

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

DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMÉRICA LATINA
EDICION 2018



TEMA: Geoquímica preliminar de dos zonas de interés geotérmico en Nicaragua.

PRESENTAN:

Carlos Fernando Blanco Cruz – Ing. Químico

Fanor Ernesto Narváez Juárez - Lic. Químico

ASESOR: Ing. Antonio Matus

CIUDAD UNIVERSITARIA, DICIEMBRE 2018

INDICE

1. Resumen	4
2. Introducción	5
3. Planteamiento del problema	6
4. Justificación del estudio.....	6
5. Objetivos.....	6
5.1 Objetivo General	6
5.2 Objetivos Específicos	6
6. Marco Teórico	7
6.1 Clasificación de las aguas.	7
6.2 Diagramas de Clasificación de las aguas	9
6.3 Geotermómetros	12
7. Metodología.....	13
7.1 Recopilación de Información.....	13
7.2 Evaluación de la calidad de los resultados	13
7.3 Clasificación de las Aguas	14
7.4 Cálculos de geotermómetros.....	14
7.5 Determinación del modelo conceptual geoquímico.	14
8. Análisis de datos	15
8.1 Geología Regional.....	15
8.2 Geología de la zona 1 de estudio.	17
8.3 Composición química de las aguas de zona 1 de estudio.	20
8.4 Clasificación de aguas de zona 1 de estudio.....	21
8.5 Cálculos de geotermómetros de zona 1 de estudio.....	26
8.6 Modelo conceptual geoquímico preliminar zona 1 de estudio.	29
8.7 Geología de la zona 2 de estudio.	31
8.8 Composición química de las aguas de zona 2 de estudio.	35
8.9 Clasificación de aguas de zona 2 de estudio.....	36
8.10 Cálculos de geotermómetros de zona 2 de estudio.	42
8.11 Modelo conceptual geoquímico preliminar zona 2 de estudio.	44
9. Presentación de resultados.....	45
10. Conclusiones y recomendaciones.....	46

11. Agradecimientos	47
12. Referencias bibliográficas.	47

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1: Esquema del diagrama de Piper	10
Figura 2: Tipos de agua segun stiff	11
Figura 3: Esquema tectónico de la región centroamericana y del caribe.....	15
Figura 4: Provincias fisiográficas de Nicaragua	16
Figura 5: Mapa geológico de zona 1 de estudio.....	19
Figura 6: Diagrama de Piper Hill Langelier para zona 1 de estudio.....	21
Figura 7: Diagrama CL-SO ₄ -HCO ₃ para zona 1 de estudio.....	22
Figura 8: Diagrama de stiff zona 1 de estudio	23
Figura 9: Diagrama Langelier Cl +SO ₄ vs HCO ₃ zona 1 de estudio	24
Figura 10: Diagrama sodio vs potasio zona 1 de estudio	25
Figura 11: Diagrama Cloro vs Boro zona 1 de estudio.....	26
Figura 12: Diagrama de Giggenbach Na-K-Mg zona 1 de estudio.....	27
Figura 13: Modelo conceptual perfil (SE-NW) zona 1 de estudio.....	29
Figura 14: Modelo conceptual geoquímico (vista planta) zona 1 de estudio	30
Figura 15: Mapa Geológico zona 2 de estudio	31
Figura 16: Mapa de las muestras zona 2 de estudio.....	36
Figura 17: Diagrama Piper Hill Langelier zona 2 de estudio.	37
Figura 18: Diagrama CL-SO ₄ -HCO ₃ zona 2 de estudio.....	38
Figura 19: Diagrama K-Na zona 2 de estudio.	38
Figura 20: Diagrama Cl-B zona 2 de estudio.....	39
Figura 21: Diagrama Ca-Cl zona 2 de estudio	39
Figura 22: Diagrama K-Cl zona 2 de estudio.....	40
Figura 23: Diagrama Giggenbach Na-K-Mg zona 2 de estudio.....	42
Figura 24: Modelo conceptual geoquímico preliminar zona 2 de estudio	44

LISTADO DE TABLAS.

Tabla 1: Geotermómetros químicos de sílice.....	12
Tabla 2: Geotermómetros químicos de cationes.....	13
Tabla 3: Datos de los análisis químicos a muestras de la zona 1 de estudio.	20
Tabla 4: Geotermómetros de sílice de zona 1 de estudio	28
Tabla 5: Geotermómetros de cationes de zona 1 de estudio.....	28
Tabla 6: Resumen de Análisis petrográfico de rocas	33
Tabla 7: Análisis químico de los productos del volcán	34
Tabla 8: Análisis químico de las muestras de agua.....	35
Tabla 9: Geotermómetros de Sílice Zona 2 de estudio.....	43
Tabla 10: Geotermómetros de Cationes zona 2 de estudio.	43

1. Resumen

Dos áreas de estudio de interés geotérmico se han realizado:

Zona 1:

El área de estudio de la zona 1 de estudio se encuentra en la parte central de Nicaragua. La roca madre es de edad terciaria que consiste en ignimbritas, rocas piroclásticas y basáltica-andesita. Se encuentran en los alrededores los restos de dos grandes volcanes centrales perteneciente a la edad terciaria, Santa Lucía, en el Norte y Las Lajas en el sur.

En la zona 1 de estudio se encuentran dos grupos principales de fallas, las fallas regionales con dirección NO-SE y las NE-SO. La dirección de las fallas regionales es similar a la orientación de la roca madre. La actividad geotérmica en el área de estudio es baja y está relacionada al intenso fallamiento en la zona.

Usando el diagrama de Piper se pudo observar la clasificación de los tipos de agua de las muestras en el área de estudio de la zona 1. Se encontraron grupos de aguas en mayoría bicarbonatadas, sulfatos sódicas y cloruradas cálcicas.

Se realizaron estimaciones de temperaturas por medio del diagrama de Giggenbach y geotermómetros de sílice en donde las temperaturas anduvieron en el rango de 120-140°C lo que nos dice que es un sistema de baja-media entalpia para la zona.

Zona 2:

La zona 2 de estudio está situada en la parte nor-oeste de Nicaragua. Las rocas más antiguas pertenecen a la fase entre el terciario superior y el cuaternario superior, que consisten en andesita y andesita basáltica.

Se hizo clasificación de las aguas usando los diagramas de Piper Hill así como diagramas de Stiff para la zona 2 de estudio encontrándose aguas en mayorías cloruradas y también sulfatadas y bicarbonatadas.

Se hizo la estimación de temperatura usando los geotermómetros de sílice, catiónicos y diagrama de Giggenbach, lográndose determinar rango de temperatura de 150°C-250°C según los geotermómetros catiónicos, el de Giggenbach 180-230°C. Para ambas zonas se presenta propuesta de modelo geoquímico preliminar.

2. Introducción

La energía geotérmica es una energía renovable que se obtiene mediante el aprovechamiento del calor natural del interior de la tierra que se transmite a través de los cuerpos de roca caliente o reservorios por conducción y convección, donde se suscitan procesos de interacción de fluidos y rocas, dando origen a los sistemas geotérmicos. Esta energía puede ser utilizada para la generación de energía eléctrica y para usos directos.

Actualmente en Nicaragua están operando dos plantas geotermoeléctricas, Momotombo con una capacidad instalada de 77.5 MW y San Jacinto Tizate con 77 MW. Con una generación efectiva de 84 MW. Siendo la energía generada 317.6 GW/h. lo cual representa un 19% de la generación total del país.

A través de la geoquímica se puede proporcionar información que nos sea útil en la etapa de exploración de un proyecto, por medio del quimismo de las aguas. Se puede conocer sobre la clasificación de las aguas utilizando diversos tipos de diagramas como lo son los diagramas ternarios. La estimación de temperatura se puede realizar también aplicando lo que es geotermometría con los geotermómetros químicos para las aguas en este caso. Por lo tanto, se empleará los geotermómetros de sílice y cationes.

El trabajo presentado a continuación se refiere al tema de la geoquímica, refiriéndose de manera particular al estudio de dos zonas de interés geotérmico en Nicaragua. El potencial geotérmico del cual está dotado el país es importante ya que está íntimamente ligado a la presencia en su territorio de la cordillera volcánica activa que se extiende a lo largo de la costa del pacífico.

Las áreas de estudios se encuentran una en la zona central del país la cual denominaremos zona 1 de estudio y la otra en la zona noroeste del país denominada zona 2 de estudio. Se hará uso de información concerniente a análisis químicos de muestras de aguas realizados.

3. Planteamiento del problema

Las áreas con posible potencial geotérmico deben ser estudiadas con el propósito de conocer la naturaleza de los sistemas geotérmicos. Por lo tanto, se realizará la caracterización geoquímica de las aguas de dos zonas de interés geotérmico en Nicaragua para poder determinar los tipos de aguas y estimar temperaturas.

4. Justificación del estudio

El presente trabajo busca enfocarse en conocer la geoquímica preliminar de dos zonas de interés geotérmico con el fin de poder contribuir con información al campo de la geotermia. Y de esta manera mediante las investigaciones geocientíficas en el área aportar al desarrollo de esta fuente de energía y contribuir con el cambio de la matriz energética en el país.

5. Objetivos.

5.1 Objetivo General

Elaboración del modelo conceptual geoquímico preliminar de dos zonas de interés geotérmico en Nicaragua.

5.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar geoquímicamente las aguas de dos zonas de interés geotérmico en Nicaragua.
- Clasificar las aguas mediante diagramas triangulares y otros.
- Estimar temperaturas con geotermómetros de agua.
- Establecer relaciones binarias entre los parámetros químicos de los fluidos geotérmicos.

6. Marco Teórico

6.1 Clasificación de las aguas.

- 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 geyser y son comunes para muchas áreas geotérmicas en desarrollo tanto en rocas volcánicas y sedimentarias.

Aunque en cantidades diversas, el sodio está generalmente presente en las aguas subterráneas, relacionado con diferentes procesos:

- El origen primario del sodio en la mayor parte de las aguas subterráneas, está relacionado con productos solubles derivados de la alteración de feldespatos de tipo plagioclasas.
- En áreas con depósitos de evaporitas las soluciones de halita son muy importantes, lo mismo sucede en los relacionados con minerales arcillosos con marcados procesos de intercambio en sodio.

En relación con los procesos hidrotermales, el sodio es generalmente el catión dominante en las aguas geotérmicas de alta temperatura. Una variación sistemática entre la proporción Na/K con relación a la temperatura, sucede en todos los sistemas geotérmicos, excepto en los predominantemente ácidos, y en muchas áreas con una gran variedad de tipos de rocas, ha sido posible realizar una correlación precisa entre dicho porcentaje Na/K y la temperatura del agua (White, 1965; Ellis y Mahon, 1967; Ellis, 1970a; y Fournier y Truesdell, 1973).

- 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.

- Aguas Bicarbonatadas Sódicas

Aguas ricas en bicarbonatos son originadas ya sea por la disolución de CO_2 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 H_2S , la acidez de estas soluciones es debida a la disociación de H_2CO_3 . A pesar de ser un ácido débil convierte los feldespaltos y arcillas, generando soluciones acuosas neutrales, las cuales son ricas típicamente en sodio y bicarbonato, particularmente a temperatura media-alta. De hecho:

- 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 sedimentarias (por ejemplo Kizildere, Turquía).

El anhídrido carbónico se disuelve en el agua en función de su presión parcial (PCO_2). Una parte permanece en disolución en forma de gas mientras otra reacciona con el agua para dar ácido carbónico, que a su vez se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato. En aguas con $\text{pH} > 8.3$ (la mayoría de las aguas subterráneas naturales), la especie carbonatada dominante es el ion bicarbonato, con una concentración que suele variar entre 50 y 400 ppm, aunque puede llegar a alcanzar valores de 800 ppm. El sistema carbonato-bicarbonato está sujeto a procesos de disolución-precipitación, por lo que es conveniente analizar el agua "in situ". Las concentraciones mayores de bicarbonato son características de fluidos de origen superficial. Las variaciones mostradas en el tiempo para los fluidos de fuentes y pozos domésticos, no son significativas como para indicar algún tipo de proceso que afecte la composición química de los fluidos.

- Aguas ácidas sulfatadas-cloruradas

Estas aguas pueden formarse por muchos procesos, tales como:

a) Mezcla de aguas cloruradas y sulfatadas a diferentes profundidades. b) Condensación cerca de la superficie de gases volcánicos en aguas meteóricas. c) Condensación de vapor magmático en las profundidades. d) 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. Es seguidamente dicho que estos fluidos son una mezcla que contiene el fluido profundo clorurado, por lo tanto, la geo termometría puede ser aplicada con confianza. Esto es un error argumental debido a que la composición del agua mezclada probablemente contiene sílice, sodio, potasio y otros cationes contribuido por el componente ácido, y esto distorsionara los resultados de los geotermómetros de soluto. Cualquier aplicación de geotermómetros a fluidos mezclados debe ser interpretado con precaución.

El ion sulfato procede del lavado de materiales sedimentarios salinos, de la oxidación de sulfuros, de la descomposición de sustancias orgánicas, etc. La disolución de yeso (y anhidrita) representa la mayor cantidad aportada de este ion a las aguas subterráneas. Su comportamiento está condicionado por su tendencia a formar iones complejos con Na y Ca y a incorporarse a procesos biológicos. El ion sulfato está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica. En ambientes reductores (pH<7) la forma reducida estable es H₂S, mientras que en soluciones alcalinas predomina HS⁻.

- Aguas diluidas por cloruro (bicarbonatadas)

Estas aguas son formadas por la dilución del fluido clorurado por aguas subterráneas o aguas bicarbonatadas durante flujo lateral. Estas aguas están probablemente restringidas a márgenes de zonas de ascenso de flujos y estructuras de descargas de sistemas de altas temperaturas. Pueden ser aguas cercanas a neutras, típicamente, pH de 6-8 con el cloruro como el anión mayor y el bicarbonato presente, pero en concentraciones variables.

6.2 Diagramas de Clasificación de las aguas

La clasificación de las aguas es esencial para una correcta utilización de las técnicas geoquímicas, existen diferentes tipos de diagramas empleados en la clasificación, a continuación, se detalla algunos de ellos:

- Diagrama de Piper

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 (Custodio 1965).

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. En la siguiente figura se muestra el esquema del diagrama Piper.

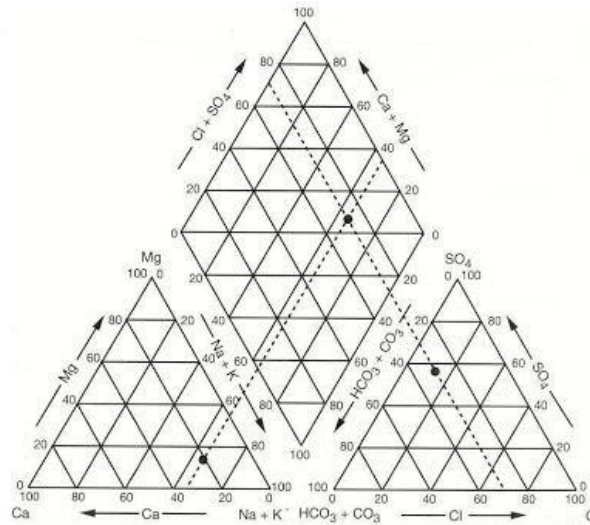


Figura 1: Esquema del diagrama de Piper

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

Este diagrama está compuesto 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.

