

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



**CARACTERIZACIÓN Y EVALUACIÓN GEOQUÍMICA Y
AMBIENTAL DE LAS AGUAS SUPERFICIALES EN UNA
CENTRAL GEOTÉRMICA DE EL SALVADOR**

PRESENTADO POR:

**MAYRA LISSETE ALVARENGA MIRA
EDUARDO ENRIQUE CASTELLANOS ALVARADO
COREAS MARTÍNEZ DONELY SARAÍ**

**DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMERICA LATINA
EDICIÓN 2019**

ASESOR:
**ING. ANTONIO MATUS
ING. LUIS FRANCO**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2019

CONTENIDO

RESUMEN.....	7
INTRODUCCIÓN.....	7
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.....	8
OBJETIVOS.....	8
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS ESPEFIFICICOS	8
1 MARCO TEÓRICO.....	9
1.1 GEOLOGÍA DEL SISTEMA.....	9
1.2 Descripción de la Geología del Área	11
1.3 GEOQUÍMICA.....	12
1.3.1 Clasificación de las aguas.....	12
2 METODOLOGÍA.....	16
2.1 Recopilación de información.....	16
2.2 Clasificación de las aguas	16
3 ANÁLISIS DE DATOS.....	19
3.1 Mapa de la zona de estudio.....	19
3.2 Muestras analizadas	20
3.3 Clasificación de las aguas según el ion dominante.....	21
3.4 Diagrama ternario de los aniones y cationes predominantes.....	22
3.5 Clasificación de las aguas según PH.....	23

3.6	Evolución	24
3.7	Diagramas de stiff de muestras más representativas	31
3.8	Geotermómetro	34
4	PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.	36
	CONCLUSIONES	37
	RECOMENDACIONES.....	38
	AGRADECIMIENTOS.....	38
	REFERENCIAS	39
	APÉNDICES.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de geología de la zona de estudio. (2019). [ilustración]. Fuente: LaGeo	10
Figura 2: Mapa de fallas de la zona de estudio. (2019). [ilustración]. Fuente: LaGeo	10
Figura 3: Diagrama de PIPER. (2019). [Esquema]. Fuente: (emaze).....	17
Figura 4: Diagramas de Stiff para clasificación de aguas. (2019). [Esquema]. Fuente: (aguaysig).....	18
Figura 5: Mapa de la zona de estudio.	19
Figura 6: Diagrama de PIPER.	22
Figura 7: Diagrama de aniones	22
Figura 8: Diagrama de cationes predominantes.....	23
Figura 9: Contenido de cloruros de muestras en estudio. (2019). [Grafico]	24
Figura 10: Contenido de cloruros de muestras en estudio. (2019). [Grafico]	25
Figura 11: Contenido de sulfatos de muestras en estudio. (2019). [Grafico].....	25
Figura 12: Contenido de sulfatos de muestras en estudio. (2019). [Grafico].....	26
Figura 13: Contenido de Boro de muestras en estudio. (2019). [Grafico].....	26
Figura 14: Contenido de Boro de muestras en estudio. (2019). [Grafico].....	27
Figura 15: Contenido de Arsénico de muestras en estudio. (2019). [Grafico].....	27
Figura 16: Contenido de Arsénico de muestras en estudio. (2019). [Grafico].....	28
Figura 17: Evolución geoquímica de cloruros. (2019). [Grafico].....	29
Figura 18: Evolución geoquímica de Sulfatos. (2019). [Grafico].....	29
Figura 19: Evolución geoquímica de Boro. (2019). [Grafico].....	30
Figura 20: Evolución geoquímica de Arsénico. (2019). [Grafico].....	30
Figura 21: Diagrama de Stiff para muestra F-129.....	31

Figura 22: Diagrama de Stiff para muestra F-103.....	31
Figura 23: Diagrama de Stiff para muestra F-45	32
Figura 24: Diagrama de Stiff para muestra ER2.....	32
Figura 25: Diagrama de Stiff para muestra DRSS	33
Figura 26: Diagrama de Stiff para muestra P-22.....	33
Figura 27: Diagrama de Stiff para muestra ANDA1	34
Figura 28: Geotermómetro de Giggensbach.....	34
Figura 29: Diagrama Boro-Cloro	35
Figura 30: Comportamiento de las muestras sulfatadas versus temperatura	40
Figura 31: Comportamiento químico aguas cloruradas versus el Arsénico.....	40
Figura 32: Comportamiento químico de los cloruros versus la temperatura.....	41

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Aniones y Cationes predominantes en clasificaciones de aguas.....	12
Tabla 2: Clasificación de las aguas según pH	14
Tabla 3: Clasificación de aguas según su dureza	15
Tabla 4: Clasificación de la calidad a partir de sustancias químicas de tipo inorgánica.....	15
Tabla 5: Muestras separadas de acuerdo a tipo.....	20
Tabla 6: Muestras de Fuentes más representativas	20
Tabla 7: Muestras de Pozos más representativos	21
Tabla 8: Muestras de Ríos más representativas	21
Tabla 9: Clasificación de las aguas según su tipo, uso y PH	23
Tabla 10: Clasificación de las aguas respecto a iones predominantes y según su pH.....	36
Tabla 11: Análisis de muestras respecto a normativa de calidad de agua y parámetros químicos.....	37

RESUMEN.

El presente estudio se centra en caracterizar y detallar la calidad de las aguas superficiales de la zona de estudio, que se realizó en un periodo antes de la explotación del campo como su evolución hasta la fecha presente. Las tres zonas de muestreo evidencian condiciones de cambios químicos de las aguas superficiales.

Como primer punto deben tenerse presentes condiciones geológicas de la zona para posteriormente considerar las fuentes de mayor interés para la caracterización y evaluación geoquímica y la hidrológica de la zona con la utilización de normativa nacional de las aguas superficiales en estudio

INTRODUCCIÓN.

Diversas actividades humanas producen la degradación de la calidad en los recursos hídricos, por ejemplo, las actividades agrícolas aportan al agua sustancias producto de la fertilización agrícola y residuos fitosanitarios provenientes de los plaguicidas; lodos de desecho de establecimientos ganaderos o agroindustriales, vertidos de origen humano como aguas negras, alteración hidrotermal y otras actividades industriales

A partir de estas actividades se produce una constante contaminación de recursos hídricos que son de vital importancia en el sector, los cuales afectan al medio ambiente y por ende a las personas que habitan en su entorno, por dicha contaminación se pueden generar diversos problemas tanto medioambientales como de salud humana, es por ello que la recuperación del recurso hídrico y el control y manejo de desechos por las industrias en estos, toma mucha importancia.

Para lograr tal recuperación se necesita tener un conocimiento detallado de las condiciones del manto acuífero, justamente de este hecho, surge la necesidad de realizar un análisis detallado que exponga las características de las aguas superficiales en estudio, así como también pueda describir los aspectos necesarios para realizar proyecciones a largo y mediano plazo.

Este análisis se vuelve aún más importante ya que genera información vital a la hora de establecer medidas de mitigación, estas acciones suelen ser inmediatas, ya que se empieza todo un proceso de recuperación del recurso en cuestión.

Para realizar el estudio, es necesario conocer cuáles son sus tributarios y realizar una serie de muestreos en ellos para recopilar información detallada que será introducida en algún software especializado para análisis químicos, con ello y otros análisis como el de la calidad de agua y la comparación de las condiciones del agua con normas nacionales de los valores permitidos.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La química de fluidos geotermales en el campo geotérmico de El Salvador tiene un papel importante en los estudios dinámicos de un sistema geotérmico pues por medio de los análisis geoquímicos se puede tener una idea aproximada de los cambios que han sufrido las aguas en un periodo estimado de más de veinte años

La zona de estudio ha tenido algunos cambios a lo largo del tiempo, los cuales, son indicadores de las condiciones termodinámicas de un campo geotérmico, entre ellos la presión y temperatura de este, cuyos valores son parámetros que motivan los cambios en la química y cinética de los fluidos geotermales los cuales influyen en las aguas superficiales.

El establecimiento de metodologías que permiten realizar un adecuado monitoreo de los parámetros geoquímicos de aguas superficiales es una técnica implementada dentro de la empresa para obtener los parámetros químicos de los acuíferos cercanos a la zona de explotación, pues en conjunto con el monitoreo de otras variables físicas y termodinámicas, permite tomar decisiones adecuadas para el manejo medioambiental de la calidad del agua de consumo humano

JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO.

- Hay presencia de actividad hidrotermal, lo cual puede indicar la existencia de sistemas de flujo regional de agua subterránea, afectando los acuíferos fracturados y porosos, condicionando el uso del agua para consumo humano solo por medio de tratamientos convencionales y avanzados.
- Línea base de la calidad de agua superficial aportará información técnica a emplear para evaluar las posibles interacciones de los acuíferos de esta zona con los proyectos de abastecimiento de agua.
- Por lo anterior, es necesario la elaboración de estudios Geoquímicos de las aguas superficiales que caractericen las formaciones acuíferas presentes, su extensión, capacidad, origen, y calidad del agua.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Caracterizar y evaluar la calidad de agua superficial en un sistema geotérmico de El Salvador para proponer medidas apropiadas de manejo a través de tecnologías adecuadas con enfoque de Ingeniería Química.

OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Analizar la calidad de las aguas superficiales en el campo geotérmico y el comportamiento geoquímico de estas.
- Analizar mediante el uso de programas el comportamiento químico de las aguas superficiales
- Establecer algunas relaciones iónicas que permitan comprender las reacciones fisicoquímicas que afectan a las aguas.

- Determinar las características físicas y composición química de las muestras de agua y clasificar cada tipo de agua, según los iones predominantes.

1 MARCO TEÓRICO.

1.1 GEOLOGÍA DEL SISTEMA

De las características físicas intrínsecas o no de las rocas depende la circulación de los fluidos, es decir el efecto de la geología en la hidrología, pero el efecto también es recíproco, aunque de diferente manera. El agua o los fluidos en general afectan de una u otra manera a las rocas, meteorizándolas, disolviéndolas o erosionándolas. Claro, influyen también otros factores aparte del agua. Sin embargo el agua tiene un efecto tal, que puede cambiar la morfología original de una superficie geológica, pero no es el único factor que da forma a las rocas para generar una superficie, existen muchos otros, lo cierto es que la geomorfología (formas del terreno en función de su origen geológico) sí influye en la circulación de los fluidos, de ahí la necesidad de hablar un poco de la geomorfología además de la geología, para entender mejor la hidrogeología (LaGeo, 2008).

