Manantial	644457	2179520	2435
17	La Olímpica	06/06/2017	Manantial	644236	2179782	2345
18	Zacatepec, Villa del Carmen	08/06/2017	Pozo	653493	2131005	2363
19	Puchintoc	05/06/2017	Pozo	647263	2165018	2416
20	Sesder	07/06/2017	Manantial	640647	2178480	2205
21	Buenavista	06/06/2017	Manantial	633513	2183084	2392
22	San Miguel Barrientos	05/06/2017	Pozo	650030	2157135	2355
24	La Quinta	12/06/2017	Manantial	674704	2189494	1939
25	El Progreso	12/06/2017	Manantial	674627	2184327	1965

## ANEXO 2. Valores de parámetros fisicoquímicos

Tabla 7. Resultados de parámetros fisicoquímicos.

Sitio	Num. de muestra	T (°C)	pH	O <sub>2</sub> diss. (mg/L)	E.C. (µS/cm)	Alcalinidad (meq/L)	TDS ppm
Rancho Jardín Dorado-Pozo2	1	23.5	7.5	4.16	1755	14.79	1,123.2
Rancho Jardín Dorado-Pozo1	2	25.1	7.25	3.27	1871	13.59	1,197.44
Cofre de Perote m4 "El Conejo"	3	9.5	6.79	9.34	63.8	1.10	40.83
Mazapa 3	4	15	6.69	7.38	144.5	1.70	92.48
Mazapa	5	20	7.23	3.4	96.1	0.85	61.504
Zoatzingo-El Tesoro	6	15.6	6.71	5.48	104.1	1.35	66.624
Santa Rosalía	7	15.5	7.07	8.31	83.7	1.10	53.568
El Chicaco - Aguacatlán	8	18	7.6	6.92	122	1.00	78.08
Rancho Los Sauces	9	20.1	7.31	3.57	593	6.00	379.52
Pozo 29-Humeros	10	33.3	7.7	5.56	1028	2.05	657.92
Pozo 38-Humeros	11	34.1	7.66	4.43	1069	2.20	684.16
PGH4 Humeros	13	23.3	7.05	3.07	317	3.90	202.88
Huitzitzilapan	14	14.2	7.04	5.81	148	1.30	94.72
Tehuacan-San Miguel	15	16.8	7.04	6	602	6.50	385.28
La Olímpica 1	16	15.3	6.94	1.56	554	6.90	354.56
La Olímpica 2	17	14.6	7.04	4.45	503	6.00	321.92
Zacatepec, Villa del Carmen	18	18.4	6.73	1.66	1871	13.14	1197.44
Puchintoc	19	20	7.02	2.18	561	2.50	359.04
Sesder	20	20	7.11	3.1	603	4.60	385.92
Buenavista	21	17.9	6.31	2.08	201	1.80	128.64
San Miguel Barrientos	22	18.4	6.82	6.35	356	2.65	227.84
La Quinta	24	17	6.64	6.75	205	1.40	131.2
El Progreso	25	16.4	6.88	6.18	187	1.80	119.68

## ANEXO 3. Concentraciones de elementos traza

Tabla 9. Concentración de elementos traza expresado en µg/L (1 de 3).

<i>Num. de muestra</i>	<i>Sitio</i>	<i>Li</i>	<i>Be</i>	<i>B</i>	<i>Al</i>	<i>Ti</i>	<i>V</i>	<i>Cr</i>	<i>Mn</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>
1	Rancho Jardín Dorado-Pozo2	393	<L.D.	1815	90.5	2.97	13.2	2.73	84.7	68	0.85
2	Rancho Jardín Dorado-Pozo1	397	0.05	2021	178	5.96	15.6	4.66	5.27	107	0.47
3	Cofre de Perote m4 "El Conejo"	7.29	<L.D.	43.31	77.1	<L.D.	1.99	1.15	3.31	37.1	0.22
4	Mazapa 3	7.5	<L.D.	44.9	52.6	2.85	4.37	1.11	1.41	24.3	0.18
5	Mazapa	1.86	0.09	54.66	1131	16.1	5.44	0.29	13.3	231	0.27
6	Zoatzingo-El Tesoro	24.4	0.03	18.65	128	7.07	4.71	0.86	3.33	59.7	0.75
7	Santa Rosalía	15.1	<L.D.	25.62	81.9	7.67	3.98	<L.D.	1.96	60.1	0.42
8	El Chicaco - Aguacatlán	30.3	<L.D.	40.88	89.1	2.31	15.2	<L.D.	2.52	39.2	0.32
9	Rancho Los Sauces	105	<L.D.	<L.D.	106	4.58	20.3	1.53	3.03	74.6	0.17
10	Pozo 29-Humeros	274	0.16	3.6E+05	743	4.11	4.33	4.61	15.2	234	0.26
11	Pozo 38-Humeros	299	0.18	4.2E+05	917	4.63	4.7	5.4	20.9	308	0.47
13	PGH4 Humeros	46.9	<L.D.	194.1	86.2	6.36	13.6	<L.D.	1.83	44.5	0.12
14	Huitzililapan	11.3	<L.D.	<L.D.	8.7	2.4	3.91	0.97	1.82	9.39	0.57
15	Tehuacan-San Miguel	22.7	<L.D.	<L.D.	15.9	5.38	0.61	1.75	2.86	22.9	0.81
16	La Olímpica	16.2	<L.D.	18.11	19.8	3.99	2.22	0.14	2.07	13.5	0.59
17	La Olímpica	29.3	0.01	<L.D.	51.9	4.63	2.66	3.25	3.69	39.9	1.05
18	Zacatepec, Villa del Carmen	96.3	<L.D.	1078	28.3	3.38	0.05	1.68	141	3949	0.53
19	Puchintoc	13.9	<L.D.	0.791	14.9	2.75	3.86	1.24	2.09	8.66	0.49
20	Sesder	10.1	<L.D.	33.42	0.53	0.72	8.66	31.6	2.54	84	0.46
21	Buenavista	18.1	0.06	22.3	1602	70.1	6.45	1.37	201	512	2.09
22	San Miguel Barrientos	3.96	<L.D.	33.55	9.87	1.12	15.9	1.78	1.82	22.7	0.52
24	La Quinta	41.3	0.05	18.69	112	<L.D.	9.47	0.61	3.23	43.4	1
25	El Progreso	12.2	<L.D.	47.82	62.4	1.74	8.32	0.57	1.71	26.9	0.33