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

figura siguiente se muestran algunas apreciaciones de este diagrama que caracterizan varios tipos de aguas.

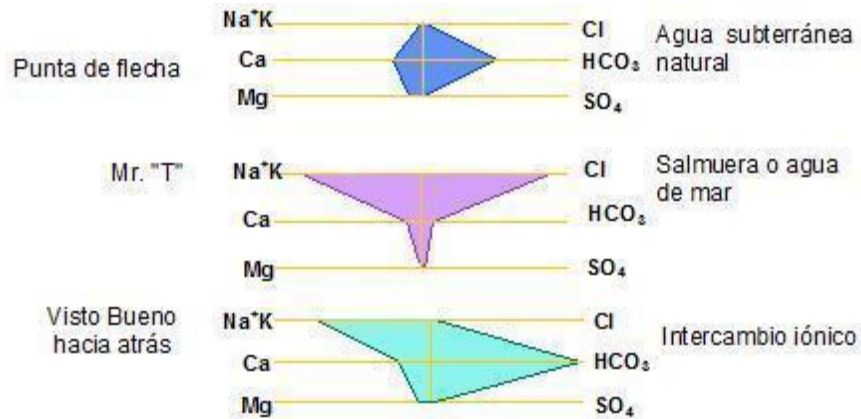


Figura 2: Tipos de agua segun stiff

- Diagrama Cl-SO₄-HCO₃

La interpretación química del agua geotérmica es mejor llevado a cabo en la base de una clasificación inicial en términos de sus aniones mayoritarios Cl, SO₄ y HCO₃. La posición del punto de dato en el diagrama triangular es obtenida evaluando primero con la suma S de las concentraciones C_i (en mg / kg) de los tres componentes implicados:

$$S = CCl + CSO_4 + CHCO_3$$

A partir de la suma (S), se obtienen los porcentajes de Cl y HCO₃, entonces D = % HCO₃ + 0.5 % Cl es calculado. El % Cl y D se representan como ejes Y y X, respectivamente. 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. El Diagrama Cl-SO₄-HCO₃ puede ser utilizado para clasificar aguas geotérmicas especialmente y para eliminar aguas no adecuadas para técnicas geoquímicas.

- Diagramas Binarios

Representan la variación de cualquier parámetro con el tiempo en un punto determinado. Permiten visualizar la variación de varios parámetros con respecto a otro. Por ejemplo, el Ca, Na, K, Mg, HCO₃ B, SO₄ comparados con el Cl. Estos gráficos en conjunto permiten visualizar los efectos de interacción agua roca, mezcla de diferentes tipos de agua (agua dulce - agua de mar).

6.3 Geotermómetros

Los Geotermómetros o termómetros geoquímicos se utilizan para estimar la temperatura del subsuelo de los yacimientos geotérmicos. Hay principalmente tres categorías: geotermómetros soluto, de gas y de isótopos. Los Geotermómetros de soluto pueden ser ampliamente clasificados en dos grupos: (1) los que se basan en variaciones dependientes de temperaturas y en la solubilidad de los minerales individuales, y (2) los que se basan en reacciones de intercambio iónico dependientes de la temperatura que fijan proporciones de ciertos constituyentes disueltos (Fournier, 1991).

- **Geotermómetros de sílice.**

Están basados en temperaturas dependientes de las variaciones de solubilidad de las especies de sílice. El contenido de sílice de un agua de un manantial caliente o un pozo puede ser correlacionado con la última temperatura de equilibrio. La solubilidad de la sílice es función de la presión, temperatura y salinidad. Sin embargo, a temperaturas por debajo de 300 °C, variaciones en las presiones a condiciones hidrostáticas tiene poco efecto en la solubilidad del cuarzo y sílice amorfa (Fournier and Potter, 1982; Fournier and Rowe, 1966).

El geotermómetro de cuarzo trabaja mejor para aguas en el rango de temperatura superficial de 120-150 °C (Arnórsson et al., 1983a; Arnórsson, 2000). Con temperaturas más altas es probable que la sílice se precipite durante el ascenso. Con temperaturas más bajas otras especies de sílice tales como la calcedonia, cristobalita o sílice amorfa pueden controlar la disolución de la sílice (Fournier and Rowe, 1966; Fournier, 1973; Arnórsson, 1975).

Tabla 1: Geotermómetros químicos de sílice

Geotermómetro	Ecuación	Referencia
Cuarzo-sin perdida vapor	$T = 1309 / (5.19 - \log C) - 273.15$	Fournier (1977)
Cuarzo-máxima perdida vapor 100°C	$T = 1522 / (5.75 - \log C) - 273.15$	Fournier (1977)
Cuarzo	$T = 42.198 + 0.28821C - 3.6686 \times 10^{-4}C^2 + 3.1665 \times 10^{-7}C^3 + 77.034 \log C$	Fournier and Potter (1982)
Cuarzo	$T = 53.500 + 0.11236C - 0.5559 \times 10^{-4}C^2 + 0.1772 \times 10^{-7}C^3 + 88.390 \log C$	Arnórsson (1985) based on Fournier and Potter (1982)
Calcedonia	$T = 1032 / (4.69 - \log C) - 273.15$	Fournier (1977)

Calcedonia	$T = 1112 / (4.91 - \log C) - 273.15$	Arnorsson et al. (1983)
------------	---------------------------------------	-------------------------

• **Geotermómetros de cationes.**

Se basan en la dependencia de la temperatura en el intercambio de iones o de partición de los álcalis entre las soluciones y las fases sólidas. Las proporciones de constituyentes disueltos cambian con el cambio de la temperatura de equilibrio.

Tabla 2: Geotermómetros químicos de cationes

Geotermómetros	Ecuaciones	Referencia
Na-K	$T = [855.6 / (0.857 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Truesdell (1976)
Na-K	$T = [833 / (0.780 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Tonani (1980)
Na-K	$T = [933 / (0.993 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$ (25-250°C)	Arnorsson et al. (1983)
Na-K	$T = [1217 / (1.483 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Fournier (1979)
Na-K	$T = [1178 / (1.470 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Nieva and Nieva (1987)
Na-K	$T = [1390 / (1.750 + \log(\text{Na/K}))] - 273.15$	Giggenbach (1988)

7. Metodología

7.1 Recopilación de Información.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó información de análisis fisicoquímico de aguas, así como de la geología de dos zonas de interés geotérmico en Nicaragua. A pesar que la información fue proporcionada, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos al momento de realizar el muestreo:

La mejor estrategia para la toma de muestras de aguas consiste en recoger un número razonable de muestras de las fuentes de agua, 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.

7.2 Evaluación de la calidad de los resultados

Para verificar si los análisis químicos de las aguas son los correctos, se utiliza un Balance Iónico (BI) de los componentes disueltos en las aguas. Aunque el BI no es un procedimiento válido para aguas ‘no potables’ (Murray y Wade, 1996), se utiliza

habitualmente en aguas termales para verificar los análisis (e. g. Publications of The United Nation University Geothermal Training Programme, Marini, 2000). El BI se basa en el porcentaje de diferencia, entre las cargas positivas y negativas totales, Como el agua es un medio sin carga eléctrica, los cationes deben compensar a los aniones en la solución. El BI se considera aceptable cuando su valor absoluto es menor al 10%. Se define de la siguiente manera:

$$BI = \frac{\sum \text{Cationes} - \sum \text{Aniones}}{\sum \text{Cationes} + \sum \text{Aniones}}$$

7.3 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 Stiff
- Diagrama ternario CL-SO₄-HCO₃

7.4 Cálculos de geotermómetros.

La finalidad de la termometría química es aplicar una serie de metodologías, desarrolladas por numerosos investigadores en los últimos años, las cuales, mediante el tratamiento de datos de composición química convencional, las composiciones isotópicas del agua y de la composición de la fase gaseosas incluida en el fluido, permiten establecer la temperatura de base de los fluidos en su circulación profunda, en relación con los materiales geológicos presentes en el sistema.

7.5 Determinación del modelo conceptual geoquímico.

Un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica.

Para que los modelos puedan decirnos algo sobre el objeto que representan, es necesario que se construyan estableciendo una relación con la realidad que debe ser simétrica, es decir, la relación de correspondencia entre el objeto real y el modelo debe ser al menos parcialmente reversible y debe permitir la traducción de algunas propiedades del modelo a la realidad.

La calidad de las propiedades emergentes de un modelo, puede valorarse sometiendo una parte de los resultados a una verificación experimental que, aunque sólo puede ser parcial, servirá de orientación sobre la magnitud de los errores derivados del modelo y puede permitir la introducción de correcciones.

8. Análisis de datos

8.1 Geología Regional.

Las áreas están ubicadas una en el sector NO y la otra en parte central de Nicaragua. Tectónicamente; la zona del NO, se encuentra en el Bloque Chortis, que es una unidad de corteza principalmente continental perteneciente a la Placa Caribe. También el área del NO se ubica cerca del margen SO de la Depresión Nicaragüense, la cual es una amplia zona subsidente desarrollada paralelamente a la costa del Pacífico y a la Fosa Mesoamericana.

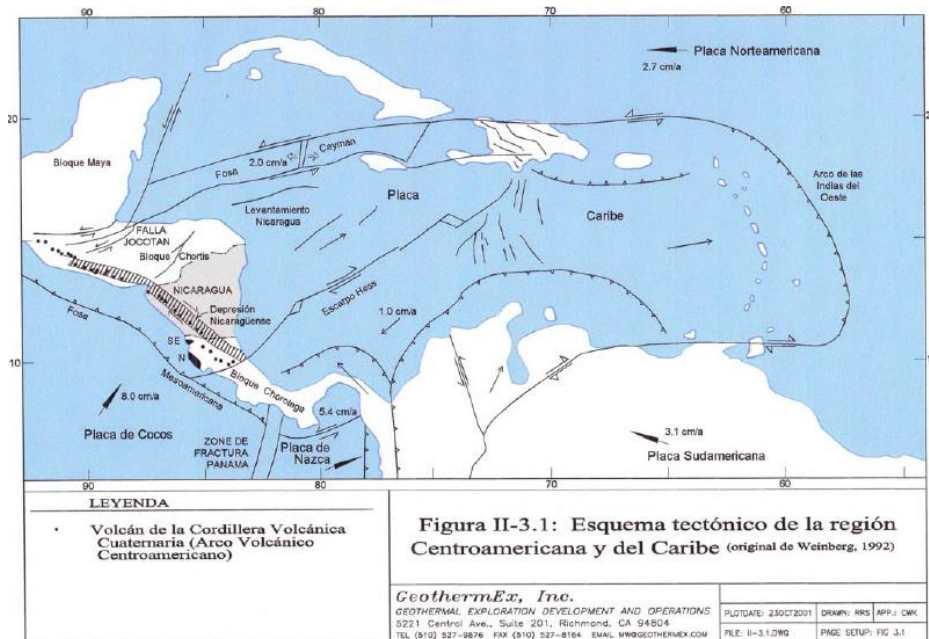


Figura 3: Esquema tectónico de la región centroamericana y del caribe.

Al interior de la Depresión Nicaragüense, en proximidad de su margen SO, se encuentra la Cordillera Volcánica Cuaternaria, que es un segmento del Arco Volcánico Centroamericano, y presenta una importante actividad en la zona al NO bajo examen. La Depresión está flanqueada hacia el SO por la planicie y relieves costeros del Pacífico y hacia el NO por el Altiplano del Interior, donde afloran formaciones volcánicas y sedimentarias del Terciario.



Figura II-3.2: Provincias fisiográficas de Nicaragua
(original de McBirney et al., 1965)

2001, GeothermEx, Inc.

Figura 4: Provincias fisiográficas de Nicaragua

La Zona Costera del Pacifico presenta una secuencia continua de sedimentos neríticos, en su mayoría volcano-clásticos, que se depositaron entre el Cretácico Tardío y el Mioceno Superior (Formaciones Brito, Rivas, Masachapa y El Fraile). Estas rocas se presentan plegadas según ejes NO-SE, erosionadas y sucesivamente recubiertas en discordancia por rocas carbonáticas y sedimentos clásticos del Plioceno (Formación El Salto) y por las vulcanitas Plio-Cuaternarias de la Formación La Sierra. En el sector NO de la Zona Costera del Pacifico afloran también delgadas capas ignimbríticas y secuencias de lavas conocidas como Grupo Tamarindo, el cual es heterópico con la formación El Fraile, y es correlacionado con las porciones inferiores del Grupo Coyol, que afloran más ampliamente en el Altiplano del Interior (McBirney et al., 1965; Weyl, 1980; Weinberg, 1992).

El Altiplano del Interior se constituye principalmente por rocas volcánicas del Grupo Matagalpa (Oligoceno) y del Grupo Coyol (Mio-Plioceno). El Grupo Matagalpa se compone principalmente por flujos piroclásticos, principalmente ignimbríticos, con asociadas lavas de diversa composición y rocas volcano-sedimentarias. El Grupo Coyol, separado del subyacente Matagalpa por una discordancia angular, es a su vez subdividido en inferior y superior. La porción inferior se compone por lavas, principalmente andesíticas, aglomerados volcánicos y capas ignimbríticas, con intercalaciones piroclásticas, de areniscas y sedimentos marinos. La porción superior tiene intercalaciones de lavas basálticas y dacíticas, aglomerados volcánicos, productos piroclásticos e ignimbríticas soldadas. Todas las rocas Pre-Cuaternarias que afloran dentro la zona NO en examen fueron clasificadas como parte del Grupo Coyol según Parsons Corp. (1972), el cual llevo a cabo el Proyecto Catastro de Nicaragua.

Evolución Geológica y Tectónica.

La historia geológica y tectónica de la región occidental de Nicaragua ha sido estrictamente relacionada con la evolución geodinámica del margen continental pacífico, caracterizado por la subducción de la placa oceánica de Cocos por debajo de la placa continental del Caribe. Weinberg (1992) identificó tres diferentes fases de deformación que han acompañado la evolución geológica de la región pacífica de Nicaragua:

- Fase Miocénica: En el Mioceno Superior – Plioceno Inferior, el régimen tectónico fue dominado por fenómenos de compresión con esfuerzos principales NE-SO, normales a la Fosa Centroamericana. Estos originaron deformaciones a escala regional según ejes NO-SE. Los efectos de esta fase tectónica son principalmente visibles en la Zona Costera del Pacífico donde afectan con amplios pliegues a las formaciones sedimentarias Pre-Pliocénicas, pero han sido reconocidos también en el Altiplano del Interior, en forma de una discordancia angular que separa el Grupo Matagalpa desde el sobreyacente Grupo Coyol.
- Fase del Plioceno – Pleistoceno Inferior: A partir del Plioceno ocurrieron marcados cambios en el régimen general de esfuerzos tectónicos, que resultaron en la formación de estructuras de extensión de rumbo NE-SO, acompañadas por una migración del volcanismo desde el Altiplano del Interior hacia el Pacífico. Estos fenómenos sugieren un incremento del ángulo de subducción de la placa de Cocos y una reducción de la velocidad de convergencia entre las placas de Cocos y Caribe, posiblemente a raíz del desplazamiento hacia el NE del Bloque Chortís. Las deformaciones de esta fase son principalmente fallas normales, con aquellas que originaron la Depresión Nicaragüense, interpretada por Weinberg como un semi-graben limitado en su lado sur-oriental por fallas NO-SE inclinadas al NE.