La morfología del área de Sur a Norte de la cuenca del Río San Simón pasa de lobular de moderada elevación a llana en la parte Norte. Las elevaciones en la parte Sur son de 550 a 600 msnm y en la parte llana que se encuentra a 400 msnm. La parte lobular o de topografía relativamente ondulada se ha originado por coladas de lava, desarrolladas a partir de las erupciones del complejo volcánico de Tecapa que se sitúa al Sur del área (LaGeo, 2008).

1.2 Descripción de la Geología del Área

A continuación se describen las unidades de formación asociadas a eventos ocurridos durante la evolución geo vulcanológica del área, las cuales en su mayoría, se han observado en la litoestratigrafía de los pozos (LaGeo, 2008).

En el área afloran las siguientes unidades litoestratigráficas, (de la más antigua hasta la más joven):

Lavas, tobas y escorias del viejo edificio volcánico Berlín (Be)

Está formada por lavas del antiguo edificio volcánico de Berlín y de acuerdo a las muestras recolectadas en el oeste del edificio, evidencian que se trata de basaltos. Comparados con los basaltos más jóvenes, tienen significativamente más altos contenidos de K₂O, P₂O, Zn, Rb, Ba y Zr. Están intercalados con ignimbritas andesíticas (bi), lo que significa que las erupciones del antiguo volcán, continuaron después de las erupciones tempranas de las ignimbritas que formaron la caldera (LaGeo, 2008).

Ignimbrita Gris (gi)

Se presenta como una ignimbrita de carácter andesítico de color gris oscuro a negro, con bombas, lapilli pumícea café grisáceo y fragmentos líticos de lavas andesíticas. Los depósitos afloran rodeando al Complejo Volcánico Berlín-Tecapa. Subyaciendo a la ignimbrita gris gi, se encuentra una ignimbrita bi. En ambas existen grandes bloques de escoria, pocos lapilli pumícea Entre gi/bi se identifica un depósito en forma de capa de lapilli pumícea dacítico (LaGeo, 2008).

Las muestras en ambas ignimbritas son similares en mineralogía con fenocristales de plagioclasas (andesita-labradorita), dominante en augita, hipersteno y óxidos de hierro y titanio. Se observan trazas de olivino en la ignimbrita negra (LaGeo, 2008).

Lavas intracaldera de Berlín y escorias (bm)

Esta unidad se caracteriza por tener lavas andesíticas, andesítico-basáltica y basálticas, eruptadas desde el interior de la caldera de Berlín, posteriormente se formó la caldera con la erupción de la ignimbrita gris. Todas las lavas son andesita o andesita basáltica con medio Potasio. Todos tienen fenocristales de plagioclasas (andesina – bitownita), augita, ortopiroxeno (con poco clinopiroxeno) y óxidos de hierro y titanio (LaGeo, 2008).

Piroclastos Blanca Rosa (ri)

Depósitos que surgen de la formación de una caldera interna denominada Caldera Blanca Rosa. Se trata de depósitos gruesos de pómez los cuales contienen fenocristales de plagioclasas (oligoclasa-andesina) y poca augita e hipersteno con óxidos de hierro y hornblenda (LaGeo, 2008).

Lavas y escorias de los conos jóvenes de Berlín (by)

Se trata de lavas y escorias andesíticas, andesítico basáltica y basálticas de los conos volcánicos jóvenes del interior de la caldera de Berlín. Incluye flujos de lava hacia el norte y este de la caldera (LaGeo, 2008).

La parte llana, al Norte del área está constituida por materiales piroclásticos principalmente y por materiales de relleno que se erosionaron de la parte alta, tanto del Norte como principalmente del Sur, del complejo volcánico. Fueron depositados en un valle formado a partir del colapso tectónico que conforma la estructura conocida como Graben Central (LaGeo, 2008).

El material de relleno superficial tiene un espesor pequeño entre 4 y 5 m y está cubriendo depósitos piroclásticos con espesores mayores. La secuencia piroclástica según se reporta en la columna de los pozos perforados por ANDA, alcanza espesores de 30 m hasta llegar a unas lavas andesíticas (LaGeo, 2008).

La parte alta (al Sur) está conformada por coladas de lava provenientes del complejo volcánico con intercalaciones de escorias y algunos estratos de Piroclastos. Algunas de estas coladas se internan en el área de estudio (zona del pozo propuesto) y las partes más bajas de las mismas están siendo cubiertas por materiales piroclásticos y epiclásticos (LaGeo, 2008).

1.3 GEOQUÍMICA

1.3.1 Clasificación de las aguas

El agua se puede clasificar en diversas categorías, teniendo en cuenta su composición química, en dependencia, del método que se utilice (salinización, SULIN, PH e iones predominantes) y de las propiedades (físicas o químicas) o características de la muestra de agua que se analice. (Ramírez Martín, 2009)

1.3.1.1 Según iones predominantes

Otra clasificación de las aguas es atendiendo a los iones predominantes en la muestra. Es una de las clasificaciones más usada en la industria del petróleo para identificar modelos de aguas. En este método como primer paso, se separan los aniones y cationes con sus respectivos valores, como se muestra en el siguiente ejemplo: (Ramírez Martín, 2009)

Tabla 1: Aniones y Cationes predominantes en clasificaciones de aguas

Aniones	Cationes
Bicarbonatos (HCO ₃ ⁻)	Sodio (Na ⁺)

Carbonatos (CO ₃ ²⁻)	Calcio (Ca ²⁺)
Cloruros (Cl ⁻)	Potasio (K ⁺)
Sulfatos (SO ₄ ²⁻)	Magnesio (Mg ⁺)
Nitratos (NO ₃ ⁻)	-

Aguas Cloruradas Sódicas

Aguas circulando en profundidades, las sales disueltas en estas aguas son principalmente cloruro de sodio y cloruro de potasio, sin embargo en aguas más concentradas pueden existir apreciables concentraciones de calcio. Las aguas también contienen alto contenido de sílice y usualmente concentraciones significativas de sulfato, bicarbonato, fluoruro, amonio, arsénico, litio, rubidio, cesio y ácido bórico. La relación cloruro/sulfato es usualmente alta y el rango de pH va de moderadamente ácido a moderadamente alcalino (pH 5-9). Los gases disueltos principales son dióxido de carbono y sulfuro de hidrogeno. Las aguas a menudo ocurren en áreas con manantiales en ebullición y actividad de geysir y son comunes para muchas áreas geotérmicas en desarrollo tanto en rocas volcánicas y sedimentarias (Aráuz, 2016).

Aguas ácidas sulfatadas

Aguas ácidas, bajo contenido de cloruro, pueden ser formadas en áreas geotérmicas volcánicas donde el vapor por debajo de los 400° se condensa en las aguas superficiales. El sulfuro de hidrogeno del vapor es subsecuentemente oxidado a sulfato. Las aguas ácido sulfatadas son encontradas en áreas donde el vapor sube desde el agua subterránea de alta temperatura y en áreas volcánicas donde en etapas de enfriamiento de volcánico solo dióxido de carbono y gases de sulfuro permanecen en el vapor que sube a través de la roca. Los constituyentes presentes en las aguas son principalmente lixiviados de las rocas. Debido a su naturaleza generalmente superficial, su significado geoquímico es usualmente menor en investigaciones de trabajo (Aráuz, 2016).

Agua Bicarbonatadas sódicas

Aguas ricas en bicarbonatos son originadas ya sea por la disolución de CO₂ o por la condensación de vapor geotérmico en aguas subterráneas libre de oxígeno relativamente profundas. Debido a la ausencia de oxígeno se evita la oxidación de H₂S, la acidez de estas soluciones es debida a la disociación de H₂CO₃. A pesar de ser un ácido débil convierte los feldespatos y arcillas, generando soluciones acuosas neutrales, las cuales son ricas típicamente en sodio y bicarbonato, particularmente a temperatura media-alta. De hecho (Aráuz, 2016):

- La baja solubilidad de la calcita previene que las soluciones acuosas aumenten su contenido en calcio.
- Potasio y magnesio se fijan en arcillas y cloritas, respectivamente;

- Concentración de sulfato está limitada por la baja solubilidad de la anhidrita.

Las aguas bicarbonatadas sódicas se encuentran generalmente en la "zona de condensación de los sistemas de "vapor dominante" y en las zonas marginales en sistemas de líquido-dominante. Sin embargo, aguas de bicarbonato de sodio también están presentes en los yacimientos geotérmicos profundos alojados en rocas metamórficas y / o sedimentaria (Aráuz, 2016).

Aguas ácidas sulfatadas-cloruradas

Estas aguas pueden formarse por muchos procesos, tales como:

- Mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas a diferentes profundidades.
- Condensación cerca de la superficie de gases volcánicos en aguas meteóricas.
- Condensación de vapor magmático en las profundidades.
- Paso de fluidos clorurados a través de secuencias sulfato- soportes (ej. Evaporitas) o litologías que contengan sulfuro nativo.

Estas aguas tienen pH típicos de 2-5, con cloruro y sulfato en proporciones iguales aproximadamente. Las aguas formadas por los procesos (c) y (d) pueden ser identificadas por altas concentraciones de Cl, SO₄ y alto fluoruro (Aráuz, 2016).

1.3.1.2 Según el PH

El PH de una muestra de agua proporciona otra clasificación de la misma, este no es más que la concentración de iones hidronio (H₃O⁺) presente en la muestra (Ramírez Martín, 2009).

Tabla 2: Clasificación de las aguas según pH

Clasificación	Nivel del PH
Fuertemente ácida	< 3.5
Ácida	3.5 < x < 5.5
Débilmente ácida	5.5 < x < 6.8
Neutra	6.8 < x < 7.2
Débilmente básica	7.2 < x < 8.5
Básica	> 8.5

1.3.1.3 Según la dureza

- La dureza del agua se define como la suma de las concentraciones de calcio y magnesio, expresadas como CaCO_3 en mg/L. El rango de dureza varía entre 0 y cientos de mg/L, dependiendo de la fuente de agua y el tratamiento a que haya sido sometida.
- Existen dos tipos de dureza:
- Dureza temporal: está determinada por el contenido de carbonatos y bicarbonatos de calcio y magnesio. Puede ser eliminada por ebullición del agua y posterior eliminación de precipitados por filtración.
- Dureza permanente: está determinada por todas las sales de calcio y magnesio excepto carbonatos y bicarbonatos. No puede ser eliminada por ebullición.