<L.D. (menor al límite de detección del equipo).

Tabla 9. Concentración de elementos traza expresado en µg/L (2 de 3).

Num. de muestra	Sitio										
		Ni	P	Cu	Zn	Ge	Rb	Sr	Zr	As	Mo
1	Rancho Jardín Dorado-Pozo2	7.15	233	16.2	76.1	0.29	33.3	448	0.62	4.04	4.66
2	Rancho Jardín Dorado-Pozo1	5.68	171	8.17	77.5	0.22	34.5	619	1.44	3.17	5.16
3	Cofre de Perote m4 "El Conejo"	0.94	57.5	1.79	6.53	0.15	16.8	39.8	0.85	0.18	0.54
4	Mazapa 3	1.62	121	2.43	21.3	0.17	15.1	91.1	0.48	0.17	0.53
5	Mazapa	1.92	49	4.11	3.76	0.2	12.4	47.2	2.22	0.17	0.45
6	Zoatzingo-El Tesoro	4.27	56.9	6.72	80.4	0.19	16.5	51.8	0.78	0.28	0.49
7	Santa Rosalía	1.72	51.3	2.64	12.4	0.15	14.2	64.2	0.5	0.21	0.36
8	El Chicaco - Aguacatlán	1.82	97.1	2.87	12.6	0.25	5.31	26.4	0.34	1.86	2
9	Rancho Los Sauces	1.48	122	3.62	12.3	0.22	17.4	132	0.62	3.41	8.31
10	Pozo 29-Humeros	2.28	354	8.68	27.2	6.04	81.6	30.5	0.39	4429	182
11	Pozo 38-Humeros	1.5	459	4.51	12.6	7.01	88.8	31.8	0.69	5045	200
13	PGH4 Humeros	1.11	92	3.56	<L.D.	0.52	7.99	83.7	0.35	3.51	3.44
14	Huitzitzilapan	1.07	71.2	3.01	22.3	<L.D.	3.17	19.9	<L.D.	0.08	<L.D.
15	Tihuapan-San Miguel	3.39	31.9	5.2	113	<L.D.	2.25	81.8	0.19	0.16	1.67
16	La Olímpica	1.42	30.4	3.97	36.5	<L.D.	3.9	207	0.09	0.56	1.25
17	La Olímpica	3.18	41.2	7.53	53.6	0.02	4.25	220	0.5	0.75	1.77
18	Zacatepec, Villa del Carmen	6.19	140	2.7	12.4	<L.D.	10.4	2119	0.27	<L.D.	1.49
19	Puchintoc	0.8	57.6	2.56	15.3	<L.D.	1.08	135	<L.D.	0.31	<L.D.
20	Sesder	3.97	31.9	1.71	25.2	<L.D.	3.98	181	0.14	2.18	10.8
21	Buenvista	4.47	48.9	7.1	44.4	<L.D.	2.51	103	2.41	0.84	0.58
22	San Miguel Barrientos	0.61	245	4.17	82.3	<L.D.	2.94	119	0.32	2.11	0.65
24	La Quinta	3.35	100	6.22	21.7	0.15	18.2	112	0.93	0.46	0.57
25	El Progreso	2.77	87.5	2.46	20.7	0.2	16.1	134	0.38	0.21	0.3