Fase del Pleistoceno Superior – Holoceno: A partir del Pleistoceno Superior, hasta la actualidad, se instauró un nuevo régimen de esfuerzos tectónicos en la región, caracterizado por un componente principal de compresión NS, la cual genera fallas de corrimiento lateral NE-SO y NO-SE y fallas normales de rumbo N-S. Las estructuras más evidentes son graben de tipo "pull apart", el más importante de los cuales se ubica en correspondencia con la ciudad capital y es conocido como "Gaben de Managua".

- Zona 1

8.2 Geología de la zona 1 de estudio.

El área de estudio tiene una extensión aproximada de 72 km² y se encuentra en la zona central de Nicaragua. De acuerdo al reconocimiento geológico realizado en el área de estudio. El basamento en el área de estudio es de edad Terciaria que consiste en ignimbritas, rocas piroclásticas y basalto - andesita. En los alrededores del área se encuentran los restos de dos volcanes, Santa Lucía, en el Norte y Las Lajas en el Sur de la zona

El área se puede dividir en varias unidades, dependiendo de las formaciones volcánicas. La unidad inferior es de composición tobácea con alteraciones de zeolita, se encuentra localizada al NE y SE del área en estudio. Específicamente al SE del área de estudio, se encontró un dique de basalto, en la base se localiza toba basáltica con minerales de zeolita. En dos sitios se encontró el contacto entre la toba basáltica con minerales de zeolitas y las ignimbritas las cuales tienen intercalaciones de piroclastos; sobreyaciendo a las ignimbritas encontramos basaltos no alterados.

En la parte sur del área afloran rocas basálticas, presentan un alto grado de fracturamiento, también se identifican flujos piroclásticos los cuales están cubiertos por ignimbritas con intercalaciones de flujos piroclásticos y en la parte superior ignimbritas masivas de coloración rosada.

La secuencia litológica de la parte Oeste hacia la parte central es bien compleja, se cree que las rocas más antiguas son las ignimbritas riolítica de color blanquecino la cual está totalmente alterada. En la parte central se identifican una intercalación de flujos piroclásticos de ignimbritas rojas y de ignimbritas riolítica.

En la esquina noroeste las ignimbritas alteradas cubren la mayor parte de la zona. La formación de andesita en el norte está al lado o en la parte alta de la ignimbritas en la estratigrafía, el contacto entre ellos no ha sido identificado. Le siguen las ignimbritas riolíticas que se extiende de noroeste a sureste hasta el centro de la zona, donde se corta por una falla y no aparecen después de eso. En la parte norte la formación en la parte superior es andesita la cual no es muy gruesa.

Hay dos grupos principales de fallas en la zona.

- Sistema de fallas regionales con dirección preferencial NO-SE y NE-SO.
- Sistema de fallas con dirección preferencial NNE-SSO, que se puede relacionar con la actividad geotérmica presente en el área. Las rocas que constituyen el basamento buzcan con dirección hacia el SO.

En el campo es muy difícil ver estas fracturas o fallas, pero los lineamientos se verificaron con las fotografías aéreas. Estos lineamientos son los que posiblemente cortaron las grandes fallas regionales y debilitaron la roca madre.

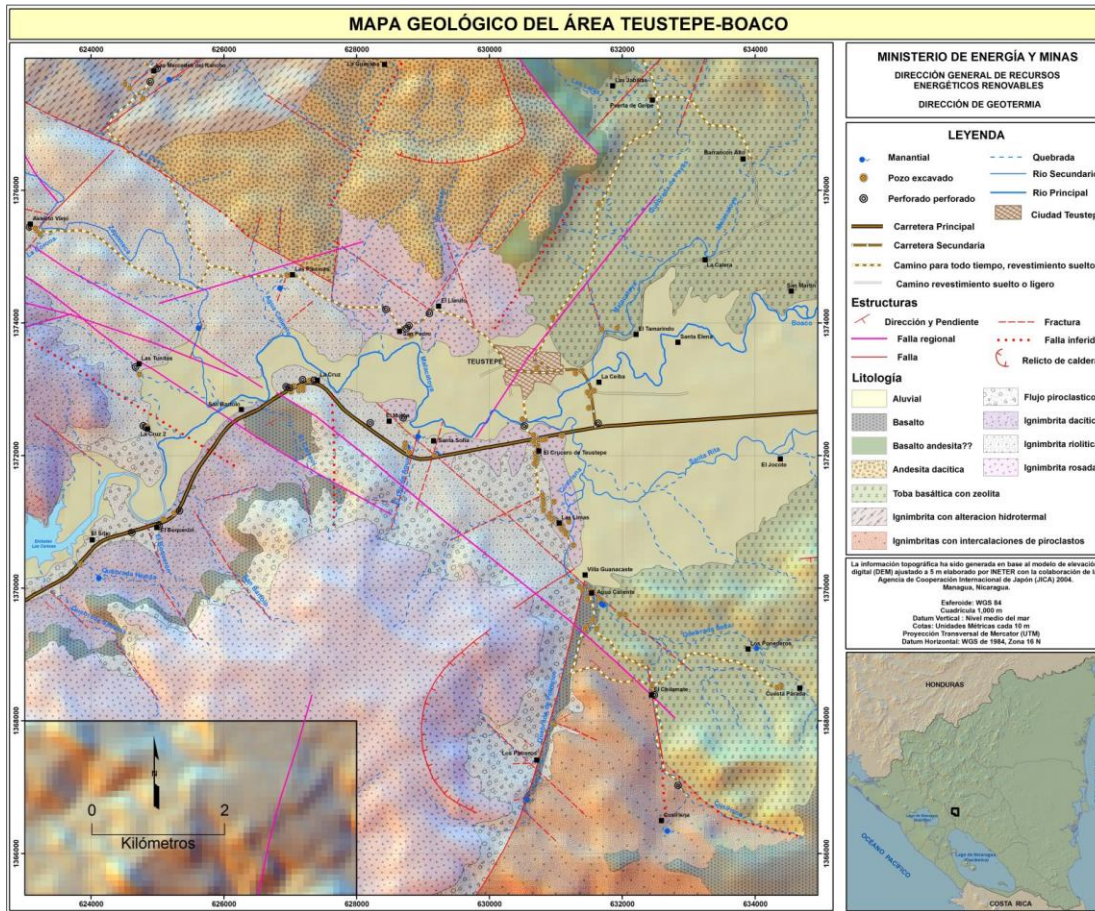


Figura 5: Mapa geológico de zona 1 de estudio

Manifestaciones geotérmicas.

La actividad geotérmica en el área de estudio es baja, se encontraron 4 sitios con manifestaciones termales, dos sitios en la zona central del área en estudio. Y dos sitios en la zona NO. La temperatura encontrada oscila entre 36.5 a 45.3°C estos parecen estar relacionados con fallas NNE-SSO y NE-SO.5

En la zona central se localizaron dos puntos donde emanan las aguas con temperaturas de 37.5 a 42.8°C. De igual forma a menos de 100 m se encuentra otra manifestación termal con temperaturas entre 36.5 y 40.5°C.

En la parte NO, se localiza el sitio donde se encontró 3 ojos de agua alineados sobre una fractura, lo que nos indica que el ascenso del agua termal es a través de la fractura, la temperatura del agua oscila entre 37 a 41.2°C

8.3 Composición química de las aguas de zona 1 de estudio.

En la tabla 5 se presenta los datos de los análisis químicos realizados a las muestras del área de la zona 1 de estudio.

Tabla 3: Datos de los análisis químicos a muestras de la zona 1 de estudio.

Sitio	T	pH	C.E.	Na	K	Ca	Mg	Li	Cl	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	B	BI
	°C		µS/cm	mg/L										
ME-12T.	27.1	7.05	484	30.36	0.1	42.2	22.61		45	4.36	229.36	98.8		1.63
PE-72T	29.1	7.24	895	69.06	7.3	88.42	30.07	0.025	101	19.3	383.08	97.1		2.77
PE-71T	28.9	7.08	1340	89.56	5.9	130.28	51.14	0.026	215	33.1	383.08	99		6.18
M-13T.	29.5	6.76	386	28.18	4.9	33.96	13.81		32.5	3.87	172.02	99.7		4.53
PP-12T	28.7	6.92	752	49.44	2.3	94.49	19.71		65	6.31	340.38	77.5		6.22
PE-79T	27.1	6.76	901	22.86	1.5	50.682	26.87		75	13.22	270.84	67.9		-8.40
M-17T	27.6	6.99	758	46.74	0.8	99.8	21.88		57	3.98	392.84	83.5		4.15
PE-77T	28.4	7.08	803	36.13	2.4	81.81	33.17		157	2.22	206.18	92.1		3.61
PE-69T	29.6	7.22	1030	97.01	4.7	90.16	29.69		127	29.3	374.54	91.5		4.38
PE-64T	29	7.81	1272	130.91	14.4	102.41	37.05		167	36.1	529.48	63.3		0.25
PE-61T	29.9	7.07	1171	110.68	3.3	128.54	33.14		137	17.1	511.18	92.9		5.40
PE-60T.	27.6	7.22	2450	184.8	3.9	226.12	72.06		555	49.4	409.92	81.6		3.99
PE-58T.	27.8	7.56	1553	128.88	4.5	155.47	56.42		215	39.7	585.6	85.7		4.70
PE-57T.	28.3	7.49	2041	245.63	2.1	112.02	62.98		375	36.2	577.06	85.8		1.70
PE-50T	28.7	7.31	1305	104.66	0.67	122.1	37.36		187.46	30.6	390.4	85		5.42
PE-47T	28.5	7.56	1395	105.79	0.84	141.5	38.72		227.45	35.4	403.82	78.5		3.83
PE-39T.	29	7.31	3018	241.87	1.43	115.46	98.61		387.41	136	428.22	68.5		8.07
PE-38T	29.5	7.32	1913	243.8	0.98	63.101	63.18		374.92	93	392.84	72.6		0.06
PE-36T.	28.1	7.46	2410	321.6	1.77	154.37	60.72		434.9	124.4	625.86	78.5		3.11
PE-34T.	28.4	7.49	6080	249.07	3.51	571.1	211.7	0.036	2074.5	134.75	278.16	82.6		-7.38
M-2T	30.4	7.22	825	91.94	0.77	89.99	6.18	0.12	44.99	108	352.8	57.7	0.12	-1.54
PE-102T	29.3	7.27	1176	144.47	2.28	121.91	12.1		134.97	71.8	468.48	91.5		1.67
PE-103T.	29.6	6.84	2410	296.68	3.96	253.7	20.8	0.068	299.93	483.5	440.42	72.5	0.58	3.07
PE-105T.	28.8	7.22	4250	528.72	7.75	223.09	19.84	0.104	574.87	563.6	433.71	74	0.84	1.26
PE-106T.	29.6	7.01	2046	86.96	2.16	353.68	12.98		269.94	190.8	439.2	104		9.11
PE-99T.	28.9	7.3	5230	1098.8	38.3	241.24	37.62	0.035	424.9	2112	442.86	54.1	1.57	0.53
PE-2T	39.8	8.02	1215	187.02	1.92	78.2	0.63	0.056	84.98	414.2	42.7	43	0.61	1.74
PP-19T	31	6.95	952	81.11	1.85	27.7	10.54		74.98	44.2	458.72	75.5		-28.88
M-8T	30.4	7.2	643	61.81	7.57	35.213	13.5		49.99	9.21	320.86	111.2		-8.84
PP-2T.	30.4	6.91	1069	112.97	1.99	97.92	13.88		144.97	35	414.19	64		-2.72
PE-3T.	29.9	7.07	1464	129.32	1.35	138.5	15.78		344.92	69.5	131.76	41	0.61	1.95
PE-6T.	30.3	7.1	1461	189.63	1.76	114.9	15.06	0.03	103.73	350	261.08	63.3	0.44	2.60
PE-8T.	32.8	6.56	1856	259.42	3.16	143.78	3.74	0.068	117.17	609.6	157.38	58.5	0.84	0.72
PE-97T	28.4	7.11	810	36.79	0.45	110.62	25.86		60.99	15.6	416.02	77.6		2.18
PE-94T	33.4	7.77	1369	182.15	2.05	85.56	12.5	0.044	83.73	504	51.24	33.7	0.66	-1.57
PE-86T	28.8	7.54	1468	56.57	0.39	72.92	34.7		70.98	43.2	333.06	59.4		3.48
PE-13T	29.4	7.05	5940	1228.01	3.45	316.08	17.72	0.208	287.44	2646	296.46	59.4	2.37	1.93
M-6T	40.5	7.99	1417	190.14	1.99	90.66	0.74	0.065	83.73	509.89	35.38	45.6	0.71	-2.47
PE-12T	30.6	7.07	3150	528.72	2.7	255.54	5.2	0.139	354.92	1047	202.52	54.9	1.53	1.56
PE-15T	29.1	7.31	972	50.31	0.33	132.7	31.9		94.98	52.6	384.3	75.6		6.36
PE-20T	27.3	7.77	1419	217.45	1.74	71.37	30.3		128.72	308	341.6	63.2	0.13	-0.28
PE-19T	28	7.58	1547	229.67	1.18	76.37	33.8		179.96	304.5	334.28	66.8	0.11	-0.85
PE-28T	29.4	7.31	1468	178.75	1.68	30.461	48.22		133.72	191.2	356.24	72.5	0.12	12.47
M-4T	39.7	8.26	1377	201.73	1.98	95.06	1.5	0.073	83.73	501.18	18.3	43.2	0.71	2.22
M-5T	38.9	8.37	1351	198.01	1.83	92.2	0.66	0.076	85.73	498.37	25.62	43.9	0.72	0.37
PP-10T	30.3	7.4	1321	175.85	1.89	128.76	5.2		93.73	430.39	157.38	50.3	0.58	1.27
PP-7T	29.8	6.96	1389	107.34	3.91	163.6	31.96		178.71	112.8	335.5	60.7		9.39
PP-5T	29.8	6.98	1226	125.86	1.62	129.24	25.86		173.71	30.5	461.16	85.3		3.67

8.4 Clasificación de aguas de zona 1 de estudio.

- Diagrama de Piper Hill Langelier

Como primer paso de análisis se realiza la clasificación geoquímica de las muestras de la zona 1 de estudio que corresponde a manantiales, pozos perforados y pozos explotados. Se logran identificar tres grupos de aguas en la figura 6.:

Grupo I: Aguas bicarbonatadas. muestras M:13T, 8T y PP: 19T son representativas de estos elementos.

Grupo II: Aguas sulfatadas sódicas fluidos que fueron calentadas con vapor geotérmico se equilibró con mantos someros sin perder su carácter sulfatado; las muestras PE: 13T, 99T presentan altos contenidos de sulfatos

Grupo III: Aguas cloruradas posiblemente pueden tener relación con un fluido geotérmico de alta temperatura; las muestras PE: 34T, 60T, 3T son representativas de este grupo.