Así que la dureza total equivale a la suma de la dureza temporal más la dureza permanente, según esa dureza las aguas se clasifican en:

Tabla 3: Clasificación de aguas según su dureza

Dureza como mg/L CaCO_3	Clasificación
0-75	Agua Blanda
75-150	Agua Poco Dura
150-300 (límite para agua potable)	Agua Dura
>300	Agua Muy Dura

1.3.1.4 Requisitos de calidad para sustancias químicas de tipo inorgánica

Tabla 4: Clasificación de la calidad a partir de sustancias químicas de tipo inorgánica

Parámetro	Límite máximo permisible
	(mg/l)
Arsénico	0.01
Bario	0.7
Boro	0.3

Mercurio	0.001
Níquel	0.02
Plomo	0.01
Nitrógeno	1.00

2 METODOLOGÍA.

2.1 Recopilación de información

Se recopiló la información que fue proporcionada por el departamento de geoquímica de investigación realizada en campo, los análisis de laboratorio de las muestras. A pesar que la información fue proporcionada, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos al momento de realizar la recolección de datos:

La mejor estrategia para la toma de muestras de consiste en recoger un número razonable de muestras de las fuentes de agua superficial, distribuidas por toda el área de estudio. De ser posible el levantamiento hidrogeoquímico debe llevarse a cabo al final de la estación seca, para obtener muestras de agua menos afectados por la mezcla con el agua de superficie (lluvia). Se debe garantizar la calidad del muestreo ya que malas técnicas de muestreo conllevan a datos erróneos, por lo tanto es importante que todos los equipos y materiales de muestreo se hayan verificado varios días antes de realizar la campaña de muestreo (Aráuz, 2016).

2.2 Clasificación de las aguas

Existen diversos gráficos que se utilizan para la clasificación de las aguas, en el presente informe se realizará la evaluación mediante los siguientes diagramas principalmente:

- Diagrama de PIPER

DIAGRAMA DE PIPER HILL LANGELIER



Figura 3: Diagrama de PIPER. (2019). [Esquema]. Fuente: (emaze)

El diagrama de Piper está formado por dos triángulos equiláteros donde se representan los cationes y aniones mayoritarios y un rombo en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes, este diagrama permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Aráuz, 2016).

Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes respectivamente. En cada triángulo se reúnen solo tres aniones (SO_4^{2-} , Cl^- y HCO_3^-) y tres cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$). A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión (Aráuz, 2016).

Este diagrama es muy utilizado porque ayuda a:

- Visualizar la evolución geoquímica de las aguas subterráneas.
- Detectar procesos como intercambio catiónico.
- Detectar mezclas entre dos tipos de agua.
- Detectar procesos de dilución o precipitación de especies iónicas.

- Junto con la cartografía y localización de los puntos de muestreo permite validar o lanzar hipótesis de la localización de la zona de recarga de los acuíferos.
- Diagrama Stiff

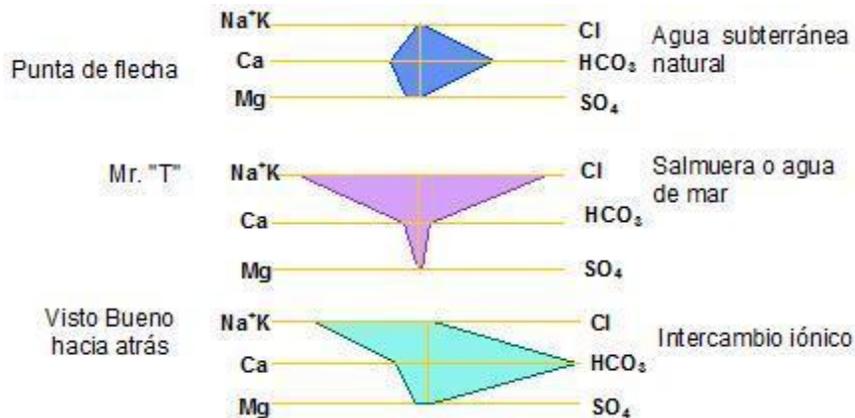


Figura 4: Diagramas de Stiff para clasificación de aguas. (2019). [Esquema]. Fuente: (aguaysig)

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{+2} con el HCO_3^- y el Mg^{+2} con el SO_4^{-2} (a veces también se pueden mostrar otros dos iones, como el Fe^{+2} contra el NO_3^-). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/l (Aráuz, 2016).

Dos características sobresalen en este tipo de diagrama: por un lado permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica), en la se muestran algunas apreciaciones de este diagrama que caracterizan varios tipos de aguas (Aráuz, 2016).

- El diagrama ternario $\text{Cl}-\text{SO}_4-\text{HCO}_3$

Es una de los esquemas de clasificación de las aguas naturales (Giggenbach, 1991). La posición de un punto de datos en el diagrama triangular se obtiene evaluando primero con la suma S de las concentraciones C_i (en mg / kg) de los tres componentes implicados (Aráuz, 2016):

$$S = C_{\text{Cl}} + C_{\text{SO}_4} + C_{\text{HCO}_3}$$

A partir de la suma (S), se obtienen los porcentajes de Cl y HCO₃, entonces $D = \% \text{HCO}_3 + 0.5 \% \text{Cl}$ es calculado. El % Cl y D se representan como ejes Y y X, respectivamente (Aráuz, 2016).

En este diagrama, los rangos de composición están indicados para varios grupos típicos de agua, tales como aguas volcánicas y aguas calentadas por vapor, aguas maduras y aguas periféricas. Normalmente, el grupo más adecuado para la aplicación de geo-indicadores comprenden las aguas neutrales con bajo sulfato, alto cloruro “aguas geotérmicas” a lo largo del eje de Cl-HCO₃, cerca de la esquina del Cl, nombradas aguas maduras (Aráuz, 2016).

El Diagrama Cl-SO₄-HCO₃ puede ser utilizado para clasificar aguas geotérmicas especialmente y para eliminar aguas no adecuadas para técnicas geoquímicas.

3 ANÁLISIS DE DATOS.

3.1 Mapa de la zona de estudio

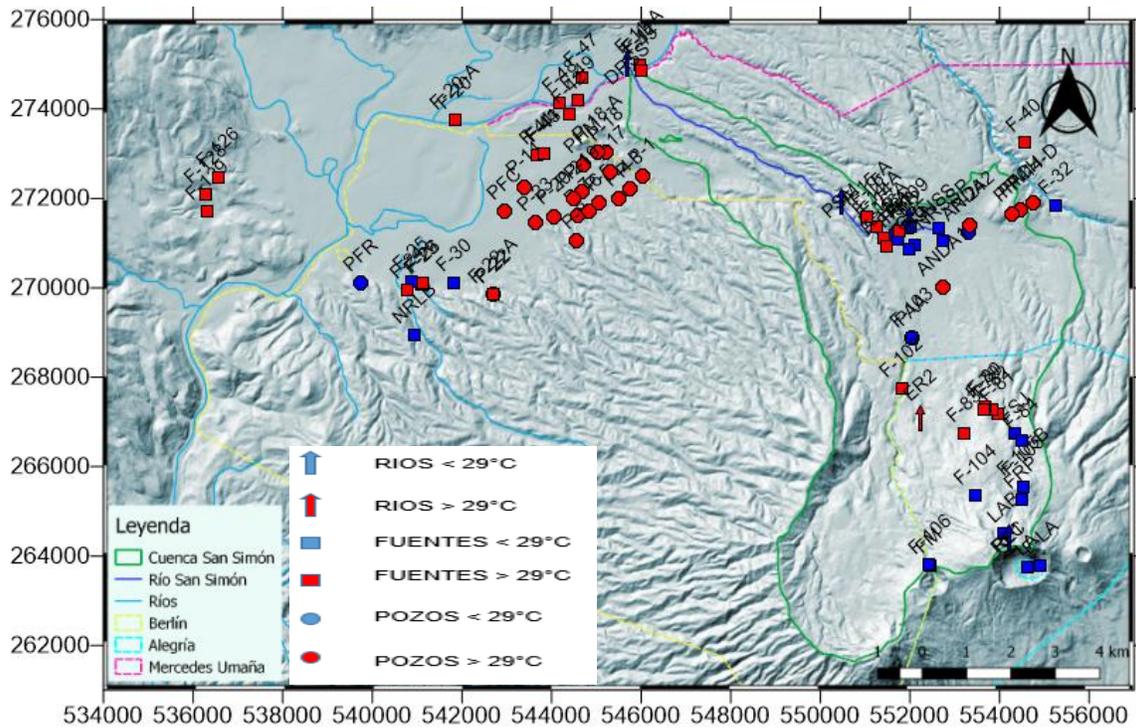


Figura 5: Mapa de la zona de estudio.

3.2 Muestras analizadas

Tabla 5: Muestras separadas de acuerdo a tipo

	Menores a 29°C	Mayores a 29°C
RIOS < 29°C	RIOS: RLP, RL1, RLC, LA,	RIOS:
RIOS > 29°C	CP, PSM, DRSS, NSS	
FUENTES < 29°C		
FUENTES > 29°C		
POZOS < 29°C	FUENTES: 103, 104, 105,	FUENTES: 1, 102, 11, 12,
POZOS > 29°C	105B, 106, 109, 2, 32, 5, F-	126, 128, 129, 14, 15, 20,
	LA, FM, FRP, FSJ,	40, 41, 44, 45, 47, 48, 49,
		79, 80, 81, 82
	POZOS: ANDA 2, PSDR,	POZOS: PFC, PFCH, PFM
	PFR	

Las tablas siguientes muestran los datos analizados para fuentes y los valores de temperatura y pH

Tabla 6: Muestras de Fuentes más representativas

Muestra	T °C	pH	Muestra	T °C	pH
F-LA	24.20	3.23	F-45	48	8
F-102	48.5	6.89	F-129	96.5	7.86
F-103	28.7	6.4			

La tabla siguiente muestra los datos analizados para pozos y los valores de temperatura y pH de la muestra

Tabla 7: Muestras de Pozos más representativos

Muestra	T °C	pH	Muestra	T °C	pH
P-ANDA 1	29.6	6.3	P-PA	27.5	7.21
P-ANDA 2	27.7	6.75	P-FR	28.1	6.92
P-22	30	8.37			

La tabla siguiente muestra los datos para Ríos y los valores de temperatura y pH de la muestra

Tabla 8: Muestras de Ríos más representativas

Muestra	T °C	pH
ER-2	38.3	7.27
CP	28	7.55
PSM	28	8.03
DRSS	28	8.61

A partir de la selección realizada se puede observar que estas muestras son de vital importancia debido a que son el abastecimiento de la población de la zona

3.3 Clasificación de las aguas según el ion dominante

La siguiente figura muestra que la mayoría de muestras se encuentran en la región de cálcicas magnésicas bicarbonatadas, una parte en las cálcicas sulfatas lo cual es indicativo de alteración geotérmica de los cuales las formaciones geológicas aportan el ion de sulfato a las aguas.