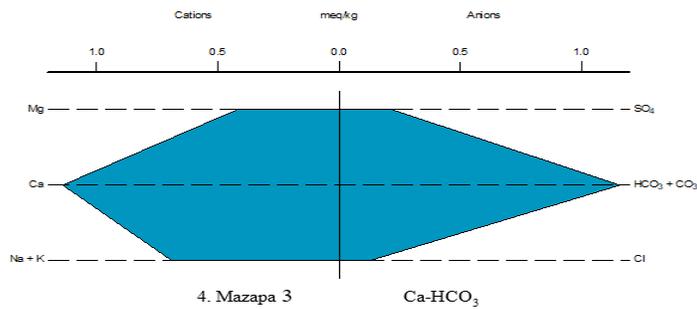
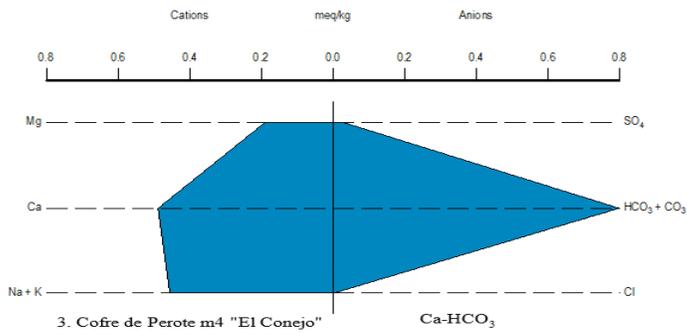
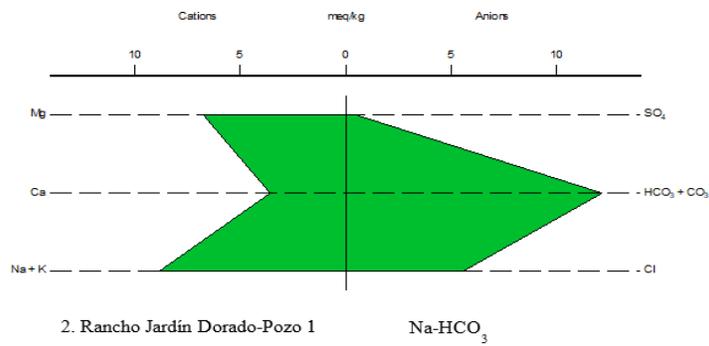
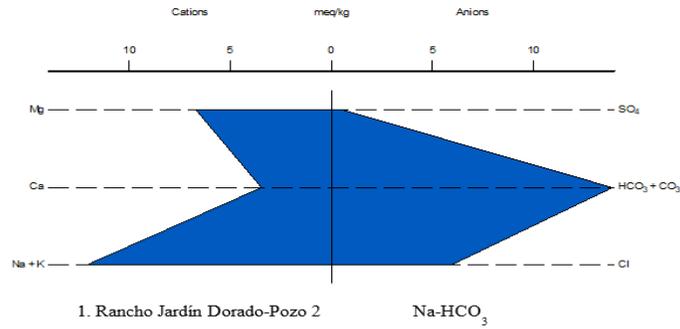
<L.D. (menor al límite de detección del equipo).

Tabla 9. Concentración de elementos traza expresado en µg/L (3 de 3).

