

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE OCCIDENTE  
DIVISIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL**



**USAC**  
**TRICENTENARIA**  
Universidad de San Carlos de Guatemala

**DETERMINACIÓN DE LA POTENCIALIDAD ENERGÉTICA, POR MEDIO DE  
GEOTERMÓMETROS EN AGUAS TERMALES DEL CENTRO TURÍSTICO  
LOMAS DE TARRAGONA DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN**

Presentado a las autoridades de la División de Ciencias y Tecnología del Centro  
Universitario de Occidente de la Universidad de San Carlos de Guatemala

**POR:**

**ANGHELY MARIELA DE LEÓN ARCHILA**

Previo a conferírsele el título de:

**INGENIERA EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL**

En el grado académico de:

**LICENCIADA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE OCCIDENTE  
DIVISIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL**

**AUTORIDADES:**

Rector Magnífico: Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos

Secretario General: Arq. Carlos Enrique Valladares Cerezo

**CONSEJO DIRECTIVO:**

Directora General y Presidente del CUNOC: M.Sc. María del Rosario Paz Cabrera

Secretaria Administrativa: M.Sc. Silvia del Carmen Recinos

**REPRESENTANTE DE LOS DOCENTES**

Ing. Mec. M.Sc. Erick González

Lic. Fredy Alejandro Rodríguez

**REPRESENTANTE DE LOS ESTUDIANTES**

Br. Luis Ángel Estrada García

Br. Julia Hernández de Domínguez

**REPRESENTANTE DE EGRESADOS**

Licda. Vilma Tatiana Cabrera Sánchez

**DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

Lic. Q.F. Aroldo Roberto Méndez Sánchez

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERIA EN GESTIÓN  
AMBIENTAL LOCAL**

Ing. Agr. Julio López Valdéz

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA  
CENTRO UNIVERSITARIO DE OCCIDENTE  
DIVISIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL**

**TIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN TÉCNICO PROFESIONAL**

**PRESIDENTE:**

Lic. Q.F. Aroldo Roberto Méndez Sánchez

**EXAMINADORES:**

PhD. Dagoberto Bautista  
Ing. Agr. Julio López Valdéz  
Lic. Q.B. M.Sc. Alberto García

**SECRETARIO**

Ing. Agr. M.Sc. Imer Vinicio Vásquez Velásquez

**DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA**

Lic. Q.F. Aroldo Roberto Méndez Sánchez

**COORDINADOR DE LA CARRERA DE INGENIERÍA EN GESTIÓN  
AMBIENTAL LOCAL**

Ing. Agr. Julio López Valdéz

Nota: “Únicamente el autor es responsable de las doctrinas y opiniones sustentadas en el presente trabajo de graduación”. (Artículo 31 del reglamento para Exámenes Técnicos Profesionales del Centro Universitario de Occidente y Artículo 13 de la ley orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala).

Quetzaltenango 10 de octubre de 2019

Aroldo Roberto Méndez Sánchez  
Licenciado Químico Farmacéutico  
Director de la División de Ciencia y Tecnología  
Centro Universitario de Occidente

Respetable Licenciado:

Me dirijo a usted para informarle que he cumplido con mi calidad de ASESOR del trabajo de graduación de la estudiante **ANGHELY MARIELA DE LEÓN ARCHILA**, quien elaboro el trabajo de investigación titulado:

**DETERMINACIÓN DE LA POTENCIALIDAD ENERGÉTICA, POR MEDIO DE  
GEOTERMÓMETROS EN AGUAS TERMALES DEL CENTRO TURÍSTICO  
LOMAS DE TARRAGONA DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO.**

Al respecto, manifiesto que dicho trabajo de investigación ha sido concluido satisfactoriamente, y considero que el mismo cumple con los requisitos establecidos por la carrera de Ingeniería en Gestión Ambiental Local del Centro Universitario de Occidente, por lo que recomiendo su publicación.

Atentamente.



Ing. Mec. M.Sc. Erick González  
ASESOR

**"ID Y ENSEÑAD A TODOS"**

Quetzaltenango, 10 de octubre de 2019

Q.F. Aroldo Roberto Méndez Sánchez  
Director de la División de Ciencia y Tecnología  
Centro Universitario de Occidente  
Presente.

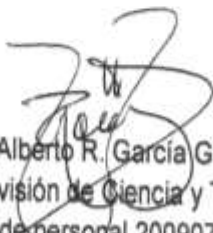
Respetable Licenciado:

Por este medio me permito informarle que he concluido la revisión de la Investigación del Estudiante Anghely Mariela de León Archila, carné No. 2279 28849 0701 registro No. 201230865, titulada "Determinación de la potencialidad energética, por medio de geotermómetros, en las aguas del Centro Turístico Lomas de Tarragona, del Municipio de Quetzaltenango", la que realice de acuerdo al nombramiento respectivo.

En tal sentido emito DICTAMEN FAVORABLE, para que se continúen los pasos administrativos, previos a la aprobación definitiva de dicho trabajo de investigación, indicando que se siguió con diligencia todos los aspectos que correspondían.

Sin otro particular me suscribo de usted con las muestras de mi consideración y respeto.