Las muestras que se encuentran en la parte central del diagrama se consideradas aguas de mezclas.

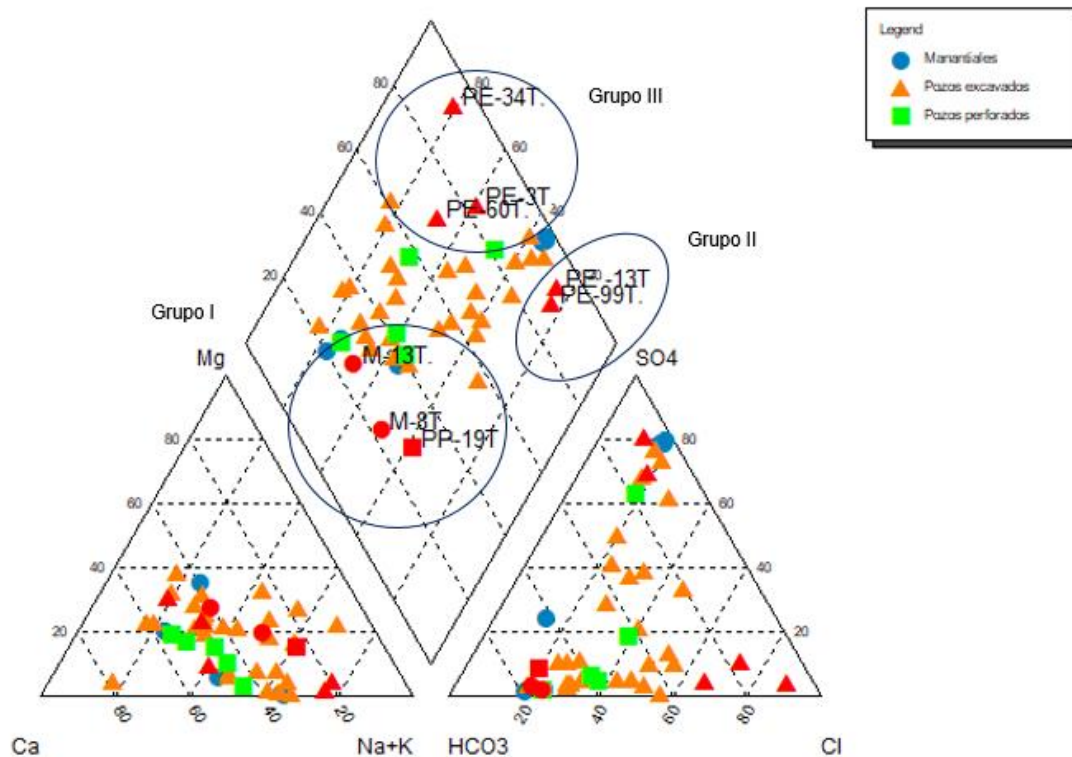


Figura 6: Diagrama de Piper Hill Langelier para zona 1 de estudio

- Diagrama ternario CL-SO₄-HCO₃

Se determinó de igual manera la clasificación de las aguas en base al diagrama ternario de aniones mayoritarios CL-SO₄-HCO₃

En la figura 7 se logra observar que la mayoría de muestras están graficadas cerca del vértice HCO₃ indicando que son aguas típicamente de zonas pocos profundas, mientras que las aguas cercanas al vértice Cl asociadas a aguas geotérmicas. Las muestras que se encuentran entre los vértices Cl-HCO₃ son mezclas. Y por últimos el grupo de muestras cercano al vértice SO₄ que pertenecen a sulfatadas son aguas calentadas por vapor.

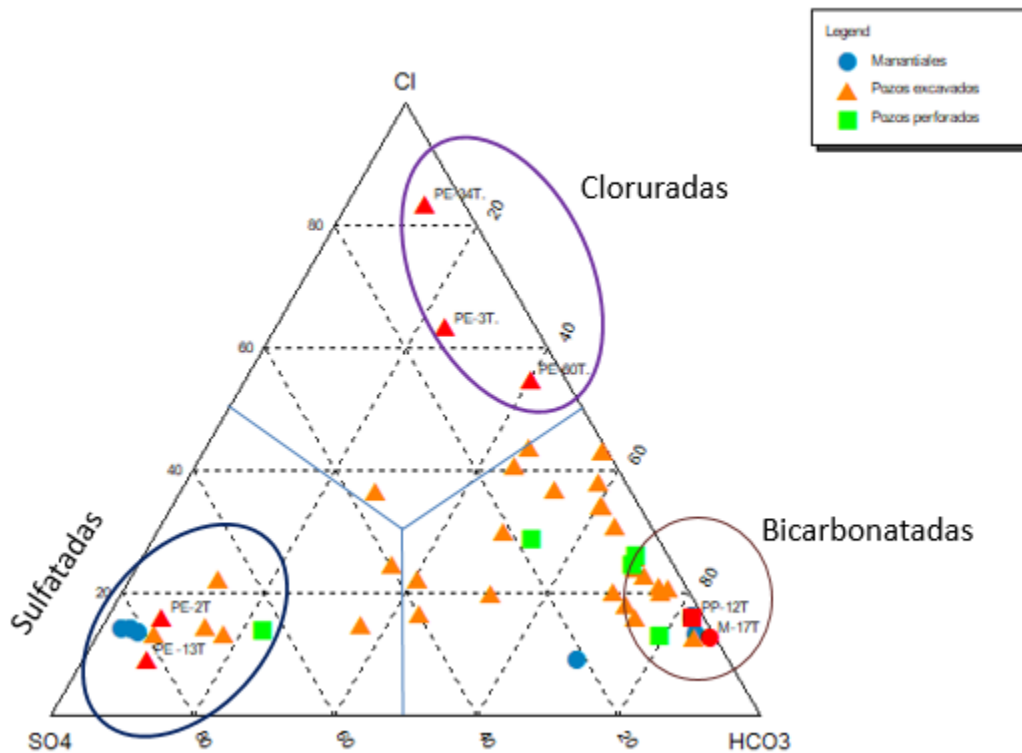
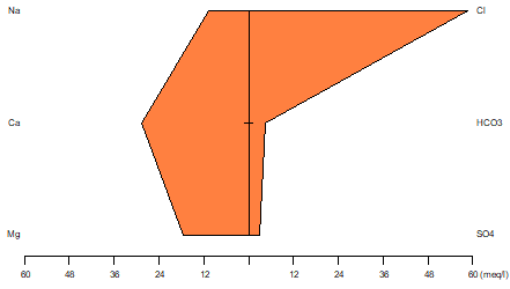


Figura 7: Diagrama CL-SO₄-HCO₃ para zona 1 de estudio

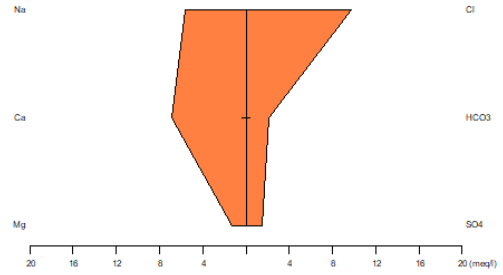
- Diagramas de stiff

A través de los diagramas de stiff podemos diferenciar de mejor manera la clasificación de la muestra de agua a analizar. Se seleccionaron muestras representativas de cada tipo de agua y se graficaron en diagramas de stiff para corroborar su clasificación de acuerdo a sus iones mayoritarios. Para este análisis se tomaron las 2 muestras que presentaban las más altas concentraciones de cloro, sulfato y bicarbonato.

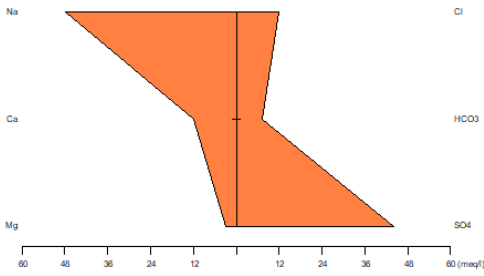
PE-34T.



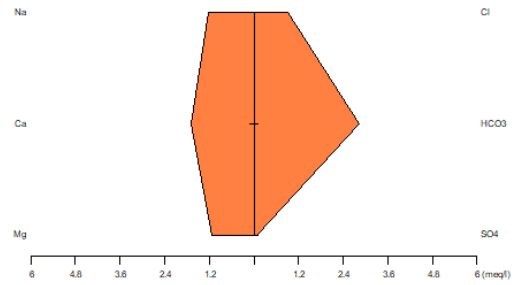
PE-3T



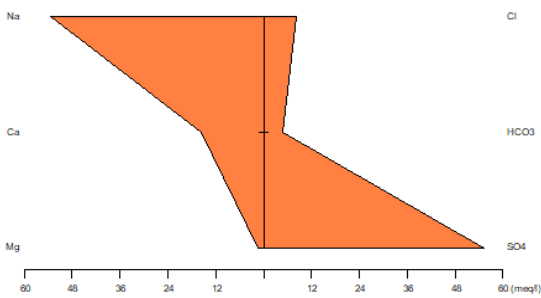
PE-99T.



M-13T.



PE -13T



M-8T

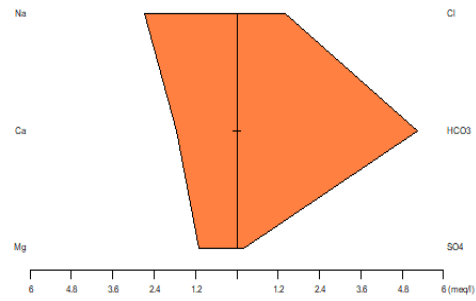


Figura 8: Diagrama de stiff zona 1 de estudio

Según los diagramas de stiff las muestras PE-34T y PE-3T son cloruradas cálcicas, estas muestras presentan temperaturas de 28.4°C y 29.9°C.

Las muestras que presentan características sulfatadas sódicas son la PE99-T y PE-13T con temperaturas de 28.9°C y 29.4°C para ambas. Y las muestras M-8T y M-13T se clasificaron como bicarbonatadas presentando temperaturas de 30.4°C.

Para poder analizar un poco más las mezclas de aguas se elaboró un diagrama de tipo Langelier de HCO₃ vs Cl + SO₄ como se muestra en la figura.

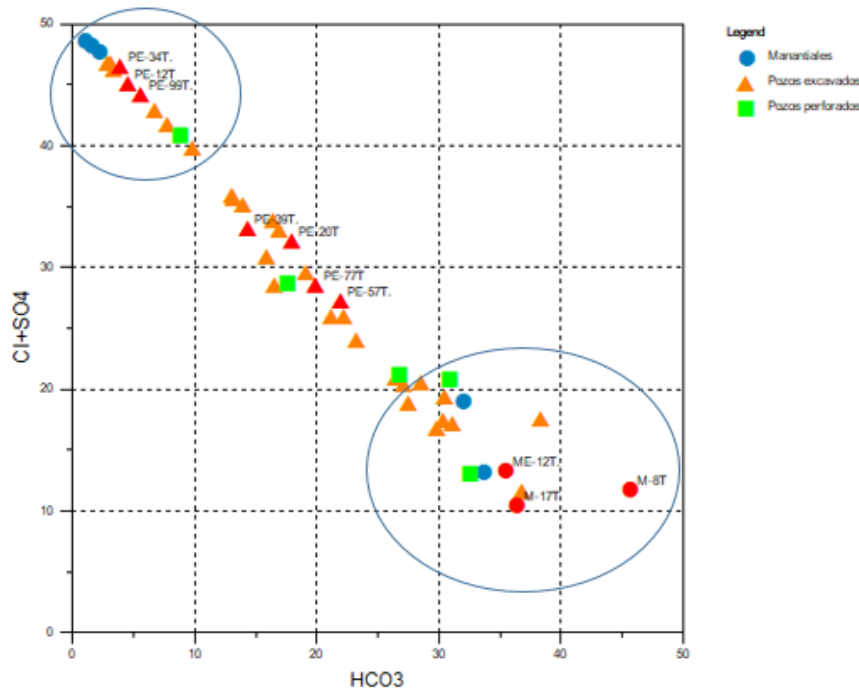


Figura 9: Diagrama Langelier Cl +SO₄ vs HCO₃ zona 1 de estudio

Se observa la demarcación de líneas claras de distribución de las muestras en donde el grupo que se encuentran en el lado derecho inferior son aguas de origen superficial. Las demás líneas, están constituidas por las muestras con altos contenidos de cloruros y bajos contenidos de bicarbonatos en el extremo superior izquierdo, así como las muestras con menor contenido de cloruros y menor contenido de sulfatos.

Los diagramas de sodio vs potasio y cloro vs boro nos ayudan a conocer sobre el origen de las manifestaciones termales que se encuentran en la zona de estudio. Podemos llegar a observar si la relación entre las especies químicas sodio y potasio se mantienen ya que, aunque sean especies reactivas puede haber un gran deseo por el intercambio iónico entre ellas. Por lo que mantendrían una relación que es trazable a lo largo del camino del fluido.

En lo que respecta a la relación cloro vs boro es de gran utilidad, ayuda a identificar las fuentes que presentan alguna relación con procesos termales. Es común tener altas concentraciones de boro y cloruros en fuentes que tienen mezcla con agua geotérmica, se consideran también como trazadores naturales.

En la figura 10 no se logran observar una línea de tendencia entre el sodio y el potasio lo que podría indicar que está siendo afectado por reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos. La muestra PE-28T tiene la concentración más alta de potasio.