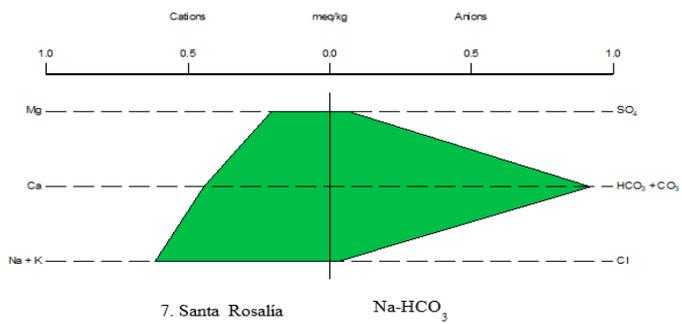
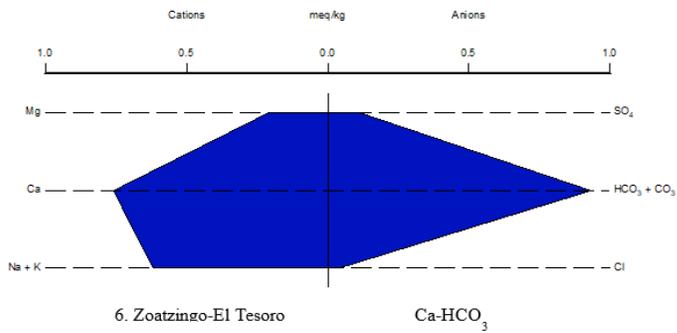
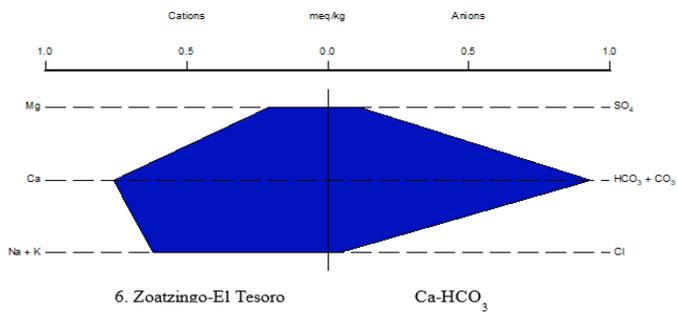
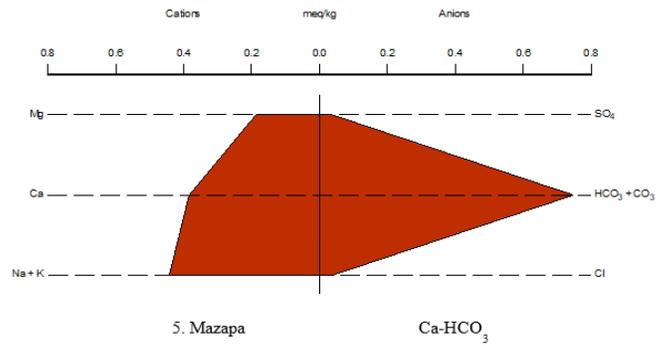
Num. De muestra	Sitio										
		Se	Cd	Cs	Ba	Sb	Te	Hg	Tl	Pb	U
1	Rancho Jardín Dorado-Pozo2	1.04	1.37	0.97	134	0.59	185	<L.D.	0.04	19.9	0.13
2	Rancho Jardín Dorado-Pozo1	0.88	3.56	0.51	178	0.25	206	<L.D.	0.03	48.8	0.2
3	Cofre de Perote m4 "El Conejo"	0.18	0.39	0.24	5.91	<L.D.	20.5	1.3	<L.D.	7.72	<L.D.
4	Mazapa 3	<L.D.	0.69	0.21	34.9	0.01	51.3	<L.D.	<L.D.	12	<L.D.
5	Mazapa	<L.D.	0.37	0.14	9.81	0.31	41.8	<L.D.	0.02	6.47	<L.D.
6	Zoatzingo-El Tesoro	<L.D.	1.85	0.07	16.5	0.65	18.7	<L.D.	<L.D.	22.4	<L.D.
7	Santa Rosalía	<L.D.	1.32	<L.D.	13.9	0.43	16.9	<L.D.	<L.D.	14.7	<L.D.
8	El Chicaco - Aguacatlán	0.13	1.19	0.15	3.69	0.39	9.34	<L.D.	<L.D.	13	<L.D.
9	Rancho Los Sauces	0.28	0.8	0.55	27.5	0.19	49.4	<L.D.	0.02	12.4	0.09
10	Pozo 29-Humeros	15.7	1.36	101	6.79	19.3	15.7	4.16	0.22	18.6	<L.D.
11	Pozo 38-Humeros	13.1	0.47	113	6.66	22.7	39	3.98	0.28	8.82	<L.D.
13	PGH4 Humeros	0.12	0.23	0.36	3.2	0.23	0	<L.D.	<L.D.	4.7	<L.D.
14	Huitzitzilapan	0.19	1.16	0.16	6.08	0.59	109	<L.D.	<L.D.	20	<L.D.
15	Tehuapan-San Miguel	0.92	2.5	0.15	20.7	0.78	79.1	<L.D.	0.02	38.2	0.04
16	La Olímpica	0.67	1.59	0.05	59.4	0.49	72.9	<L.D.	0.07	25.4	0.04
17	La Olímpica	1.77	3.36	0.12	94.9	0.51	183	<L.D.	0.05	45.5	0.06
18	Zacatepec, Villa del Carmen	<L.D.	0.03	1.39	96.7	0.34	91.9	<L.D.	<L.D.	11.7	<L.D.
19	Puchintoc	0.51	0.88	0.11	29	0.32	103	<L.D.	<L.D.	17.3	0.02
20	Sesder	0.85	0.23	0.11	254	0.68	288	<L.D.	0.5	11.4	0.13
21	Buenavista	<L.D.	1.96	0.01	39	0.4	61.2	<L.D.	0.01	29.3	<L.D.
22	San Miguel Barrientos	<L.D.	0.5	<L.D.	8.84	0.43	49	<L.D.	<L.D.	14.2	0.12
24	La Quinta	0.37	3.27	0.17	23.3	0.79	57.3	<L.D.	<L.D.	34.3	0.02
25	El Progreso	<L.D.	0.81	0.16	23.6	0.28	38.3	<L.D.	<L.D.	10.9	0.01

<L.D. (menor al límite de detección del equipo).

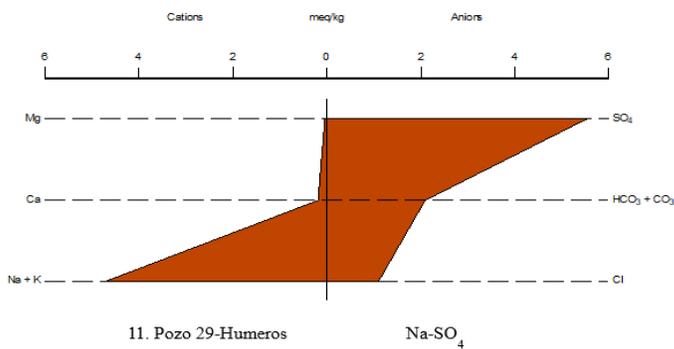
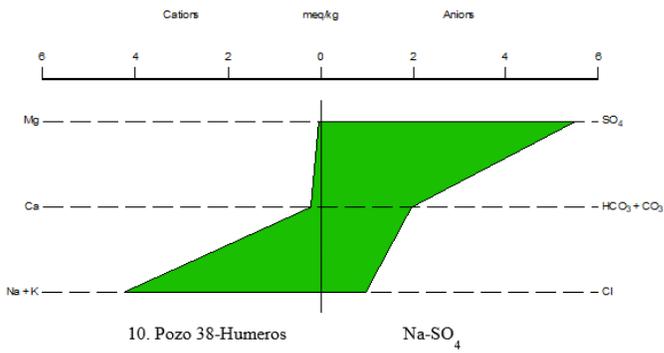
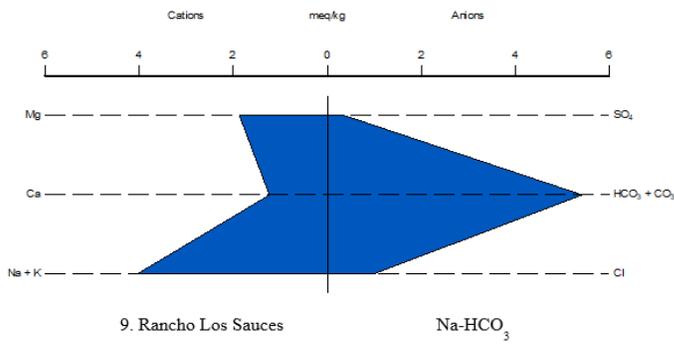
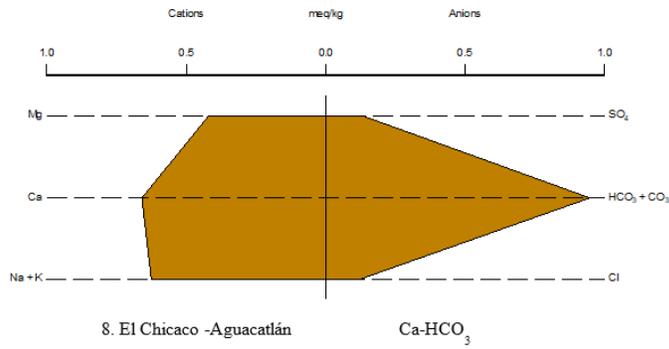
### ANEXO 4. Diagramas Stiff