Estas presentes dos fuentes dos fuentes cloruradas sódicas, las cuales pertenecen a Obrajuelo F-128 y la F-20 pertenece a las Burras Rio Lempa.

El diagrama ternario de aniones nos muestra que la mayoría de las aguas son de origen bicarbonatadas, lo cual concuerda con el diagrama Piper mostrado. El segundo grupo son del tipo sulfatadas y como se observa ahora se logran mostrar los aniones predominantes F-20 Y F-128

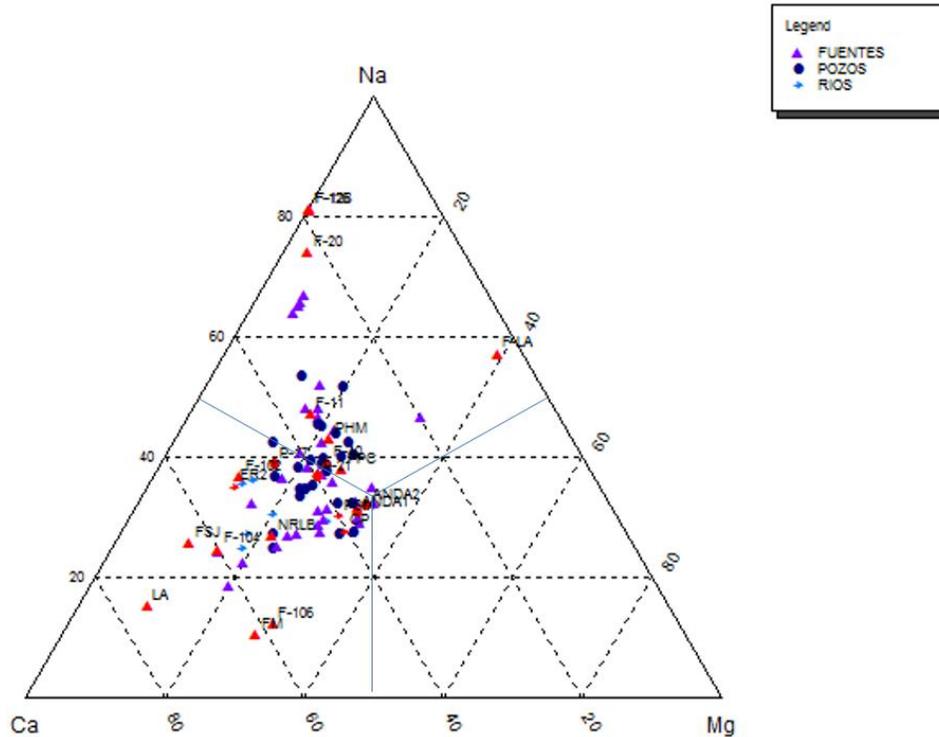


Figura 8: Diagrama de cationes predominantes

En el diagrama ternario de cationes se observa que en la mayoría de las aguas no existe un catión predominante, ya que están al centro del diagrama se encuentran en equilibrio.

3.5 Clasificación de las aguas según PH

Tabla 9: Clasificación de las aguas según su tipo, uso y PH

Muestra	Tipo y Uso	PH	Clasificación	Muestra	Tipo y Uso	PH	Clasificaci ón
F-102	Domestico	6.89	Neutra	F-129	Domestico	7.86	Básicos
F-129	Domestico	7.86	Básicos	F-14	Domestico	6.55	Ácidos

F-17	Domestico	8.4	Básicos	F-20	Domestico	7.72	Básicos
F-45	Domestico	8	Básicos	F-79	Domestico	8.83	Básicos
F-LA	Domestico	3.23	Ácidos	RL1	Domestico	7.69	Básicos
ER-2	Domestico	7.27	Básicos	RLC	Domestico	7.27	Básicos
ANDA1	Domestico	6.3	Ácidos	ANDA 2	Domestico	6.75	Ácidos
P-18	Domestico	7.48	Básicos	P-26	Domestico	8.36	Básicos

3.6 Evolución

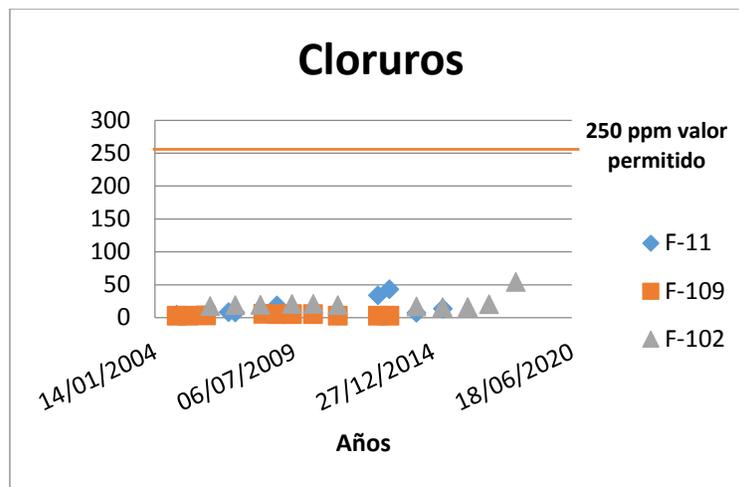


Figura 9: Contenido de cloruros de muestras en estudio. (2019). [Grafico]

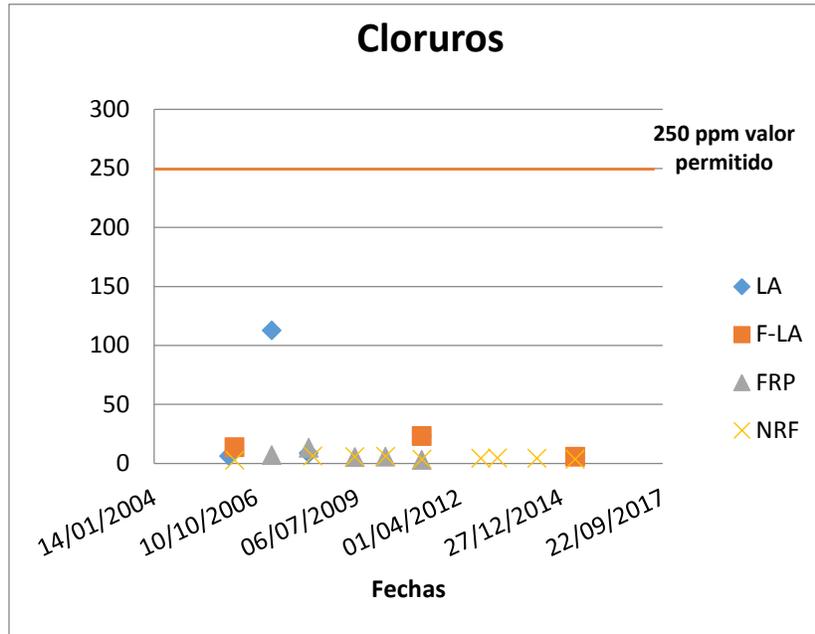


Figura 10: Contenido de cloruros de muestras en estudio. (2019). [Grafico]

Como se puede observar en los gráficos anteriores ninguna de las muestras ha sufrido un cambio mayoritario y sobrepasado el límite de la norma de cloruros de 250 ppm y algunas alzas en las muestras pueden estar ligadas a movimientos sísmicos y no han tenido cambios sustanciales debido a ascenso de aguas geotérmicas hacia las aguas superficiales debido a reinyección.

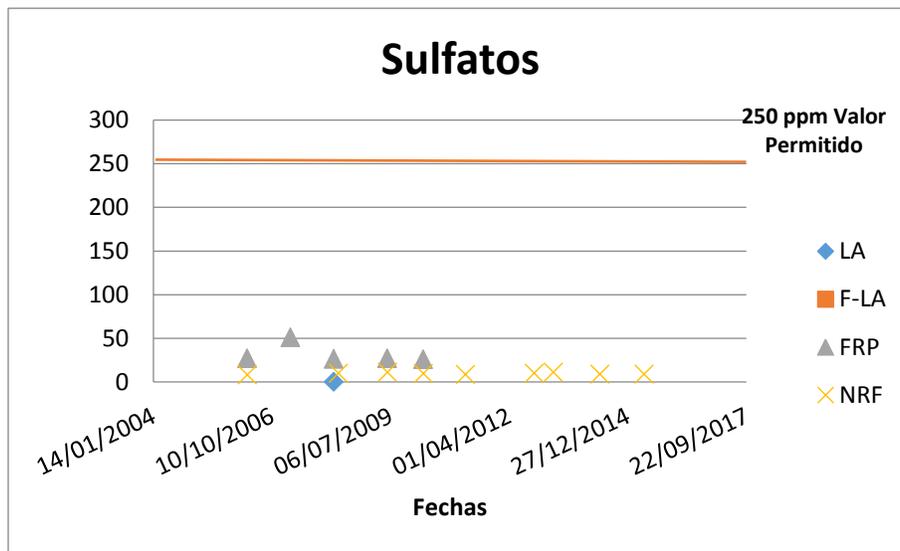


Figura 11: Contenido de sulfatos de muestras en estudio. (2019). [Grafico]

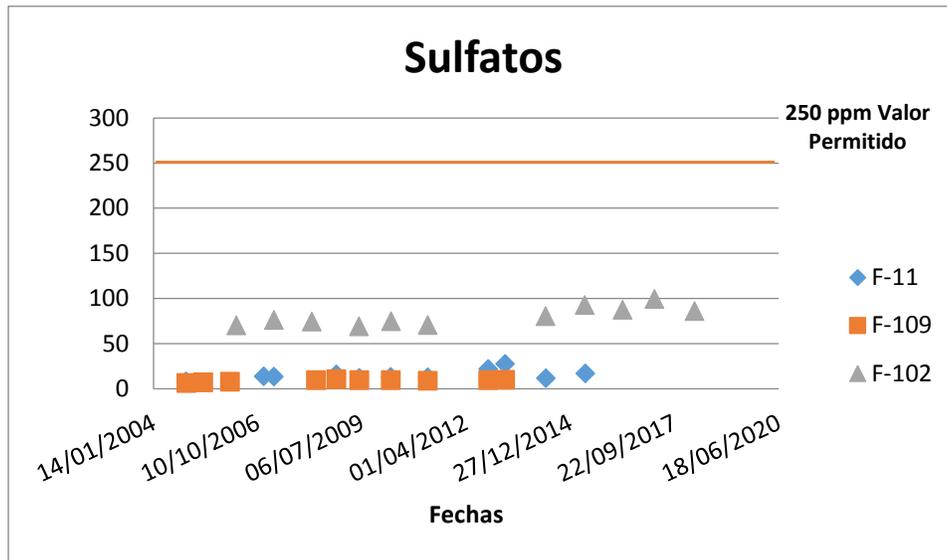


Figura 12: Contenido de sulfatos de muestras en estudio. (2019). [Grafico]

Al igual que los cloruros los valores de sulfatos están por debajo del valor máximo permitido por la norma salvadoreña para las aguas (250 ppm) y no se observa en los últimos años un incremento en esta especie, indicando que no muestran mayor ascenso de gases hacia las aguas superficiales. No se observa también un incremento sistemático de los sulfatos.