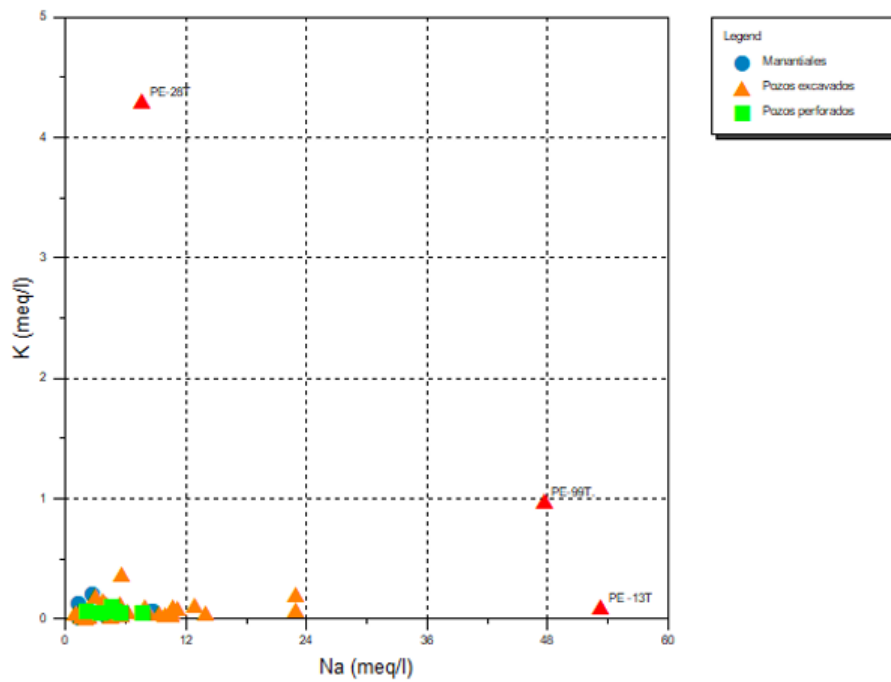


Figura 10: Diagrama sodio vs potasio zona 1 de estudio

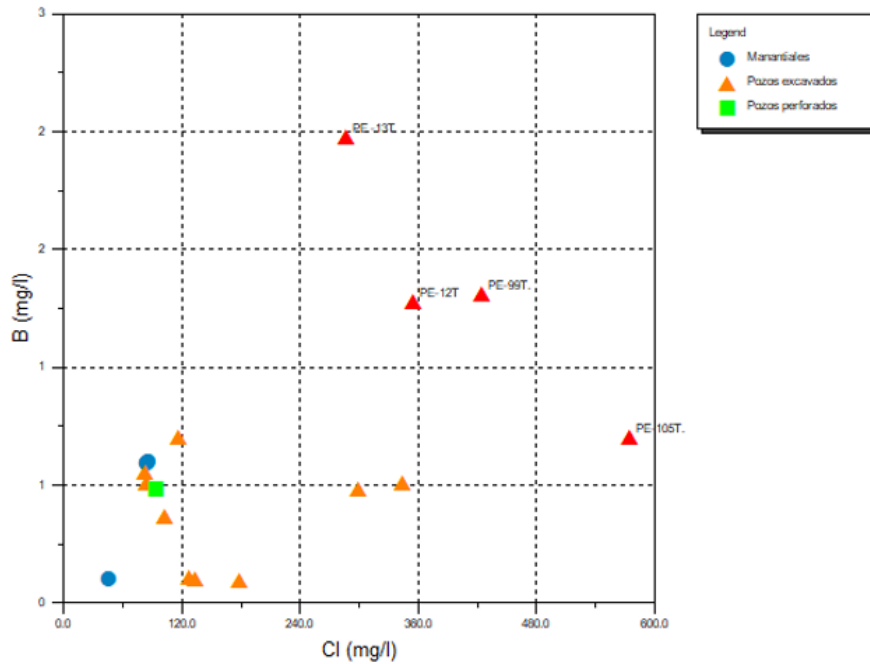


Figura 11: Diagrama Cloro vs Boro zona 1 de estudio

Para la figura 11 cloro vs boro se observa la distribución de las muestras, sin embargo, no hay una tendencia definida. Las muestras PE-13T, PE-12T y PE-99T presentan mayor contenido de aguas geotérmicas.

8.5 Cálculos de geotermómetros de zona 1 de estudio.

En la figura 12. Se evidencia que todas las muestras se encuentran en la zona de aguas inmaduras las cuales pertenecen a aguas someras o superficiales que no han logrado el equilibrio agua-roca.

Con este diagrama se puede inferir un rango de temperatura del reservorio con las isotermas del diagrama entre 80-160°C; característicos de reservorios de baja- media entalpia. La muestra PE-28T y PE-99T se encuentra un poco alejada de la esquina del Mg, pero siempre en el área de aguas inmaduras siendo estas, aguas superficiales.

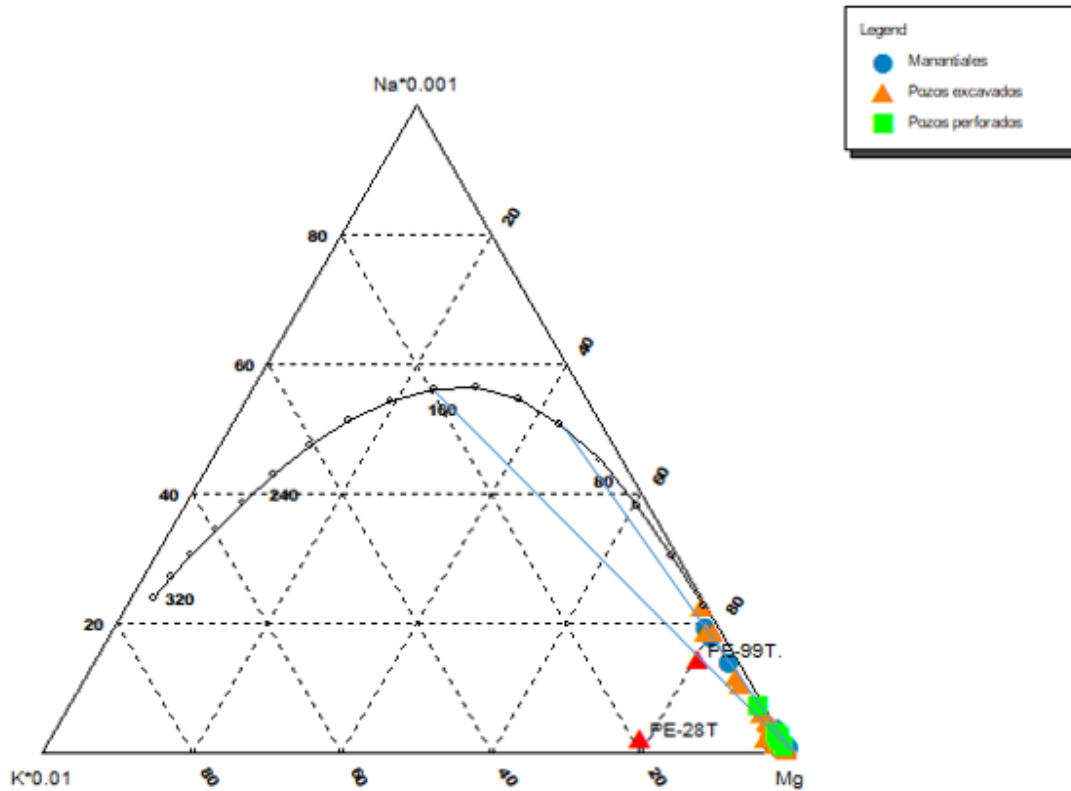


Figura 12: Diagrama de Giggenbach Na-K-Mg zona 1 de estudio

Se realizaron estimaciones de temperaturas por medio del cálculo de geotermómetros de sílice y cationes a una selección de muestras que mejor representaban características de un sistema geotérmico. A continuación, se presenta los resultados.

Tabla 4: Geotermómetros de sílice de zona 1 de estudio

Muestra	Temp.	Cl	Mg	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	TQZ F77	TQz F77 max perd. Vapor 100%	TQz FP82	TQz FP82i
PE-71T	28.9	215	51.14	33.1	383.08	99	136.63	132.24	136.79	133.39
PE-60T	27.6	555	72.06	49.4	409.92	81.6	126.14	123.38	126.32	124.28
PE-47T	28.5	227.45	38.72	35.4	403.82	78.5	124.10	121.65	124.30	122.47
PE-39T	29	387.41	98.61	136	428.22	68.5	117.09	115.68	117.34	116.20
PE-38T	29.5	374.92	63.18	93	392.84	72.6	120.05	118.20	120.28	118.86
PE-36T	28.1	434.9	60.72	124.4	625.86	78.5	124.1	121.65	124.3	122.47
PE-34T	28.4	2074.5	211.7	134.75	278.16	82.6	126.79	123.93	126.96	124.85
PE-103T	29.6	299.93	20.8	483.5	440.42	72.5	119.98	118.14	120.21	118.80
PE-105T	28.8	574.87	19.84	563.6	433.71	74	121.04	119.04	121.25	119.74
PE-106T	29.6	269.94	12.98	190.8	439.2	104	139.40	134.57	139.55	135.89
PE-3T	29.9	344.92	15.78	69.5	131.76	41	92.78	94.73	93.27	93.57

Tabla 5: Geotermómetros de cationes de zona 1 de estudio

Muestra	Temp.	Cl	Mg	SO ₄	HCO ₃	SiO ₂	T Na/K Tr76	T Na/K Ton80	T Na/K Ar83	T Na/K F79	T Na/K Ni87	T Na/K Gig88
PE-71T	28.9	215	51.14	33.1	388.08	99	146.62	151.58	155.96	183.64	171.17	201.05
PE-60T	27.6	555	72.06	49.4	409.92	81.6	64.68	66.07	76.47	112.14	101.34	132.61
PE-47T	28.5	227.45	38.72	35.4	403.82	78.5	16.18	16.07	28.48	66.49	56.81	87.87
PE-39T	29	387.41	98.61	136	428.22	68.5	4.17	3.76	16.49	54.77	45.38	76.25
PE-38T	29.5	374.92	63.18	93	392.84	72.6	-10.12	-10.85	2.17	40.61	31.57	62.13
PE-36T	28.1	434.9	60.72	124.4	625.86	78.5	1.40	0.92	13.72	52.05	42.72	73.54
PE-34T	28.4	2074.5	211.7	134.75	278.16	82.6	42.80	43.46	54.91	91.88	81.56	112.85
PE-103T	29.6	299.93	20.8	483.5	440.42	72.5	40.07	40.65	52.21	89.31	79.06	110.34
PE-105T	28.8	574.87	19.84	563.6	433.71	74	44.81	45.53	56.89	93.76	83.40	114.69
PE-106T	29.6	269.94	12.98	190.8	439.2	104	74.39	76.14	85.99	120.97	109.96	141.17
PE-3T	29.9	344.92	15.78	69.5	131.76	41	28.29	28.52	40.53	78.14	68.17	99.37

Se determinó de acuerdo a los geotermómetros de sílice un rango de temperatura entre 120 y 140°C. Se decidió no utilizar los geotermómetros catiónicos ya que presentaban resultados muy variados, estos estarían afectados posiblemente por reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos.

8.6 Modelo conceptual geoquímico preliminar zona 1 de estudio.

Se hace una propuesta de modelo conceptual geoquímico en base a la información geológica y geoquímica recopilada. Se elaboró la vista de perfil y vista de planta con elementos del modelo conceptual.

En la vista de perfil se presenta la colocación de los siguientes elementos. Las unidades litológicas del área de estudio, la temperatura del reservorio estimada, así como el patrón de fluidos en dirección SE, NW. La posible fuente de calor relacionada con la caldera del volcán Las Lajas al sur de la zona de estudio. Y la zona de descarga en el área de los manantiales M5-T, M6-T, M4-T.

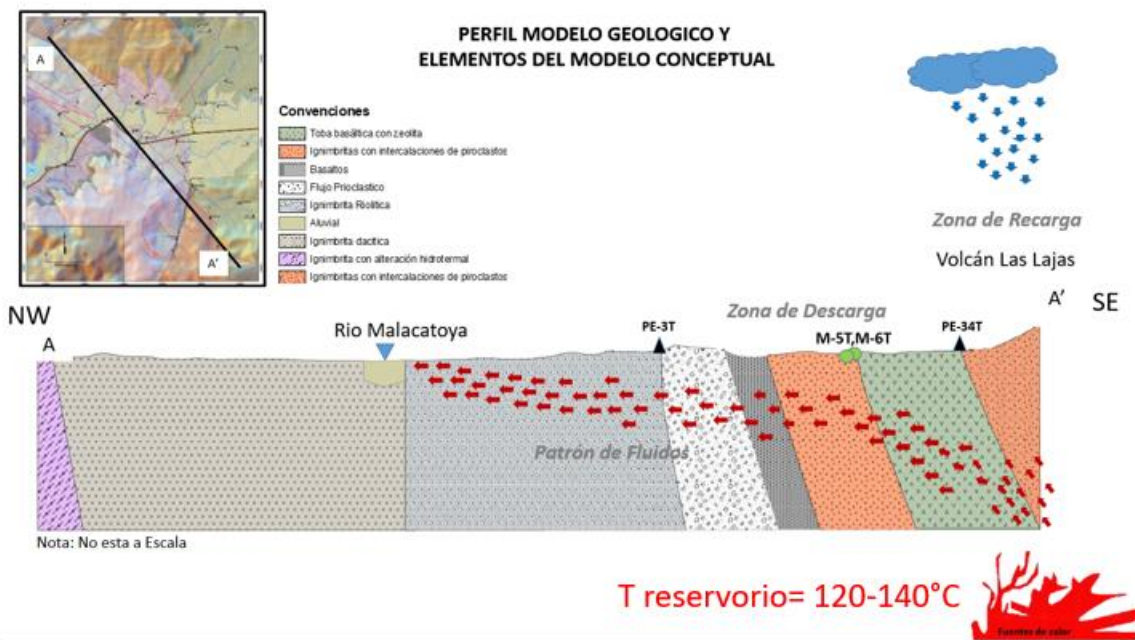


Figura 13: Modelo conceptual perfil (SE-NW) zona 1 de estudio.

De igual manera en la vista de planta del modelo se propone la posible fuente de calor que puede estar relacionada o inferido a un intrusivo. Este sistema de baja y media entalpia puede estar relacionado a un magma consolidado asociado al volcán Las Lajas al sur de la zona de estudio.

El patrón de circulación esta hacia el Noroeste, la zona de recarga se puede decir que está ubicada en la parte alta de la caldera o de lo que fue el edificio del volcán las lajas. El patrón de circulación está controlado por estructuras que han sido identificado como fallas mayores o fallamiento regional con dirección SE-NW. La zona de descarga se ubicó en la zona central del área de estudio en base a los manantiales M6-T, M5-T, M4T con temperaturas de 40.5°C, 38.9°C y 39.7°C. Se colocaron diagramas de stiff de las muestras más representativas cloruradas (PE-34T, PE-3T y PE105T) y ricas en sulfatos



Figura 14: Modelo conceptual geoquímico (vista planta) zona 1 de estudio

- ZONA 2

8.7 Geología de la zona 2 de estudio.

Geología Local.