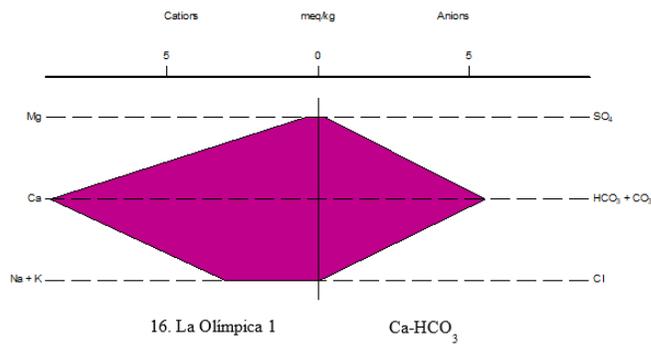
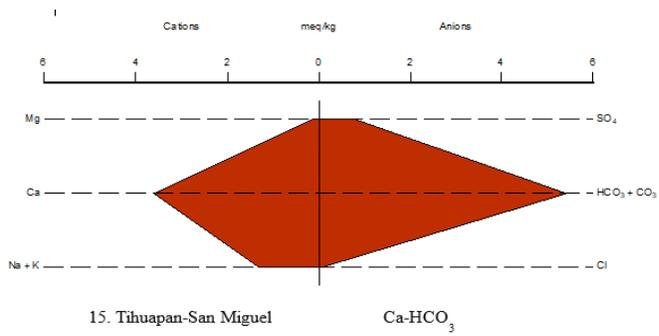
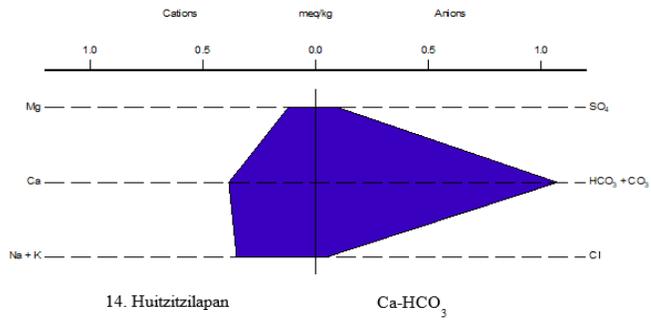
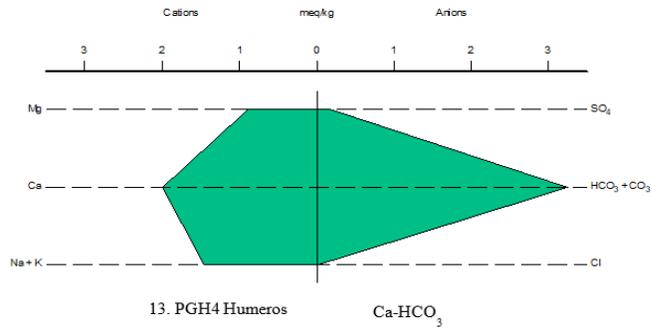
# Diagramas Stiff