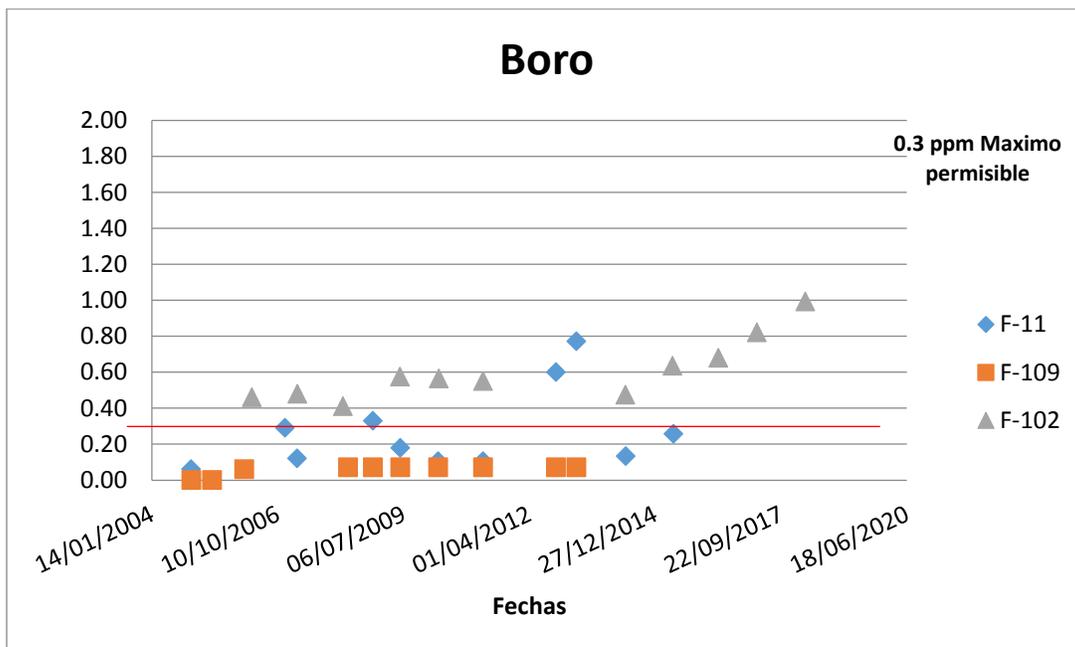


Figura 13: Contenido de Boro de muestras en estudio. (2019). [Grafico]

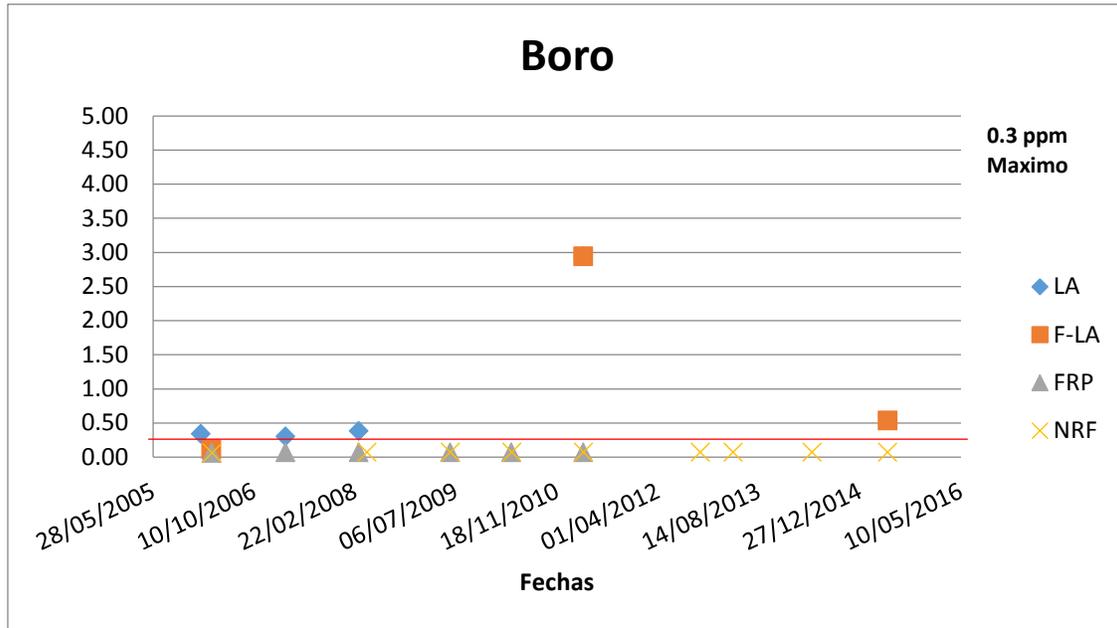


Figura 14: Contenido de Boro de muestras en estudio. (2019). [Grafico]

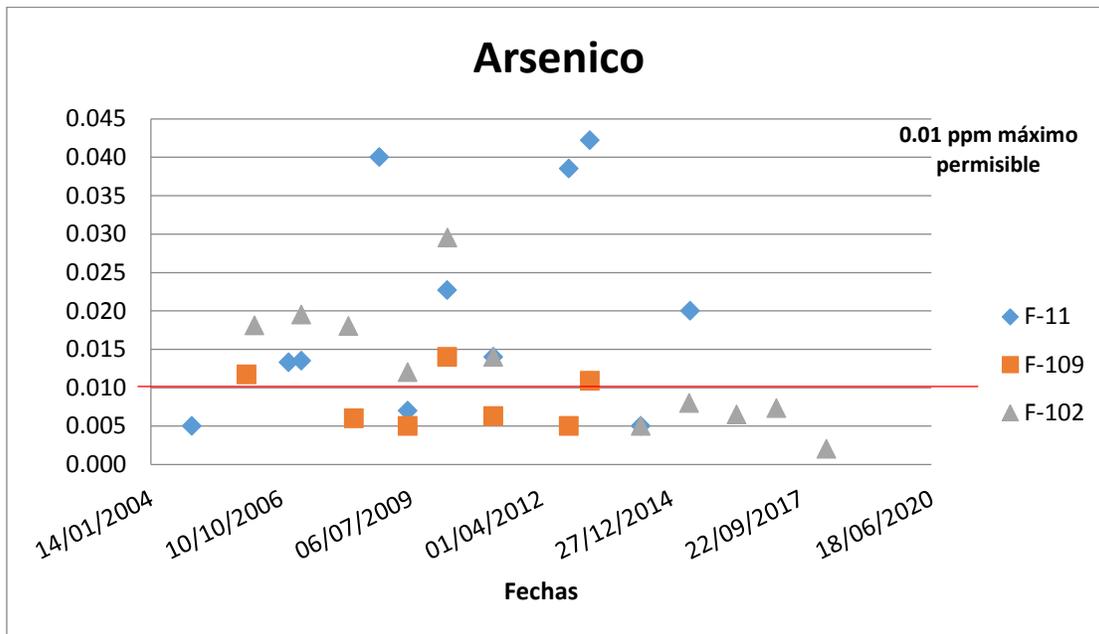


Figura 15: Contenido de Arsénico de muestras en estudio. (2019). [Grafico]

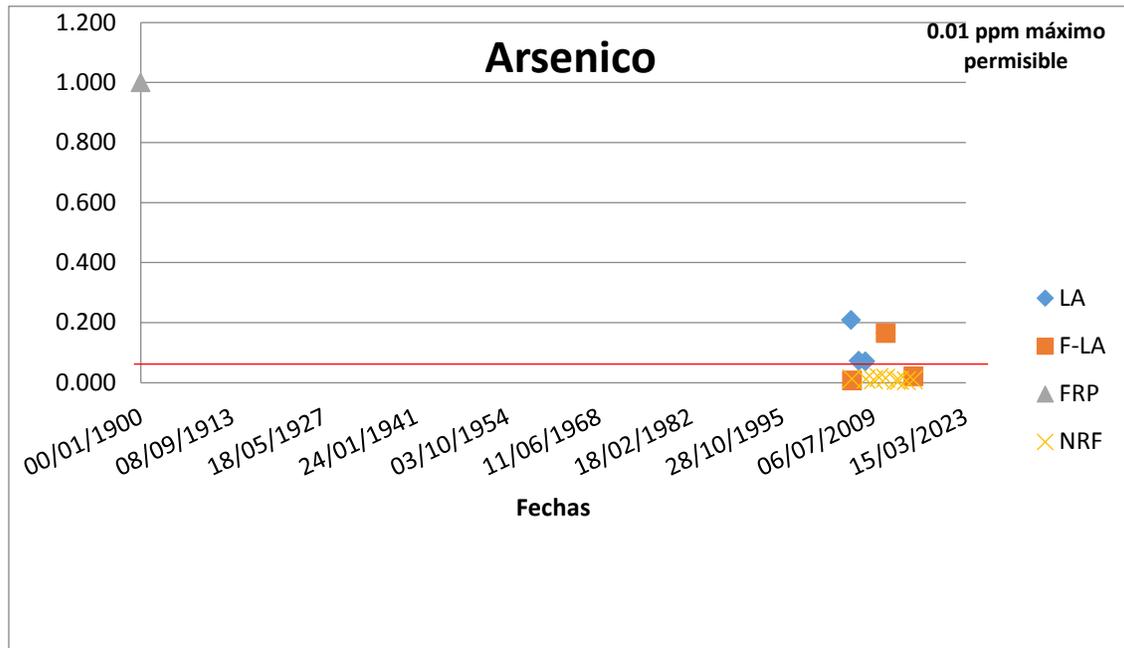


Figura 16: Contenido de Arsénico de muestras en estudio. (2019). [Grafico]

Especies como el boro (figura 12) y el arsénico (figura 14) son monitoreados debido a que se consideran dentro de la rama de metales pesados, que en cantidades no adecuadas pueden hacer daño al hombre, por tanto es necesaria su vigilancia.