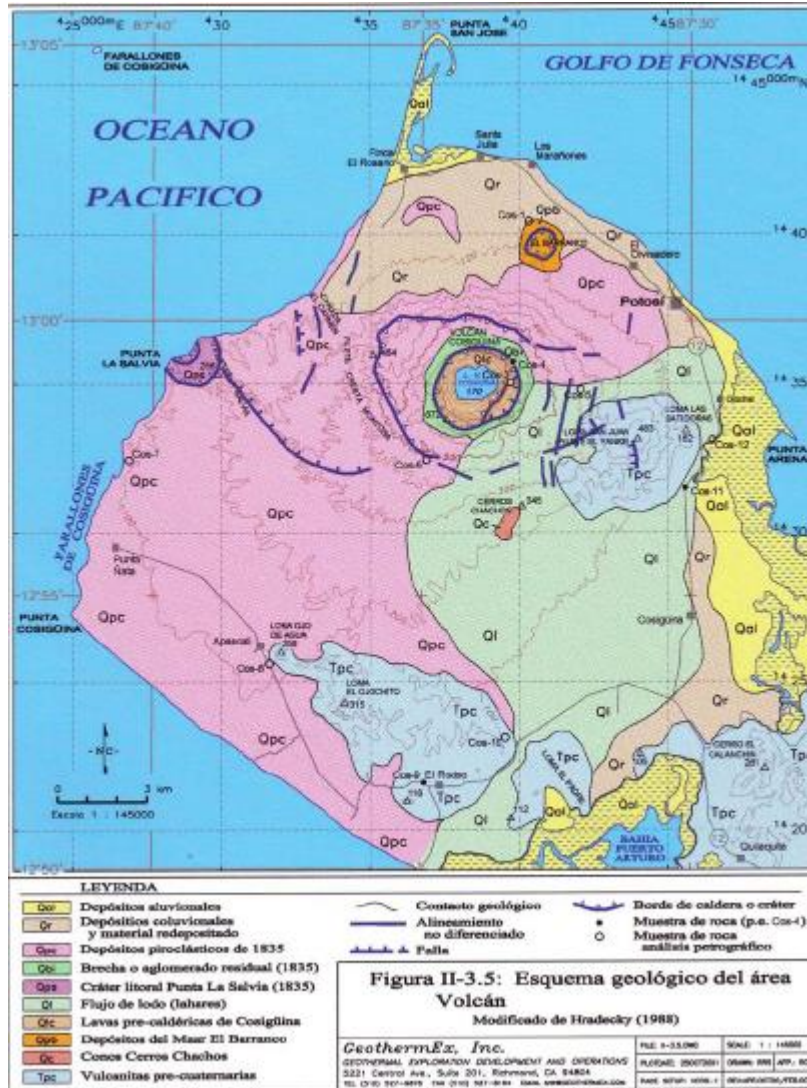


Figura 15: Mapa Geológico zona 2 de estudio

La geología superficial está dominada por el edificio y los depósitos del Volcán. Las rocas más antiguas del área pertenecen a la fase entre el Terciario Superior y el Cuaternario Inferior, y están expuestas en tres áreas generales:

- un complejo que forma un ancho contrafuerte que se extiende hacia el Este desde el edificio central del Volcán,
- un complejo de colinas en la parte Sudoeste de la zona; y
- unas colinas en el extremo Sudeste de la zona.

Las rocas expuestas en estas áreas no han sido todavía estudiadas en detalle. En los mapas anteriores se les atribuye al Grupo Coyol del Plioceno (Parsons Corp., 1972). No obstante, Hradecky (1988) señala que la morfología asociada con estas exposiciones sugiere que son restos erosionados de edificios volcánicos más recientes, posiblemente de la era del Pleistoceno.

Un examen en los depósitos encontrados en el complejo que se extiende hacia el Este del volcán central y en el del Sudoeste, indican que están dominados por lavas compactas, lahares y material volcánico detrítico. Se determinó que una muestra lava recolectada en el

Sudoeste es un basalto con olivino y clinopiroxeno, mientras que una lava muestreada en los depósitos de material volcánico detrítico en el Noroeste se encontró que es una andesita con dos piroxenos. En el área del complejo que se extiende hacia el Este del volcán central una muestra de lava recolectada en la base Este del contrafuerte se determinó que es una andesita con clinopiroxeno.

Forma y Composición.

Es un volcán de tipo escudo con un diámetro cercano a los 20 km y una elevación máxima de 872 m. Tiene una forma casi circular, y las principales irregularidades en su forma se deben a la presencia de un Filete en el Oeste y el complejo que se extiende hacia el Este.

Las paredes expuestas del cráter indican que la parte central del volcán está compuesta principalmente por flujos repetitivos de lava, separados por capas de escoria y, posiblemente, depósitos piroclásticos.

Contrastando con el volcán central, en las márgenes distantes es común encontrar depósitos piroclásticos, principalmente a lo largo de la costa Noroeste de la zona. Las rocas piroclásticas incluyen depósitos tobaceos de texturas varias, y se ha interpretado que incluyen flujos piroclásticos, depósitos tipo "base suge", y depósitos de caída (Self et al, 1989; Hradecky, 1988). Hradecky (1988) realizó un análisis muy detallado de las características de estos depósitos, y señaló que predominan los materiales de grano fino. Algunos de los depósitos están cementados en diferentes grados, mientras que otros están relativamente sueltos y relativamente inconsolidados.

Los resultados de los análisis Petrográficos y Petroológicos reportados por Williams (1952), Hradecky (1988) y Self et al. (1989), junto con aquellos realizados durante el desarrollo del Estudio Plan Maestro (2001), indican que en la composición de los productos eruptivos del volcán predominan la andesita y la andesita basáltica. Los análisis químicos realizados a 5 depósitos de la erupción de 1835, reportados por Hradecky (1988) y Williams (1952), muestran una consistente composición andesítica, con contenidos de SiO₂ que van desde 55.4% hasta 60.0%. Williams (1952) examinó varias lavas pre-1835 y encontró que eran basaltos o andesita basáltica con piroxeno y olivino, y basalto o andesita basáltica con dos piroxenos. Las muestras recolectadas para el Estudio Plan Maestro (2001) se interpretaron como andesita con dos piroxenos.

Tabla 6: Resumen de Análisis petrográfico de rocas

Tipo de Roca	Lavas y Rocas Intrusivas																Textura	Textura del Groundmass (Pasta)			
	Fenocristales									Groundmass (Pasta)											
	Qz	K	Pl	Bi	Ho	OI	Cp	Op	Ox	Qz	K	Pl	Bi	Ho	OI	Cp			Op	Ox	V
Andesita con clinopiroxeno			⊕			o	o	Δ			o							Δ	o	Ves, Por	Hial
Andesita con clinopiroxeno			o				Δ	o			o							Δ	o	Ves, Por	Hial
Andesita con dos piroxenos			⊕			o	o	Δ	o		⊕				Δ	o	o			Ves, Por	Ints
Pómez																				Pyr	
Basalto con olivino y piroxeno			⊕			Δ	o	o			⊕				o	o				Por	Intg
Andesita con dos piroxenos			⊕				o	Δ	o		⊕				o	o	o			Por	Ints
Andesita con clinopiroxeno			⊕				o	o			⊕					o				Por	Ints

Minerales		Abundancia		Texturas
Qz = Cuarzo	OI = Olivino	o = Raro		Hial = Hialopilitico
K = Feldespato de potasio	Cp = Clinopiroxeno	Δ = Pocos		Intg = Intergranular
Pl = Plagioclasa	Op = Orthopiroxeno	o = Común		Ints = Intersertal
Bi = Biotita	Ox = Oxidos de hierro opacos	⊕ = Abundante		Ofi = Ofítico
Ho = Hornblenda	V = Vidrio			Pilo = Pilotaxítico
				Por = Porfirico
				Pyr = Piroclástico
				Ves = Vesicular

GeothermEx, Inc. 2001

Tipo de Roca	Rocas Piroclásticas y Sedimentarias																		
	Tipo	Tamaño (mm)	Clastos Mayores									Matriz							
			Qz	K	Pl	Bi	Ho	OI	Cp	Op	Ox	Qz	Si	Fd	Ox	V			
Andesita con clinopiroxeno																			
Andesita con clinopiroxeno																			
Andesita con dos piroxenos																			
Pómez	Lapilli	2 a 20 mm				o													⊕
Pómez	Lapilli	5 a 25 mm				o													⊕
Basalto con olivino y piroxeno																			
Andesita con dos piroxenos																			
Andesita con clinopiroxeno																			

Minerales		Abundancia	
Qz = Cuarzo	OI = Olivino	o = Raro	Fd = Feldespato
K = Feldespato de potasio	Cp = Clinopiroxeno	Δ = Pocos	V = Vidrio
Pl = Plagioclasa	Op = Orthopiroxeno	o = Común	
Bi = Biotita	Ox = Oxidos de hierro opacos	⊕ = Abundante	
Ho = Hornblenda	Si = Minerales de sílice		

GeothermEx, Inc. 2001

Tabla 7: Análisis químico de los productos del volcán

Muestra	WCVA	O110	O111	O112	O113	H1	H2	H3	H4	SCOS3	SCOS9A	SCOS5
SiO ₂	58.84	52.55	56.74	56.07	57.60	56.51	55.36	59.97	58.38	59.00	58.90	57.80
TiO ₂	0.69	0.82	1.04	0.69	1.01	0.80	0.70	0.82	0.76	0.72	0.71	0.70
Al ₂ O ₃	17.76	20.63	16.93	20.14	17.21	17.22	19.78	16.47	17.08	18.50	18.50	19.00
Fe ₂ O ₃	2.05	3.38	4.97	2.19	3.03							
FeO	5.48	5.31	4.68	4.94	6.03							
FeO+Fe ₂ O ₃						7.74	7.72	8.32	7.73	7.16	7.13	7.11
MnO	0.23	0.16	0.23	0.17	0.21	0.16	0.16	0.18	0.17	0.16	0.16	0.15
MgO	2.31	3.31	2.83	2.50	2.45	2.55	2.73	2.66	2.24	2.18	2.20	2.32
CaO	6.82	9.54	6.75	8.14	6.38	7.63	6.68	7.29	7.06	7.56	7.60	8.07
Na ₂ O	3.86	2.83	3.68	3.58	3.93	3.60	7.03	3.58	3.58	3.82	3.88	3.69
K ₂ O	1.18	0.75	1.22	0.89	1.47	1.21	1.22	1.22	1.25	1.30	1.27	1.17
P ₂ O ₅	0.05	0.12	0.19	0.14	0.21	0.11	0.11	0.11	0.10	0.28	0.22	0.21
H ₂ O+	0.26	0.59	0.75	0.55	0.47					0.10	0.10	0.15
H ₂ O-	0.19											
						0.01	0.12	0.01	0.01			
						0.04	1.01	0.04	0.04			
Total	99.72	99.99	100.01	100.00	100.00	97.58(a)	102.62(b)	100.67(c)	98.40	100.78	100.67	100.37

WCVA = Bomba de la erupción de 1835, flanco norte (Williams, 1952)

O110 = Andesita basáltica cumulítica, flanco norte (OLADE, 1981)

O111 = Andesita, flanco norte (OLADE, 1981)

O112 = Andesita cumulítica, flanco norte (OLADE, 1981)

O113 = Andesita, flanco norte (OLADE, 1981)

H1 = Brecha residual co-ignimbítica, 1 km al E del cráter (Hradecky, 1988) (a: reportó total de 97.36%)

H2 = Toba fina de flujo de ceniza, farallones en la costa al O del cráter (Hradecky, 1988) (b: reportó total de 95.12%)

H3 = Toba fina de con lapilli de acreción, flanco sur (Hradecky, 1988) (c: reportó total de 95.43%)

H4 = Brecha residual co-ignimbítica, borde E del cráter (Hradecky, 1988)

SCOS3 = Lava de la erupción de 1835, cima del cono (Self *et al.*, 1989)

SCOS9A = Scoria densa de la erupción de 1835, flanco este (Self *et al.*, 1989)

SCOS5 = Scoria de la erupción de 1835

GeothermEx, Inc. 2000

Hidrología.

Las investigaciones realizadas durante el desarrollo del Estudio del Plan Maestro en el área del NO revelaron los siguientes aspectos importantes sobre la hidrología en la superficie y por debajo de ella:

- El agua superficial es escasa en esta área, aparentemente por la presencia de formaciones rocosas relativamente permeables en la mayor parte de la zona. El cuerpo de agua dulce más grande es La Laguna del Volcán, localizada dentro del cráter central, con un diámetro de aproximadamente 1 km y una elevación de la superficie de unos 170 m.
- Existen muy pocos arroyos permanentes que drenen en los flancos del Volcán. Numerosas quebradas, en casi todo el volcán, permiten el drenaje superficial según patrón aproximadamente radial, aunque la mayoría permanecen secas aun es la estación lluviosa. El drenaje subterráneo presumiblemente se lleva a cabo a través de lavas y/o depósitos piroclásticos que componen el edificio volcánico.

- Principalmente en las zonas donde hay rocas Pre-Cuaternarias expuestas se encuentran descargas importantes de agua superficial, tales como manantiales y arroyos (principalmente en o cerca del Complejo de Colinas del Sudoeste, y en los flancos Este y Nordeste del Complejo que esta hacia el Este del Volcán central), así como en las áreas muy bajas de la parte Sudeste de la zona del NO.

La presencia de varios pozos de agua distribuidos alrededor de las llanuras costeras de la zona del NO indica que existe un acuífero o acuíferos que son bastante extenso(s) en una gran parte del área.

8.8 Composición química de las aguas de zona 2 de estudio.

Muestras Analizadas.

Las muestras analizadas corresponden a diversas fuentes de agua en la zona de interés geotérmico y de diferentes años, cinco (5) muestras son de manantiales (2011-060, M-4, M-9, 100 y 106) y diez (10) son de pozos excavados (2011-080, PE-2, PE-3, PE-4, PE-5, PE-10, PE-13, 101, 103 y 105).

Tabla 8: Análisis químico de las muestras de agua.

Muestra	Ph	E. Cond	T°	Na	K	Ca	Mg	Cl	SO4	HCO3	B	SiO2	BI
2011-060	6.98	5210	38.8	793.7	0.01	134.41	78.12	1299.7	319	298.9	2.72	89.5	-0.42
2011-080	6.91	173	28.7	14.25	2.39	9.75	6.74	4.74	7.08	84.18	0.05	105.5	1.89
M-4	7.18	5140	41	720	63	280	70	1216.4	453.1	277.6	4.67	147.94	4.44
M-9	7.16	4550	40	728	42	135	55	1102.4	363	318.5	3.03	77.18	0.29
PE-2	7.13	1350	41	341	26	100	18	574	81.7	97.4	1.73	142.07	5.51
PE-3	7.19	10600	45	1630	121	42	70	3079.1	369.9	182.4	8.66	152.26	-8.61
PE-4	7.18	2080	38	202	27	150	40	239.5	367.6	250.4	1.3	127.36	4.58
PE-5	7.29	430	30	23	11	44	10	15.2	32.4	142.2	0.3	110.41	10.52
PE-10	7.24	910	31	64	8	116	22	100.7	199.6	155.7	0.74	79.69	5.21
PE-13	7.22	360	30	28	10	88	12	32.3	242	103.8	0.39	66.28	-5.47
100	7.24	321	32	19	5	24	9.5	15	52	121	0.35	129	-8.57
101	7.27	584	33	29	8	73	15	27	80	191	0.43	119	6.64
103	6.69	794	32	48	11	83	21.5	32	145	231	0.35	102	3.63
105	7.19	9410	40	1510	159	420	82.5	3050	370	180	7.1	150	0.55
106	7.25	19790	50	3400	265	890	185	6844	501	169	12.12	145	2.05

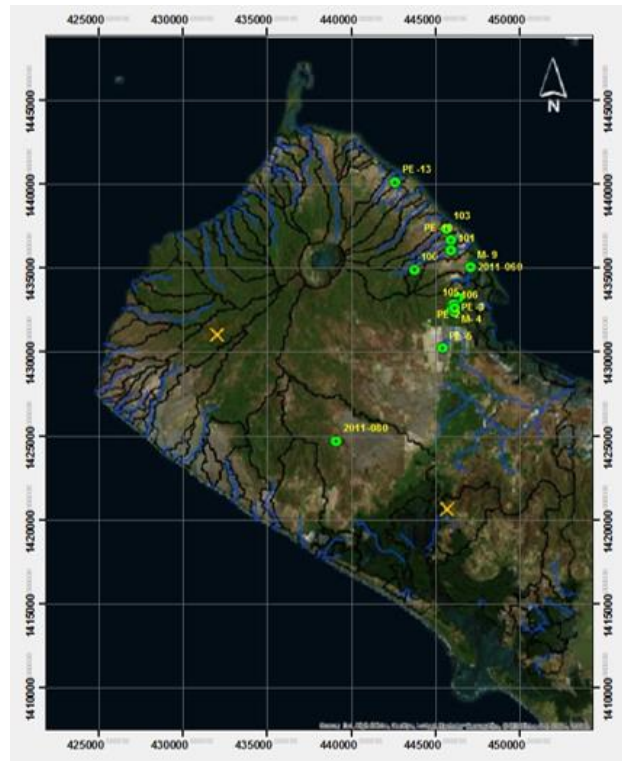


Figura 16: Mapa de las muestras zona 2 de estudio

8.9 Clasificación de aguas de zona 2 de estudio.

El total de muestras analizadas es quince (15). A continuación, se presenta la clasificación de las aguas de acuerdo al Diagrama de PIPER y los diagramas ternarios de cationes y aniones.