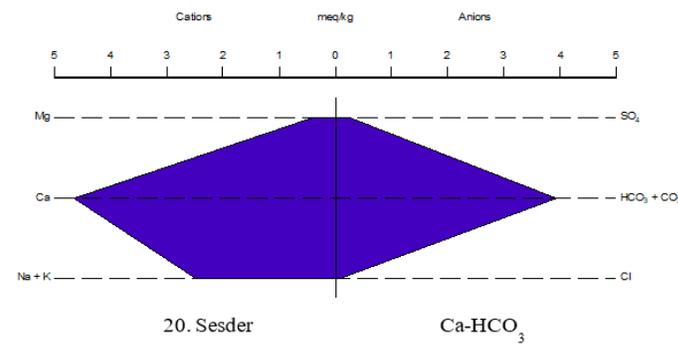
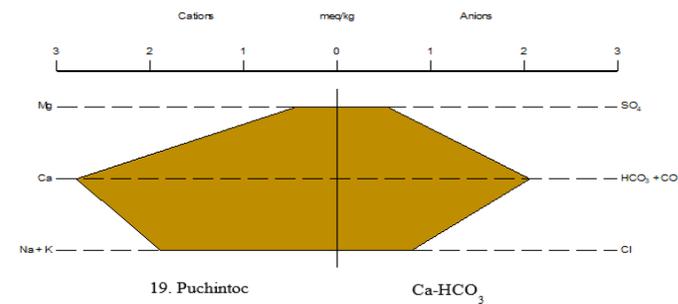
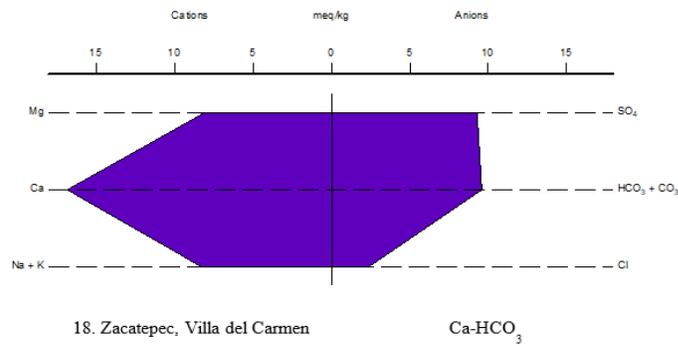
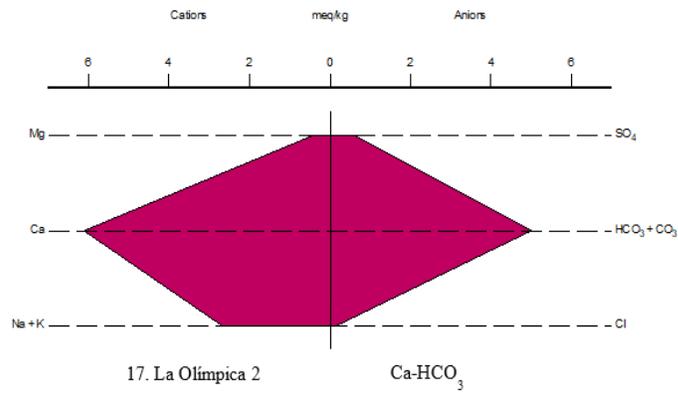
### Diagramas Stiff



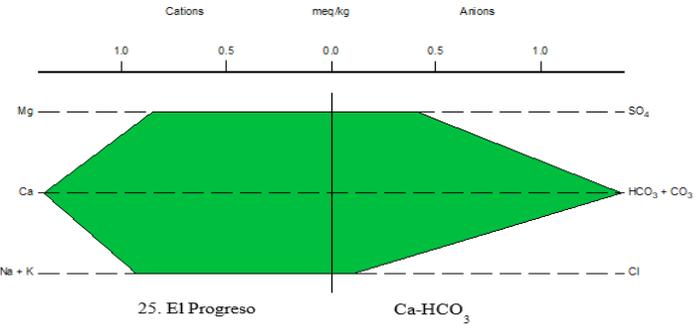
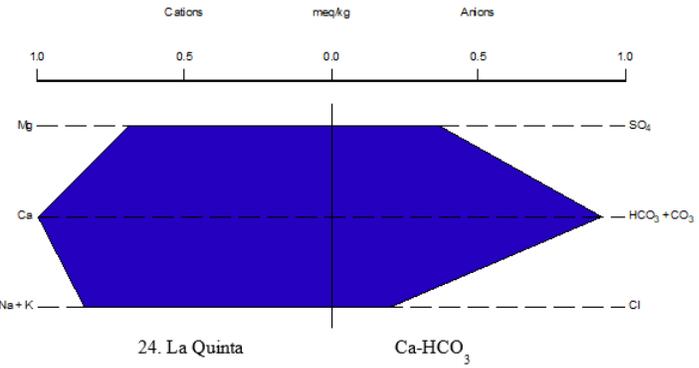
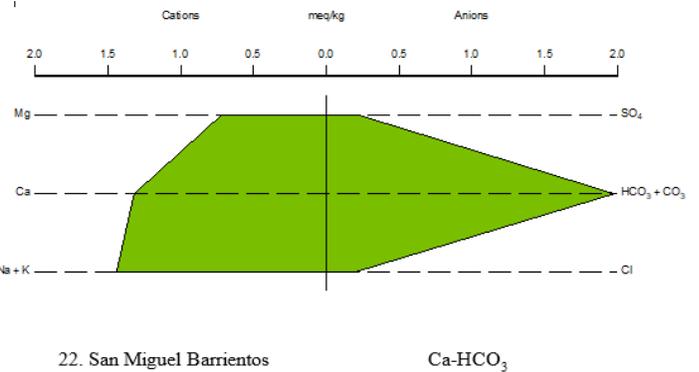
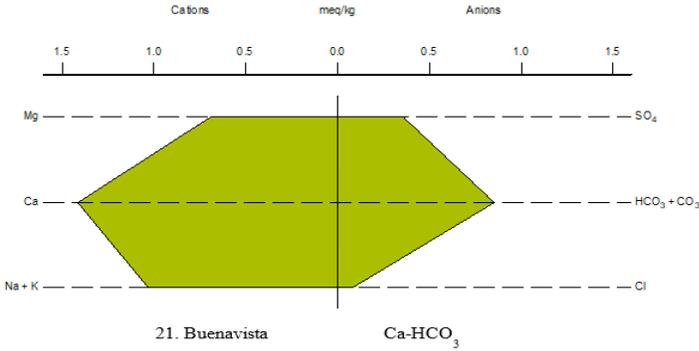
### Diagramas Stiff