La composición del boro presenta valores anómalos en aquellas aguas con mezcla de agua geotérmica en forma natural estas fuentes son F-102, LA, F-LA, F-11 (valores mayores de boro de 0.3 ppm). En la F-102 se observa un aumento desde el año 2014 al 2018. En años anteriores las fuentes F-11, F-LA, F-102, presentan variaciones, pero se han mantenido dentro del rango permisible según la norma salvadoreña. Esto indicaría que no se observa algún efecto de ascenso de aguas geotérmicas.

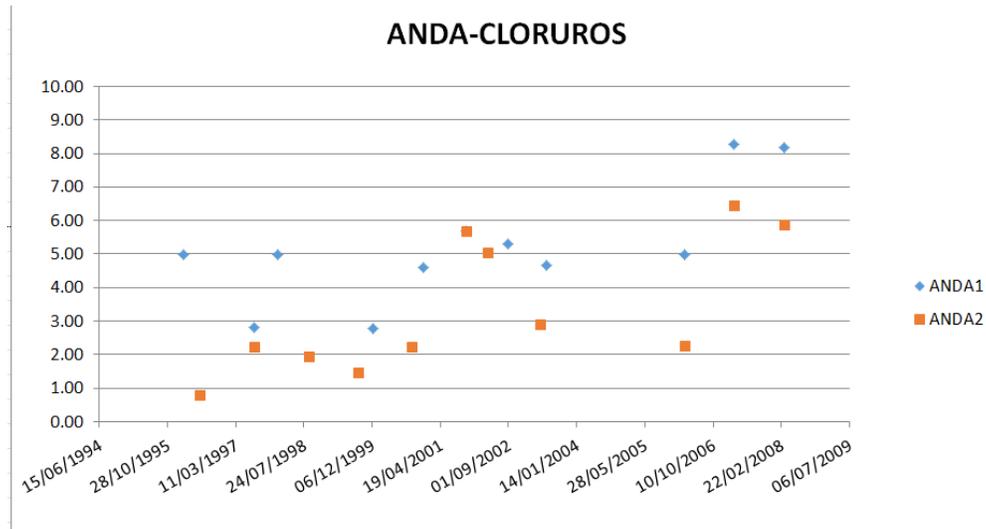


Figura 17: Evolución geoquímica de cloruros. (2019). [Grafico]

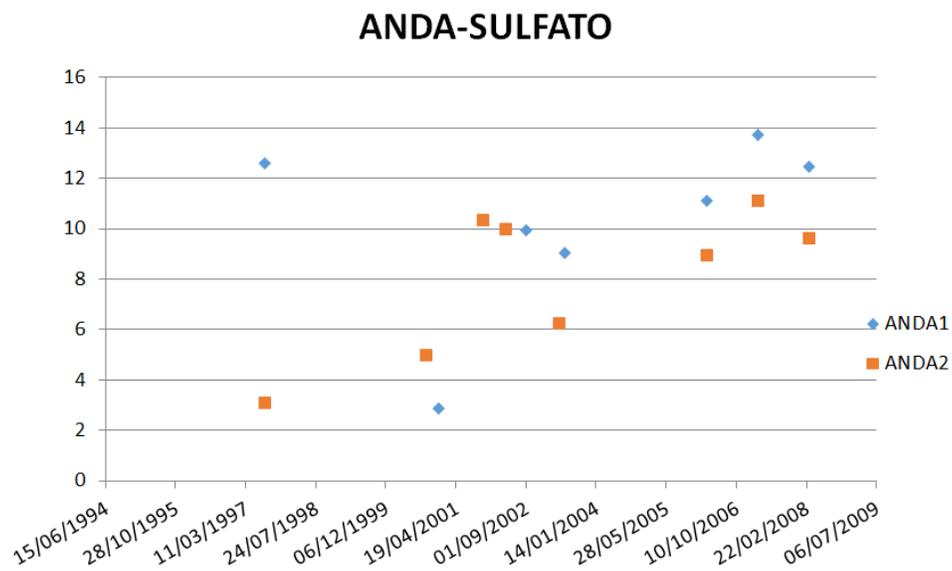


Figura 18: Evolución geoquímica de Sulfatos. (2019). [Grafico]

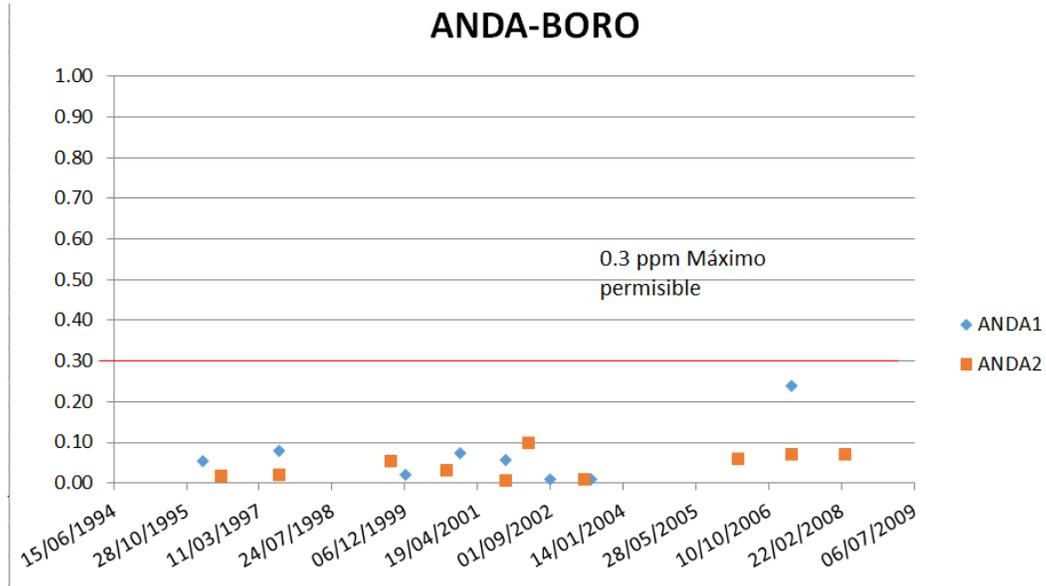


Figura 19: Evolución geoquímica de Boro. (2019). [Grafico]

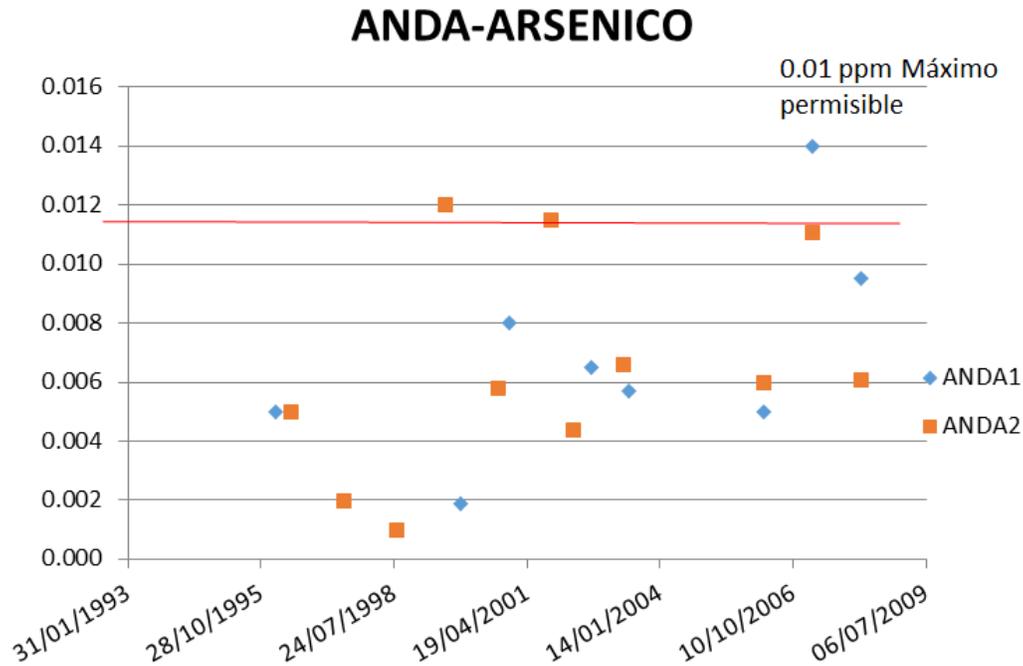


Figura 20: Evolución geoquímica de Arsénico. (2019). [Grafico]

Como se puede observar en el grafico del pozo de ANDA 1 y los datos tabulados hasta el año 2008 los valores de cloruros y sulfatos se han mantenido por debajo de la norma de 250 ppm, en cambio el boro al inicio ha tenido ligeros cambios pero en el último año muestreado ha disminuido, el arsénico presento un pico entre los años 2000 y 2001

probablemente a la actividad sísmica en esos años pero disminuyo para los años 2007 y 2008.

3.7 Diagramas de stiff de muestras más representativas

F-129, 09/04/1997

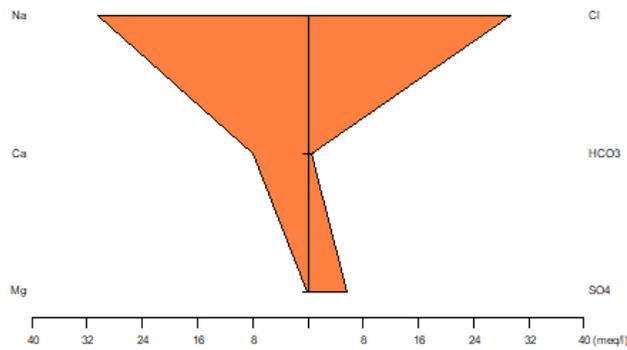


Figura 21: Diagrama de Stiff para muestra F-129

F-103, 17/01/2006

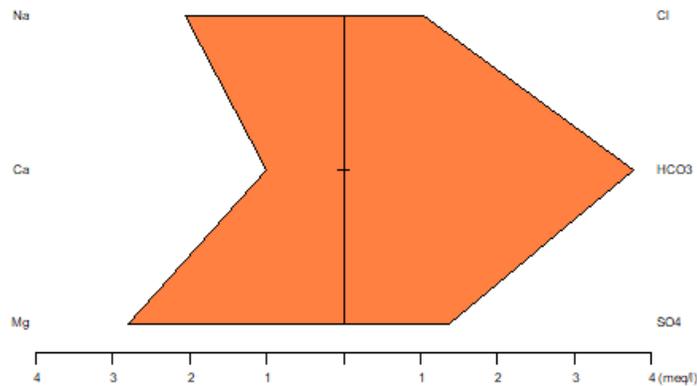


Figura 22: Diagrama de Stiff para muestra F-103

F-45, 13/04/1989

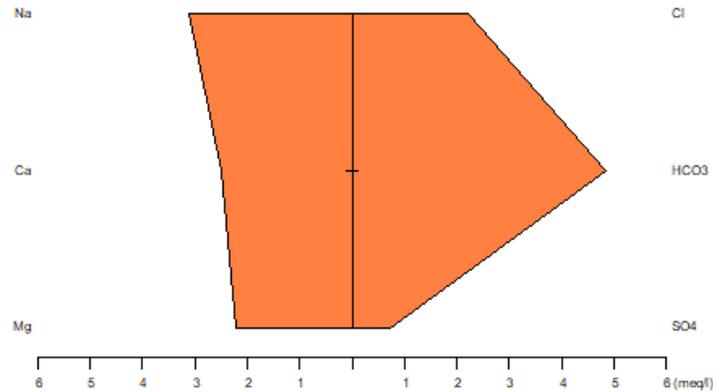


Figura 23: Diagrama de Stiff para muestra F-45

La muestra F-129 es claramente del tipo Clorurada-Sódica. Lo indica que hay presencia de Salmuera de fluidos característicos geotérmicos. Mientras que las muestras F-103 Y F-45 tienden a ser mayoritariamente del tipo bicarbonatadas característico de aguas naturales