Se observa que las mayorías de las aguas están dentro de la clasificación de Cloruradas-Sódicas, las cuales son típicas de fluidos geotérmicos profundos en sistemas de alta temperatura (2011-060, M-4, M-9, PE-2, PE-3, 105, 106). Áreas con una mayor concentración identifican zonas permeables dentro del campo. Fluidos clorurados se descargan habitualmente en las aguas termales con buen flujo. Son las únicas aguas de fuentes termales que pueden usarse con confianza en la geotermometría.

Se observan dos muestras Sulfatadas-Cálcicas, estas aguas son de origen superficial en la mayoría de los sistemas geotérmicos, el carácter químico de esta agua es producido por reacciones con gases que ascienden (PE-10 y PE-13).

También se observan dos muestras Bicarbonatadas-Sódicas-Cálcicas-Magnésicas (2011-080 y PE-5), las aguas Bicarbonatadas se originan ya sea con la disolución de los gases CO_2 o por la condensación de vapor geotérmico en aguas relativamente profundas y libres de oxígeno.

Las aguas Sodio-Bicarbonatadas se encuentran generalmente en la “zona de condensación” de sistemas vapor-dominantes y en las partes marginales de sistemas líquido-dominantes.

Sin embargo, las aguas sodio-bicarbonato están también presentes en yacimientos geotérmicos profundos en rocas metamórficas y/o sedimentarias, por ejemplo en Kizildere, Turquía (Guidi et al, 1990a). En este caso, son aguas eminentemente superficiales.

El diagrama triangular SO₄-HCO₃-Cl, indica muestras que posiblemente tengan mezclas geotérmicas, localizadas en la zona de Cl: 2011-060, M-4, M-9, PE-2, PE-3, 105, y 106, las sulfatadas son, PE-10 y PE-13, las bicarbonatadas son 2011-080 y PE-5, y de mezcla PE-4, 100, 101 y 103.

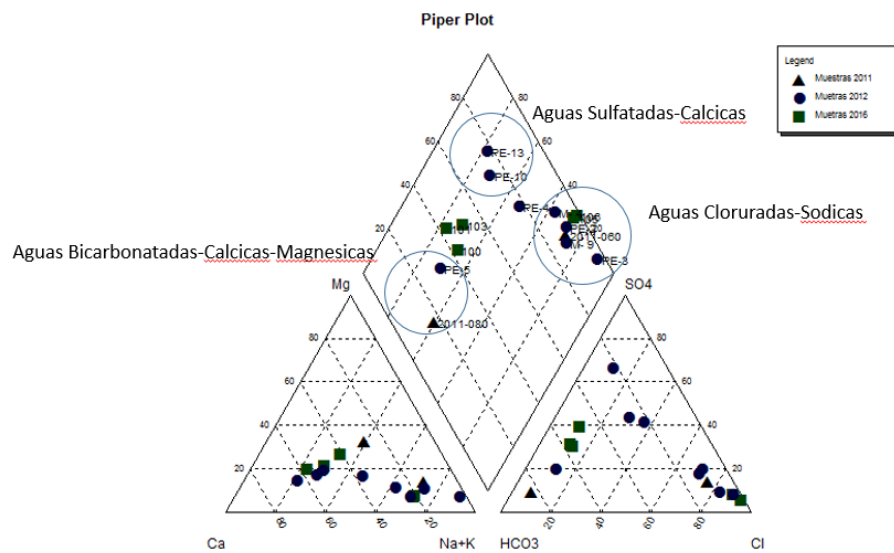


Figura 17: Diagrama Piper Hill Langelier zona 2 de estudio.

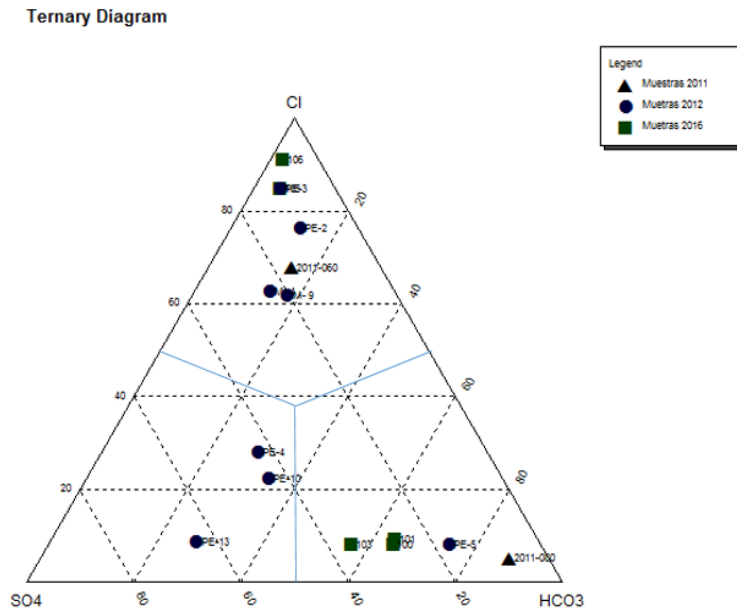


Figura 18: Diagrama CL-SO4-HCO3 zona 2 de estudio

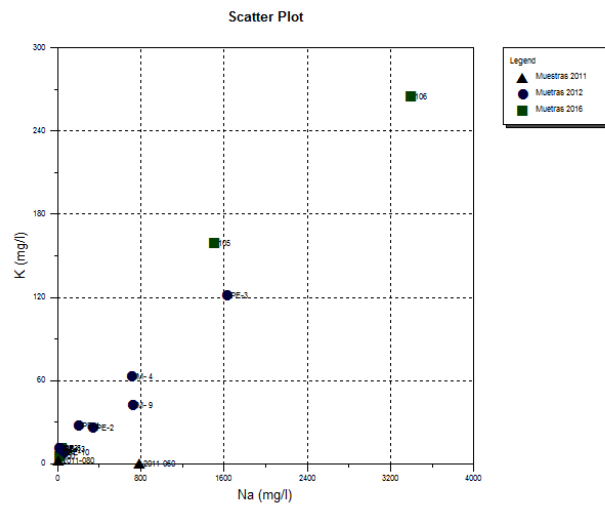


Figura 19: Diagrama K-Na zona 2 de estudio.

La linealidad presente en el grafico Na-K indica que las muestras provienen del mismo reservorio geotermico.

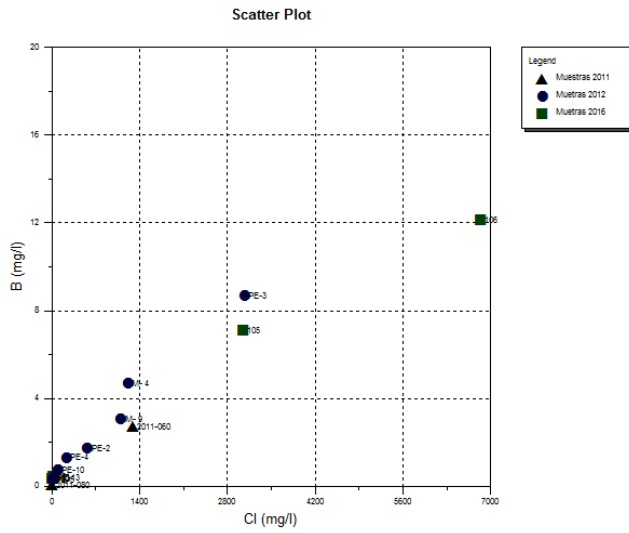


Figura 20: Diagrama Cl-B zona 2 de estudio.

El grafico Cl-B tambien indica que las muestras estan alineadas debido a una mezcla con un posible reservorio geotermico

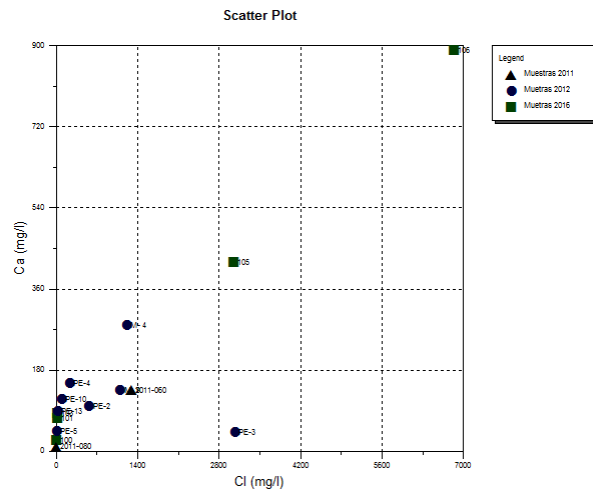


Figura 21: Diagrama Ca-Cl zona 2 de estudio

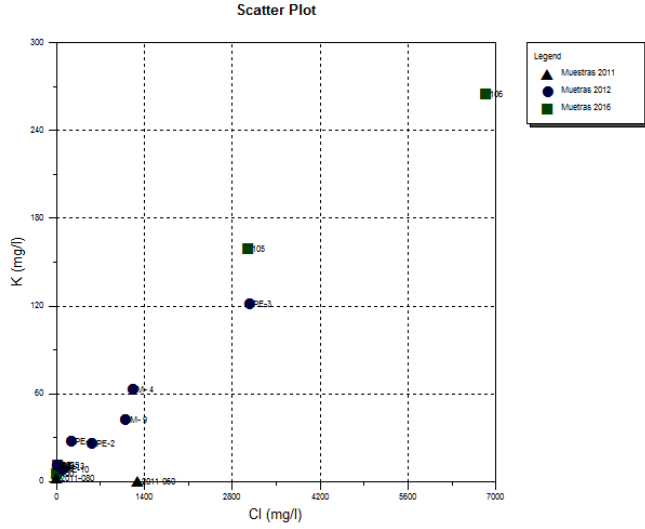
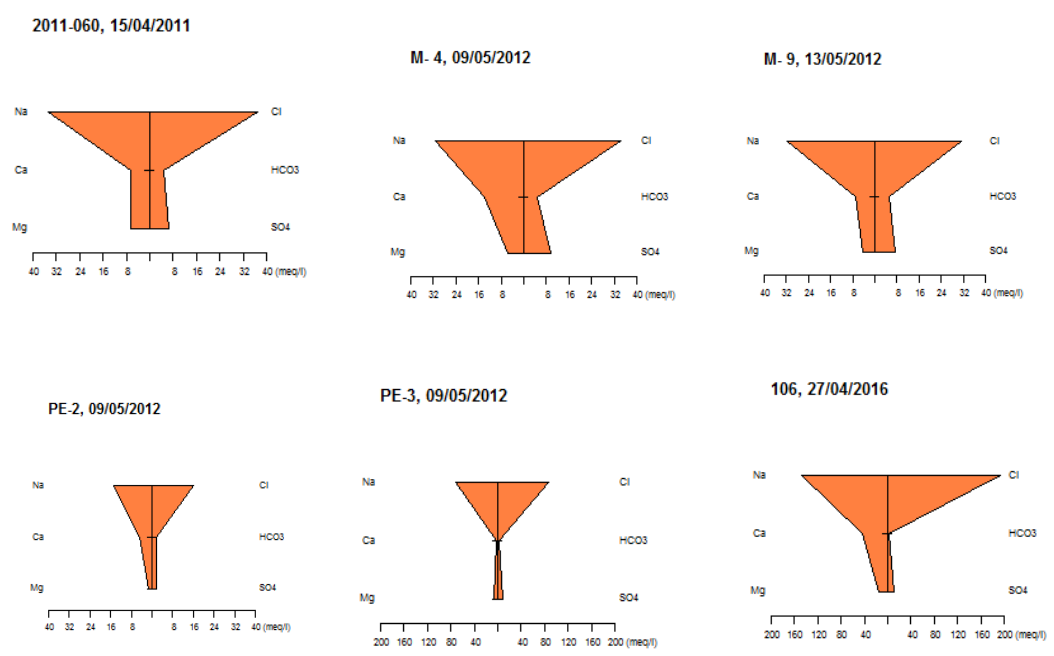


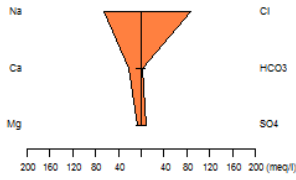
Figura 22: Diagrama K-Cl zona 2 de estudio.

Gráficos K-Cl; Cl-Ca indican una linealidad debido posiblemente a una mezcla con agua geotérmica. A continuación se presentan diagramas de stiff de muestras representativas incluidas superficiales.

Según los diagramas de stiff graficados. Las muestras 2011-060, M-4, M-9, PE-2, PE-3, 106, 105 son cloruradas sódicas.

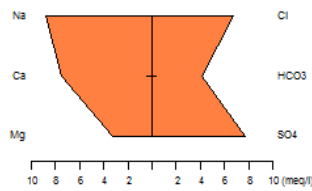


105, 27/04/2016

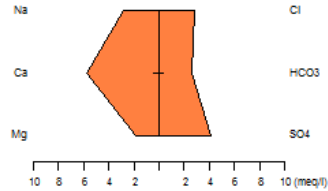


Las muestras PE-4, PE-10 y PE-13 son del tipo sulfatadas sódicas y cálcicas.

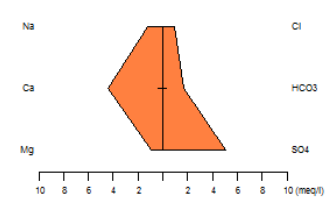
PE-4, 10/05/2012



PE-10, 13/05/2012

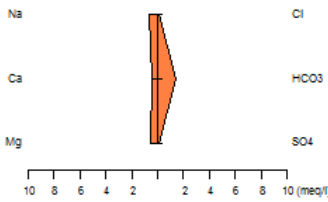


PE-13, 14/05/2012

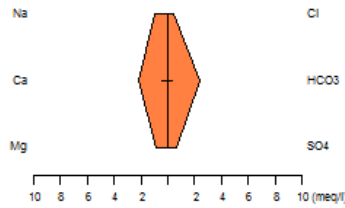


Las muestras 2011-080, PE-5, 100, 101, 103 se clasifican como bicarbonatadas cálcicas.