### Diagramas Stiff



### Diagramas Stiff



## ANEXO 5. Técnica de determinación de dureza total DETERMINACIÓN DE DUREZA TOTAL. NMX-AA-072-SCFI-2001.

El método se basa en la formación de complejos por la sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético con los iones de calcio y magnesio presentes en el agua. El método consiste en una valoración empleando un indicador visual de punto final (negro de eriocromo T), el cual es de color rojo en la presencia de calcio y magnesio y vira a azul cuando estos se encuentran acomplejados o ausentes. El complejo EDTA con el calcio y el magnesio es más fuerte que el que estos iones forman con el negro de eriocromo T, por lo tanto la competencia de los iones se desplaza hacia la formación de los complejos con EDTA desapareciendo el color rojo de la disolución y tornándose azul.

### MATERIAL Y EQUIPO

- Balanza analítica
- Bureta
- Material volumétrico

### PROCEDIMIENTO

#### 1.- Titulación de muestras

1.1. Colocar 50 mL de muestra en matraz Erlenmeyer de 250 mL

1.2. Añadir 1 mL o 2 mL de disolución amortiguadora (16.9 g de cloruro de amonio disueltos en 143 mL de amoniaco concentrado, adicionando 1.25 g de sal de magnesio de EDTA y diluido hasta 250 mL con agua), hasta pH de 10.0 a 10.1.

1.3. Agregar el indicador de eriocromo negro T (0.2 g). La muestra toma color vinorrojizo.

1.4. Titular con la disolución de EDTA 0.01 M (3.723 g de sal disódica del ácido etilendiaminotetraacético dihidratada, en 1L de agua), agitando continuamente hasta desaparecer color rojizo y observar cambio de color rojizo a azul.

### CÁLCULOS

$$Dureza\ total\ expresada\ como\ CaCO_3\ \left(\frac{mg}{L}\right) = \frac{(A - B) * C * 1000}{D}$$

Donde:

A son los mL de EDTA gastados en la titulación de la muestra

B son los mL de EDTA gastados en la titulación del blanco

C son los mg de CaCO<sub>3</sub> equivalentes a 1 mL de EDTA

D son los mL de muestra La dureza total se expresa como mg/L CaCO<sub>3</sub>.

## **DETERMINACIÓN DE ALCALINIDAD. NMX-AA-036-SCFI-2001.**

La alcalinidad se refiere a la presencia de sustancias hidrolizables en agua, que como producto de hidrólisis generan el ion hidroxilo (OH<sup>-</sup>), como las bases fuertes y los hidróxidos de los metales alcalinotérreos principalmente, aunque también contribuyen a la alcalinidad los carbonatos y fosfatos, los boratos y silicatos pueden contribuir si se encuentran en concentraciones altas.

La alcalinidad total del medio es la cantidad de ácido fuerte necesaria para llevar el pH de la muestra a un valor predeterminado coincidente con el vire del naranja de metilo. El método se basa en la medición de la alcalinidad por medio de una valoración de la muestra empleando como disolución valorante ácido de concentración conocida.

### **MATERIAL Y EQUIPO**

- Balanza analítica
- Estufa
- Bureta
- Material volumétrico

### **PROCEDIMIENTO**

#### 1.- Valoración de ácido sulfúrico o clorhídrico (0.02 N).

- 1.1. Pesar 0.0265 g del patrón primario de carbonato de sodio, secado a 105°C.
- 1.2. Añadir 25 mL de agua y unas gotas de disolución de naranja de metilo
- 1.3. Valorar con el ácido hasta el vire del indicador (de canela a amarillo)
- 1.4 Calcular normalidad

#### 2.- Alcalinidad

- 2.1. Transferir 100 mL de muestra en un matraz Erlenmeyer de 250 mL.
- 2.2. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de fenolftaleína.
- 2.3 Titular con disolución valorada de ácido hasta el vire de la fenolftaleína (de rosa a incoloro), registrar mL gastados.
- 2.4. Adicionar 2 gotas de disolución indicadora de naranja de metilo.
- 2.5. Titular hasta alcanzar el vire del naranja de metilo; de canela a amarillo (alcalinidad total)
- 2.6. Registrar volúmenes para ambos puntos finales
- 2.7. Calcular alcalinidad, tomando en cuenta el vire de los indicadores.

## CÁLCULOS

### 1.- Cálculo de la normalidad

$$N = \left( \frac{A}{B * 204.2} \right) * 1000$$

Donde:

N es la normalidad del NaOH, equivalentes/L

A son los gramos de biftalato de potasio

B son los mL de hidróxido de sodio utilizados

204.2 son los gramos por equivalente de biftalato de potasio

### 2.- Calculo de Alcalinidad

$$\text{Alcalinidad total como CaCO}_3 \text{ en } \frac{\text{mg}}{\text{L}} = \frac{A * N}{100} * (50)(1000)$$

Donde:

A es el volumen total gastado de ácido en la titulación al vire del naranja d metilo en mL

N es la normalidad de la disolución de acido

100 es el volumen de la muestra en mL

50 es el factor para convertir eq/L a mg CaCO<sub>3</sub>/L

1000 es el factor para convertir mL a L

Reportar alcalinidad en mg CaCO<sub>3</sub>/L con la precisión correspondiente.