ER2, 01/02/2007

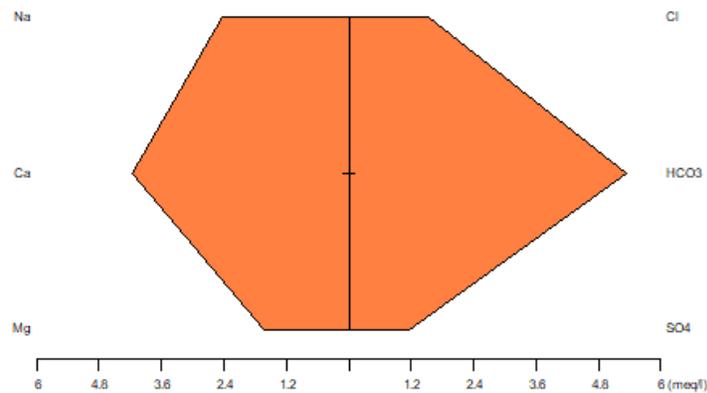


Figura 24: Diagrama de Stiff para muestra ER2

DRSS

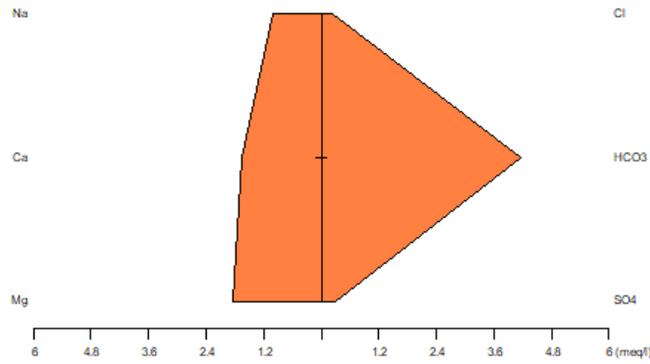


Figura 25: Diagrama de Stiff para muestra DRSS

Las muestras ER2 Y DRSS tienden a ser mayoritariamente del tipo bicarbonatadas característico de aguas naturales superficiales.

P-22, 26/04/1989

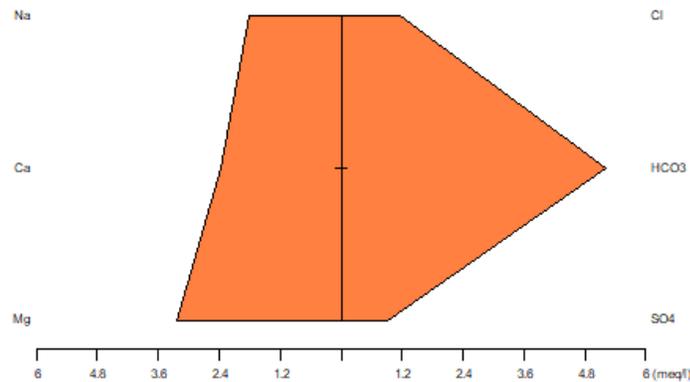


Figura 26: Diagrama de Stiff para muestra P-22

ANDA1, 23/07/1997

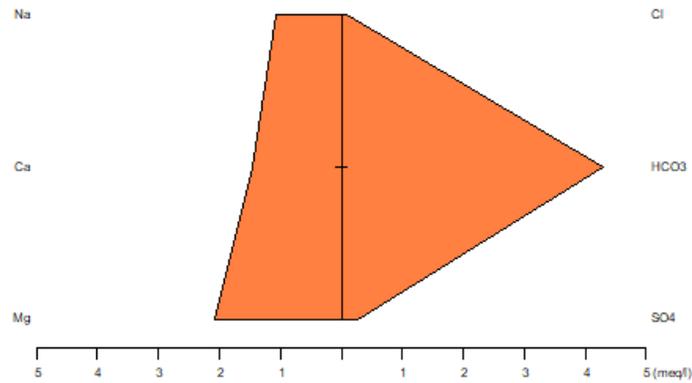


Figura 27: Diagrama de Stiff para muestra ANDA1

Las muestras P-22 Y ANDA1 son mayoritariamente del tipo bicarbonatadas características de aguas naturales que para este caso son pozos de abastecimiento para la población.

3.8 Geotermómetro

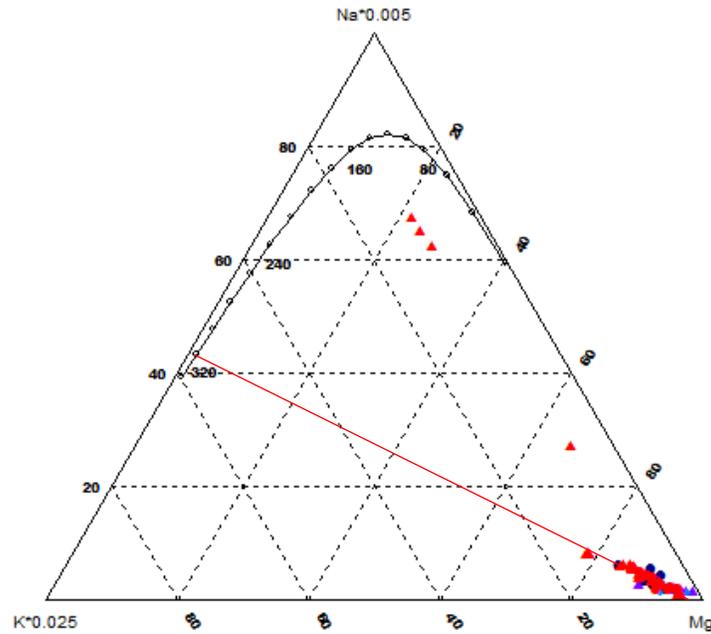


Figura 28: Geotermómetro de Giggenbach

Para el cálculo de geotermómetros se toman en cuenta todas las muestras correspondientes a los años 1989 y 1997. En la figura anterior se muestra el geotermómetro de Giggenbach para las muestras más representativas.

Se observa que la tendencia de las muestras es una temperatura de aproximadamente 280-320°C, lo cual se considera un recurso de alta temperatura es apropiado para explotación geotérmica.

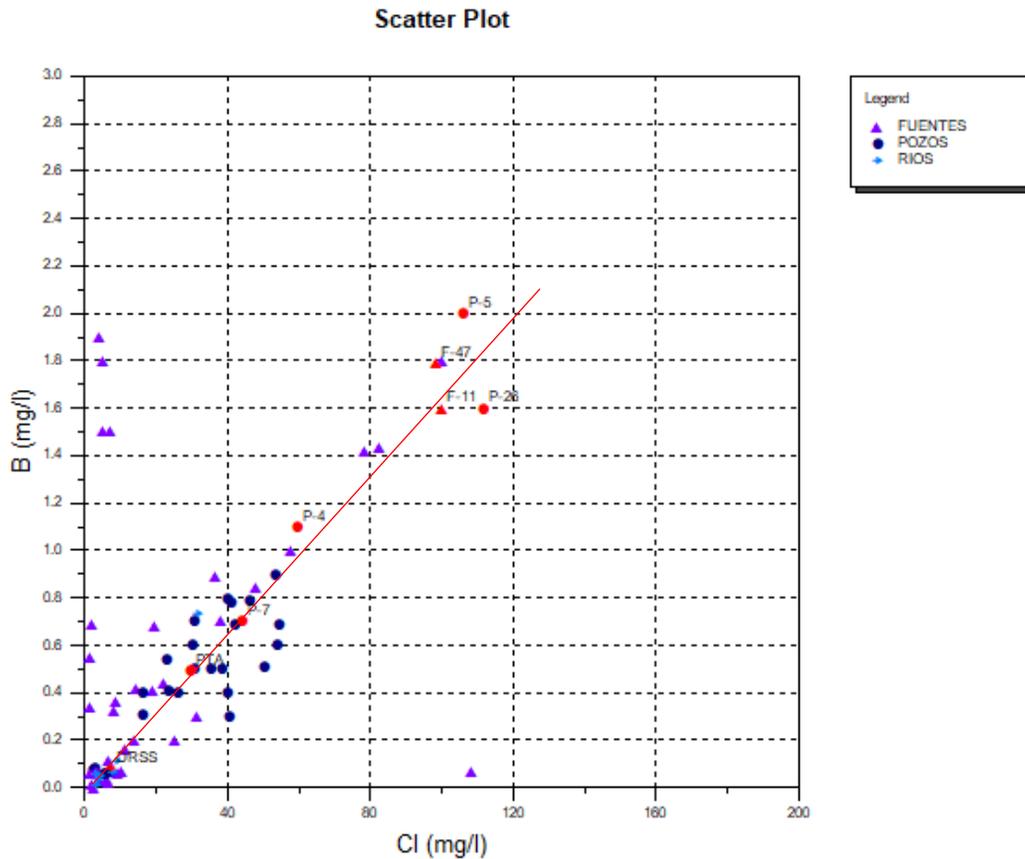


Figura 29: Diagrama Boro-Cloro

El diagrama anterior nos da un alineamiento del comportamiento del Boro-Cloro estos componentes son un indicativo de mezclas, y se considera afectada naturalmente por agua geotérmica, debido a ascenso de estas hacia las aguas superficiales.

4 PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS.

En la siguiente tabla se presentan las muestras más representativas analizadas y clasificadas de acuerdo a su ion dominante y pH.