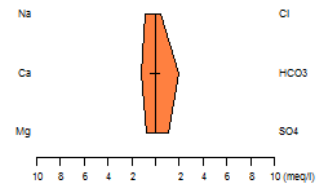
2011-080, 18/04/2011



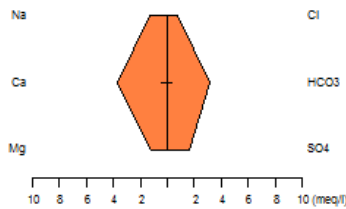
PE-5, 10/05/2012



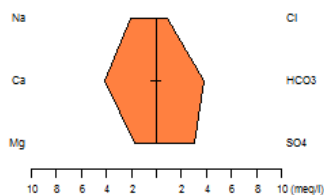
100, 27/04/2016



101, 27/04/2016



103, 27/04/2016



8.10 Cálculos de geotermómetros de zona 2 de estudio.

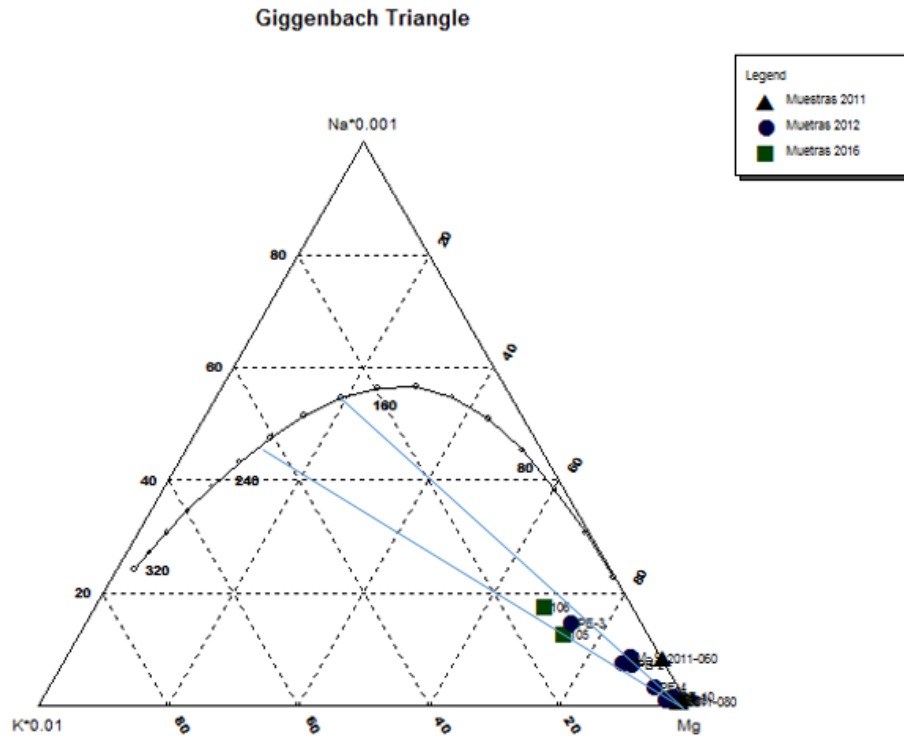


Figura 23: Diagrama Giggenbach Na-K-Mg zona 2 de estudio

Por medio del Diagrama de Giggenbach podemos establecer un rango de temperatura de reservorio entre 180°C-230°C.

En las tablas 9 y 10 se muestra el cálculo de los geotermómetros de sílice y catiónicos. Con el geotermómetro de sílice se observa un rango de temperatura entre 110°C-170°C y con el geotermómetro de Na-K se observa un rango de temperatura entre 150°C-250°C. Estos valores se determinan con la ayuda de ecuaciones para determinar temperaturas con la concentración de sílice y concentración de los cationes Na-K:

Tabla 9: Geotermómetros de Sílice Zona 2 de estudio

Muestra	Fecha	Ph	Tmx	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	B	F77Qz	F77Qsl	FP82Qz	Ar85Qz	F77Calce	Ar83cal	F77acri	F77opal	F77Silice amorfa
2011-080	18/04/2011	6.91	28.7	6.74	4.74	70.08	84.18	0.05	140.21	135.25	140.37	136.59	113.84	112.06	89.6	40.91	19.63
M-4	09/05/2012	7.18	41	70	1216.4	453.1	277.6	4.67	160.31	152	160.62	153.78	136.39	132.7	110	60.62	37.93
M-9	13/05/2012	7.16	40	55	1102.4	363	318.5	3.03	123.22	120.9	123.42	121.69	95.09	94.76	72.57	24.66	4.53
PE-2	09/05/2012	7.13	41	18	574	81.7	97.4	1.73	157.8	149.92	158.08	151.65	133.55	130.11	107.44	58.13	35.67
PE-3	09/05/2012	7.19	45	70	3079.1	369.9	182.4	8.66	162.11	153.49	162.45	155.3	138.43	134.56	111.85	62.42	39.59
PE-10	13/05/2012	7.24	31	22	100.7	199.6	155.7	0.74	124.89	122.32	125.08	123.17	96.93	96.46	74.24	26.24	6.01
PE-13	14/05/2012	7.22	30	12	32.3	242	103.8	0.39	115.44	114.26	115.7	114.7	86.61	86.88	64.85	17.33	-2.27
105	27/04/2016	7.19	40	82.5	3050	370	180	7.1	161.17	152.71	161.50	154.51	137.37	133.59	110.59	61.48	38.72
106	27/04/2016	7.25	50	185	6844	501	169	12.12	159.06	150.97	159.36	152.72	134.98	131.41	108.73	59.38	36.77

Tabla 10: Geotermómetros de Cationes zona 2 de estudio.

Muestra	Fecha	ph	Tmx	Mg	Cl	SO ₄	HCO ₃	B	TR76NaK	TON80NaK	Ar83NaK	Ar83NaK(250-350)	F79NaK	NN87NaK	GG88NaK
M-4	09/05/2012	7.18	41	70	1216.4	453.1	277.6	4.67	173.64	180.06	181.75	205.27	205.8	192.83	221.87
M-9	13/05/2012	7.16	40	55	1102.4	363	318.5	3.03	135.08	139.45	144.88	175.81	173.97	161.72	191.91
PE-2	09/05/2012	7.13	41	18	574	81.7	97.4	1.73	160.11	165.78	168.87	195.12	194.79	182.07	211.55
PE-3	09/05/2012	7.19	45	70	3079.1	369.9	182.4	8.66	157.58	163.11	166.45	193.19	192.7	180.3	209.59
PE-10	13/05/2012	7.24	31	22	100.7	199.6	155.7	0.74	212.96	221.77	218.92	233.75	236.89	223.25	250.77
105	27/04/2016	7.19	40	82.5	3050	370	180	7.1	193.22	200.8	200.31	219.64	221.45	208.14	236.46
106	27/04/2016	7.25	50	185	6844	501	169	12.12	162.22	168	170.87	196.71	196.51	183.75	213.16

De acuerdo a los resultados en las tablas de los geotermómetros, las muestras que nos dan los valores más confiables son las que presentan mayor cantidad de cloruros que nos indica que son aguas de origen profundo por lo tanto son las muestras: M-4, M-9, PE-2, PE-3, 105 y 106.

8.11 Modelo conceptual geoquímico preliminar zona 2 de estudio.

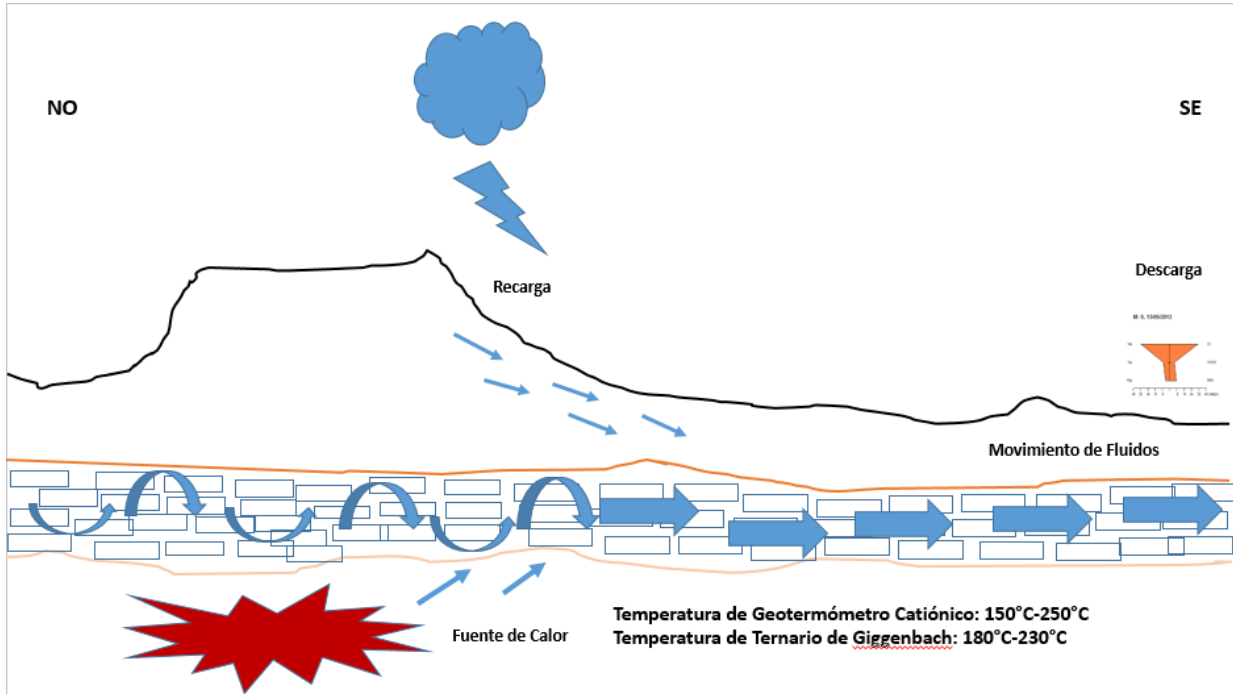


Figura 24: Modelo conceptual geoquímico preliminar zona 2 de estudio

9. Presentación de resultados.

Zona 1 de estudio:

- El área de estudio tiene una extensión aproximada de 72 km² y se encuentra en la zona central de Nicaragua. De acuerdo al reconocimiento geológico realizado en el área de estudio. El basamento en el área de estudio es de edad Terciaria que consiste en ignimbritas, rocas piroclásticas y basalto - andesita
- De acuerdo a la caracterización geoquímica de las muestras, se tienen en el sistema geotérmico aguas de tipo cloruradas cálcicas, sulfatos sódicas y bicarbonatadas, así como mezclas de ellas.
- El grafico de Giggenbach Na-K-Mg nos dice que las aguas son inmaduras y se estimó un rango de temperatura de 120-140°C evaluado por el geotermómetro de giggenbach y el de sílice, no se tomó como referencia el geotermómetro de cationes ya que presento resultados bastantes dispersos, posiblemente afectados por reacciones de intercambio iónico con minerales arcillosos.

Zona 2 de estudio.

- Las temperaturas estimadas por geotermómetros: de Sílice entre 110°C-170°C y catiónicos entre 150°C-250°C
- Existe linealidad entre algunas especies químicas indicando que las muestras provienen del mismo reservorio (diagrama binario Na-K) y que hay mezcla con fluidos de un posible reservorio geotérmico (diagramas binarios K-Cl, Cl-B, Cl-Ca).
- La fuente calor se ubica por debajo del volcán en estudio.
- La recarga se infiere, porque no se cuenta con análisis de isotopos, está en la parte más elevada de la zona que es el volcán en estudio.
- La descarga se encuentra hacia el SE del volcán en estudio determinada, porque allí es donde están las muestras cloruradas.

10. Conclusiones y recomendaciones.

Zona 1 de estudio.

- De acuerdo a las temperaturas estimadas en el reservorio, el sistema geotérmico es de baja-media entalpia.
- Para el modelo conceptual geoquímico presentado se propuso que la fuente de calor está asociada a un intrusivo en la caldera del volcán Las Lajas, pero se recomienda desarrollar estudios volcanológicos para identificar la fuente de calor que estaría provocando las anomalías termales.
- Se podría recolectar muestras de aguas para realizar análisis de isotopo y así conocer el origen de las aguas y recargas del sistema.

Zona 2 de estudio.

- En base a los resultados obtenidos por los geotermómetros, se podría categorizar la zona de estudio de media-alta entalpia.
- La información obtenida para la elaboración del modelo conceptual permitió tener una idea esquemática de la posible interacción de los fluidos con diferentes fuentes de origen superficial, también estimaciones de temperatura asociadas al reservorio geotérmico
- Los Diagramas de Piper; Triangulares y Binarios nos muestran una caracterización de las aguas donde se puede apreciar los diferentes componentes químicos en base a sus concentraciones y las interacciones que han sufrido entre agua roca, el ascenso de los fluidos por medio de fallas, procesos de mezcla con aguas superficiales y la procedencia de los fluidos.
- Con el fin de completar la información actual es importante ubicar posibles emanaciones de vapor para su posterior muestreo y análisis y así obtener datos de los gases presentes en el sistema.
- Para conocer el origen de estas aguas y la recarga del sistema es necesario conocer las concentraciones de isotopos estables de la zona.

11. Agradecimientos

- A la GIZ cooperación alemana por brindarme su apoyo para cursar este diplomado.
- A nuestros compañeros del diplomado por su apoyo brindado.
- A las instituciones LaGeo, Universidad de El Salvador, NDF, ICEIDA y UNU-GTP por darme la oportunidad de participar en el diplomado.
- A nuestro tutor Ing. Antonio Matus por su supervisión.
- A nuestros empleadores, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) y ENEL por la oportunidad de asistir y culminar este diplomado.

12. Referencias bibliográficas.

- Pacheco Acosta Manuel y Viera Revelo Lorena. Octubre 2015. Metodología geoquímica aplicada a fluidos geotermiales.
- Reyes Claudia. 2013. Geoquímica preliminar de los prospectos geotérmicos de San Francisco Libre y Santa Bárbara, Nicaragua.
- Matus A. October 2009. Geochemical Exploration in Chinameca Geothermal Field, El Salvador.
- Dirección de Geotermia del Ministerio de Energía y Minas, Reconocimiento Geológico de Área de Teustepe. Junio 2012. Reporte no publicado del Ministerio de Energía y Minas.
- Delgado Marcos. 2014. Hidrogeoquímica preliminar de cerro Juan Sapo, Nicaragua.
- Farfán Meza José, Cruz Poma Cesar y López Morales Noel. 2015. Integración de datos geológicos y geoquímicos de un área geotermal, caso de estudio Colca-Perú.
- Palacios Aráuz Joela. 2016. Evaluación geoquímica y ambiental de una zona de interés geotérmico (sin explotar) en el Nor-Occidente de Nicaragua.
- GEOQUÍMICA APLICADA A LA GEOTERMIA. Modelo conceptual geoquímico. Presenta: Antonio Matus
- Análisis Metodológico de las Técnicas Geoquímicas Empleadas en la Prospección Geotérmica. Geotermómetros V1-V2