## ANEXO 6. CÁLCULO DE $\text{HCO}_3^-$ y $\text{CO}_3^{2-}$

Los  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{CO}_3^{2-}$  se calcularon mediante las siguientes ecuaciones, con base en los valores de alcalinidad total y pH obtenidos (Deutsch, 1997):

$$\text{CO}_3^{2-} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{[\text{alcalinidad total} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)] [60]}{\left( 2 + \left( \frac{10^{-\text{pH}}}{10^{-10.3}} \right) \right) (50)}$$

$$\text{HCO}_3^- \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{[\text{alcalinidad total} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right)] [61]}{\left( 1 + \left( 2 * \frac{10^{-10.3}}{10^{-\text{pH}}} \right) \right) (50)}$$

## ANEXO 7. Técnica determinación de ion sulfato

### DETERMINACIÓN DEL ION SULFATO. NMX-AA-074-1981.

El método se basa en la precipitación del ion sulfato, y el peso como sulfato de bario después de eliminar la sílice y materia insoluble.

#### MATERIAL Y EQUIPO

- Papel filtro de poro fino con contenido de cenizas conocido
- Baño de vapor
- Horno de secado
- Mufla
- Desecador
- Balanza analítica
- Capsula de platino

## PROCEDIMIENTO

- 1.- Eliminación de sílice
- 2.- Transferir un volumen de muestra clarificada que contenga no más de 50 mg de ion sulfato y ajustar a un volumen de 250 mL.
- 3.- Llevar a un pH de 4.5-5.0 con solución de HCl 1:1
- 4.- Adicionar de 1-2 mL de solución de HCl 1:1, calentar la solución a ebullición y agitar lentamente, agregar lentamente solución de cloruro de bario caliente hasta precipitación completa. Añadir aproximadamente 2 mL en exceso de solución de cloruro de bario. Si la cantidad de precipitado es pequeña, agregar un total de 5 mL de solución de cloruro de bario.
- 5.- Digerir precipitado a 80°C -90°C durante 10 a 12 horas.
- 6.- Mezclar pequeña cantidad de la pulpa del papel filtro de cenizas conocidas con el precipitado de sulfato de bario y filtrar a temperatura ambiente. La filtración de la pulpa facilita y reduce la tendencia del precipitado a separarse.
- 7.- Lavar precipitado con agua caliente, para que los lavados estén libres de cloruros y hasta que 10 mL de las aguas de lavado no produzcan turbiedad al adicionarles 1 mL de AgNO<sub>3</sub>.
- 8.- Secar papel filtro y precipitado en estufa, pasar a la mufla a 800°C durante 1 hora.
- 9.- Enfriar en desecador y pesar.

## CÁLCULOS

La concentración del ion sulfato en mg/L se obtiene aplicando la fórmula siguiente: 1 mg de BaSO<sub>4</sub>= 0.4115 mg de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>

$$\text{sulfatos} \left( \frac{\text{mg}}{\text{L}} \right) = \frac{(A * 0.4115 * 1000)}{B}$$

Donde:

A es el peso del sulfato de bario en mg

B es el volumen de la muestra original en mL

## ANEXO 8. Técnica determinación de cloruros totales

### DETERMINACIÓN DE CLORUROS TOTALES. NMX-AA-073-SCFI-2001.

El método se basa en una valoración con nitrato de plata utilizando cromato de potasio como indicador. La plata reacciona con los cloruros para formar un precipitado de cloruro de plata de color blanco. Al agotarse el ion cloruro antes del punto de equivalencia, comienza la precipitación del cromato. La formación de cromato de plata se identifica por el cambio de color de la disolución a anaranjado-rojizo así como en la forma del precipitado. En este momento se da por terminada la valoración.

#### MATERIAL Y EQUIPO

- Bureta
- Balanza analítica
- Potenciómetro para medición de pH

#### PROCEDIMIENTO

##### 1.- Acondicionamiento de la muestra

1.1. Utilizar un volumen de muestra de 100 mL. Ajustar el pH entre 7 y 10, utilizando las disoluciones de NaOH 0.1 N y/o H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0.1 N.

1.2. Si la muestra tiene mucho color, añadir de 3 a 5 mL de suspensión de Al(OH)<sub>3</sub>, antes de acondicionar. Mezclar, dejar sedimentar y filtrar con papel filtro cualitativo.

##### 2.- Valoración

2.1. A 100 mL de muestra acondicionada, adicionar 1 mL de disolución indicadora de cromato de potasio.

2.2. Valorar con disolución patrón de nitrato de plata hasta el vire de amarillo a naranja rojizo.

2.3. Titular un blanco con las muestras.

#### CÁLCULOS

La concentración de iones cloruro en mg/L se calcula con la siguiente ecuación:

$$Cl^{-} \left( \frac{mg}{L} \right) = \frac{[(A - B) * N * 35.45]}{ml. de muestra}$$

Donde:

A son los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración de la muestra,  
B son los mL de disolución de nitrato de plata gastados en la valoración del blanco,  
N es la normalidad del nitrato de plata.