Tabla 10: Clasificación de las aguas respecto a iones predominantes y según su pH

Muestra	Ion Predominante	Según pH
F-LA	Sulfatada magnésica	Básicos
F-102	Bicarbonatada cálcica	Ácidos
F-103	Bicarbonatadas magnésicas	Básica
F-45	Bicarbonatada	Débilmente básica
F-129	Bicarbonatadas magnésicas	Débilmente básica
ANDA1	Bicarbonatadas magnésicas	Ácidos
P-22	Bicarbonatadas magnésicas	Débilmente básica
P-PA	Bicarbonatada	Débilmente básica
P-FR	Bicarbonatadas magnésicas	Neutra
ER2	Bicarbonatada cálcica	Débilmente básica
CP	Bicarbonatadas magnésicas	Débilmente básica
PSM	Bicarbonatadas magnésicas	Débilmente básica
DRSS	Bicarbonatadas magnésicas	Básicas

La siguiente tabla muestra las muestras que cumplen o no con normativa salvadoreña y OMS para la calidad de agua potable.

Tabla 11: Análisis de muestras respecto a normativa de calidad de agua y parámetros químicos

	F-LA	F-45	ANDA1	P-22	ER2	DRSS
Temperatura	X	X	X	X	X	X
Calcio	X	X	X	X	X	X
Magnesio	X	X	X	X	X	X
sulfatos	X	X	X	X	X	X
Boro			X	X		X
Arsénico						

Como se puede observar se ha colocado una X donde el valor si cumple la normativa mientras que donde no aparecen marcadas representan las aguas que deben ser monitoreadas F-45 Y ER2 presenta altos valores de boro un metal pesado contaminante para los seres humanos

CONCLUSIONES

- De acuerdo con los diagramas Piper y Ternario un 80% de las muestras analizadas son bicarbonatadas y un 20% aguas cloruradas y sulfatadas. Las aguas Bicarbonatadas con tendencia a sulfatos se observa que están siendo calentadas por vapor geotérmico, en el caso de las aguas bicarbonatadas con tendencia a cloruros se puede concluir que son aguas que tienen interacción con agua geotérmica en forma natural.
- Acerca de los resultados de calidad del agua la presencia de Boro y Arsénico se deben monitorear con mayor continuidad ya que son altamente contaminantes. También la evaluación del contaminante Boro y cloro estudiados indica que las aguas superficiales del área de estudio contienen una alineación lo cual indicaría una presencia de alteración geotérmica.
- Las muestras analizadas para ANDA 1, ANDA 2 son pozos que de acuerdo a los análisis químicos cumplen con los valores máximos permisibles según la norma salvadoreña para el agua potable, por lo tanto se determinan que son aptas para el consumo humano.

- Las muestras analizadas en ER2, F-45 sobrepasan los 0.3 ppm que es el porcentaje máximo permisible según la norma salvadoreña, por lo tanto no son aptas para el consumo humano.
- En los gráficos de evolución en el tiempo se observa incrementos sistemáticos en las especies químicas lo cual indica que existe presencia de agua geotérmica.
- Dada las concentraciones de Cloro y Boro, se considera que se deben a fugas por micro fracturas y no por contacto directo con agua geotérmica

RECOMENDACIONES.

- Actualizar la base de datos de las fuentes, pozos y ríos monitoreados. Debido a que algunos de estos en la actualidad ya no se les da seguimiento y por tanto se desconoce las cantidades actuales de consumo de agua de la población en la zona.
- Validar los estudios hidrológicos que existan de la zona, así como realizar nuevos estudios hidrológicos.
- Evaluar la cantidad, calidad de las aguas y efluentes. Posteriormente hacerse público un proceso de seguimiento de la calidad de las aguas.
- Establecer objetivos y metas de política para alcanzar y mantener los estándares de calidad del agua establecidos de esa manera cumplir con los requisitos de calidad del agua para sus distintos usos y con la normativa de medio ambiente.

AGRADECIMIENTOS.

- A las instituciones: Universidad de las Naciones Unidas, Universidad de El Salvador y LaGeo por brindar la oportunidad de ser participe en el Diplomado de Geotermia para América Latina.
- A cada uno de los profesionales que compartieron sus conocimientos y experiencias técnicas y académicas, en especial a nuestros asesores; Ing Antonio Matus e Ing Luis Franco. Un agradecimiento especial al Ing Noel López por su valioso aporte en el desarrollo del diplomado.
- Al departamento de geoquímica por su valioso apoyo a lo largo del Diplomado.

REFERENCIAS

aguaysig. (s.f.). *aguaysig*. Obtenido de <https://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>

Aráuz, J. V. (2016). *Evaluación Geoquímica y Ambiental de una Zona de Interés Geotérmico (sin explotar) en el Nor-Occidente de Nicaragua*.

emaze. (s.f.). *emaze*. Obtenido de <https://app.emaze.com/@AOIORLRRTC#3>

LaGeo. (2008). *Sostenibilidad de los mantos acuíferos en el area rural y metropolitana de El Salvador*. Cuenca del Río San Simón, Berlín.

Ramírez Martín, C. E. (2009). *Sistema para la Identificación de Aguas en Pozos Petroleros (SIAPP)*. Ciudad de La Habana Universidad de las Ciencias Informáticas.

APÉNDICES.

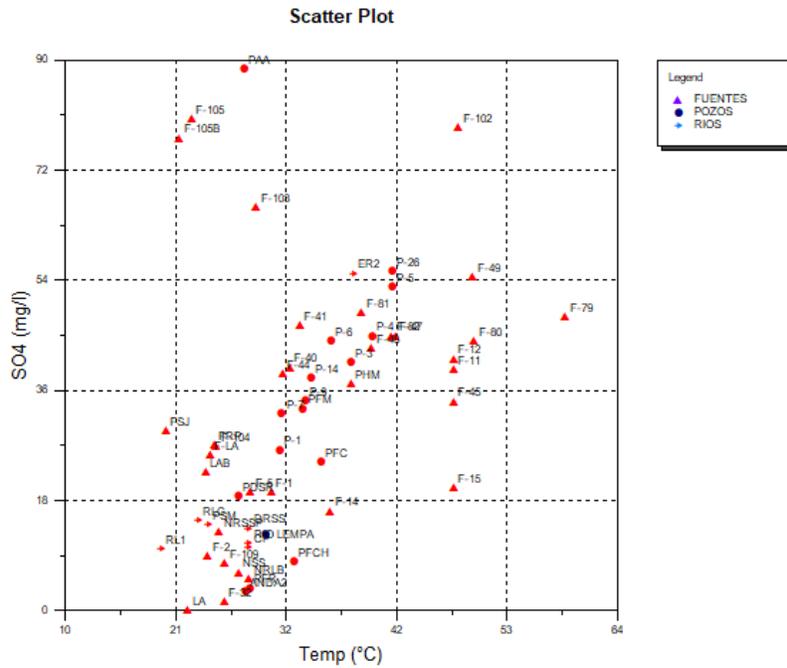


Figura 30: Comportamiento de las muestras sulfatadas versus temperatura

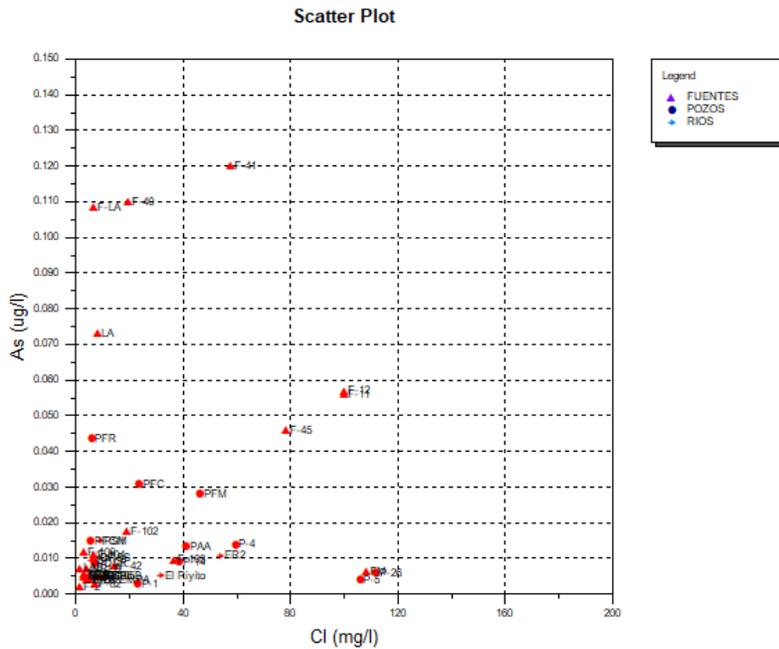


Figura 31: Comportamiento químico aguas cloradas versus el Arsénico

Scatter Plot

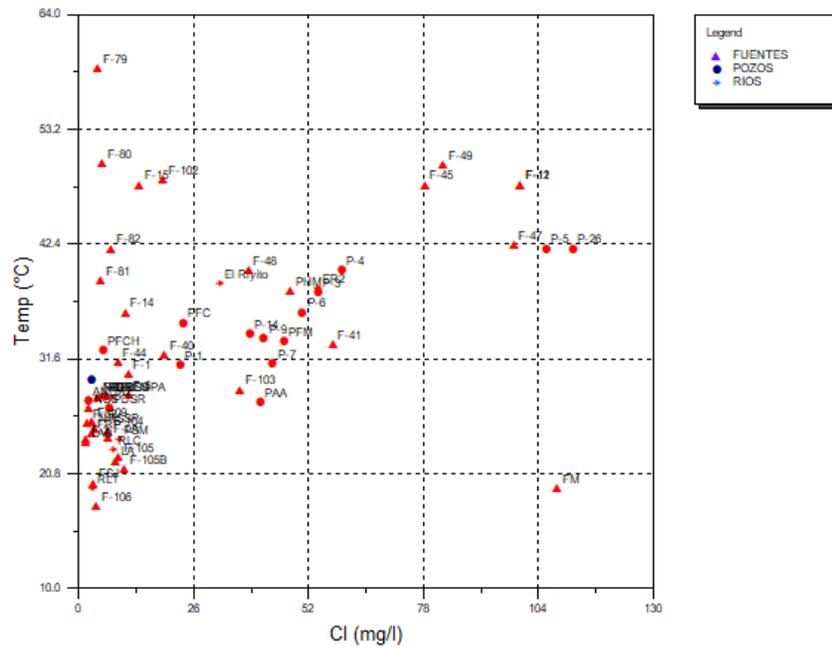


Figura 32: Comportamiento químico de los cloruros versus la temperatura