Atentamente,



MSc. Q.B. Alberto R. García Guillén  
Docente de la División de Ciencia y Tecnología  
Registro de personal 20090771  
Colegiado 2,487

cc archivo

Honorable Consejo Directivo  
Honorable Autoridades de la División de Ciencia y Tecnología  
Honorable Mesa de acto de Graduación y Juramentación

Honorables Miembros:

De conformidad con las normas que establece la ley orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, del Reglamento General de Evaluación y Promoción del Estudiante de la Universidad de San Carlos de Guatemala y del Normativo de Evaluación y Promoción del Estudiante del Centro Universitario de Occidente; tengo el honor de someterme a vuestra consideración el trabajo de graduación titulado:

**DETERMINACIÓN DE LA POTENCIALIDAD ENERGÉTICA, POR MEDIO DE  
GEOTERMÓMETROS EN AGUAS TERMALES DEL CENTRO TURÍSTICO  
LOMAS DE TARRAGONA DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO.**

Como requisito para optar al título de Ingeniera en Gestión Ambiental Local en el grado académico de Licenciada en Ciencias Ambientales.

Esperando que el mismo tenga su aprobación, quedo de antemano con ustedes muy agradecida.

Atentamente,

  
Anghely Mariela de León Archila



**CENTRO UNIVERSITARIO DE OCCIDENTE  
DIVISIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGIA**

El infrascrito **DIRECTOR DE LA DIVISIÓN DE CIENCIA Y TECNOLOGIA** \_\_\_\_\_  
Del Centro Universitario de Occidente ha tenido a la vista la **CERTIFICACIÓN DEL ACTA DE GRADUACIÓN** No. 007-GAL-2019 de fecha once de octubre del año dos mil diecinueve del (la) estudiante: ANGHELY MARIELA DE LEÓN ARCHILA con Carné No. 2279288490701 Registro Académico No. 201230865 emitida por el Coordinador de la Carrera de GESTIÓN AMBIENTAL LOCAL, por lo que se **AUTORIZA LA IMPRESIÓN DEL TRABAJO DE GRADUACIÓN** titulado: " DETERMINACIÓN DE LA POTENCIALIDAD ENERGÉTICA, POR MEDIO DE GEOTERMOMÉTROS EN AGUAS TERMALES DEL CENTRO TURÍSTICO LOMAS DE TARRAGONA DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO ."

Quetzaltenango, 11 de octubre de 2019.

"ID Y ENSEÑAD A TODOS"

Q.F. Aroldo Roberto Méndez Sánchez  
Director de División de Ciencia y Tecnología

## **ACTO QUE DEDICO**

**A MIS PADRES:** Mario Felipe de León Mogollón y Glenda Marleny Archila por apoyarme a lo largo de mi vida académica y saber guiarme con sabiduría, amor y paciencia, por darme la confianza y fuerza para alcanzar mis metas.

**A MIS HERMANOS:** Por todos su aprecio, paciencia y comprensión.

**A MI CÓNYUGUE:** Por su amor y apoyo incondicional en todo momento.

**A MI HIJO:** Antoine por enseñarme el amor verdadero.

**A MI FAMILIA:** Por su paciencia y aprecio.



## **AGRADECIMIENTOS**

**A MIS PADRES:** Mario Felipe de León Mogollón y Glenda Marleny Archila, por todo el esfuerzo y empeño que pusieron para poder brindarme la mejor educación que les fue posible, por su amor, compañía y comprensión en todo momento.

**A MIS HERMANOS:** Mario de León, María de León y Máriory de León, por todo su cariño y apoyo moral incondicional.

**A MI FAMILIA:** Abuela Ester Archila, tíos, tías y primos, por su apoyo y compañía.

**A MÍ CONYUGUE:** Erick Mauricio González Arreaga, por su amor, comprensión y apoyo en esta etapa tan importante de vida, por ayudarme a culminar una de mis metas y por creer en mí.

**A FLOR ARREAGA DE GONZÁLEZ:** Por su apoyo incondicional durante este proceso tan importante, por el cariño y por la confianza que me ha brindado.

**A LA FAMILIA GONZALEZ ARREAGA:** Erick Mauricio González, Flor de González, Mario González, Alan González, Erick González, por su apoyo, cariño y compañía en todo momento.

**A MI ASESOR:** Erick Mauricio González de León, por su tiempo, paciencia, y por el fortalecimiento de conocimientos en el desarrollo de la investigación, por su cariño y compañía.

**A MIS DOCENTES:** Por compartir sus conocimientos y paciencia durante el proceso de mi desarrollo académico.

**A MIS AMIGOS:** por ser un apoyo incondicional, por las aventuras y los buenos momentos vividos.

**DETERMINACIÓN DE LA POTENCIALIDAD ENERGÉTICA, POR MEDIO DE  
GEOTERMÓMETROS EN AGUAS TERMALES DEL CENTRO TURÍSTICO  
LOMAS DE TARRAGONA DEL MUNICIPIO DE QUETZALTENANGO.**

## **RESUMEN**

La presente investigación se realizó con la finalidad de conocer la potencialidad energética que poseen las aguas termales del Centro Turístico Lomas de Tarragona, el cual se encuentra ubicado en Puerta del Llano, Cantón Candelaria, municipio de Quetzaltenango. El trabajo se enfocó en la realización de análisis físicos y químicos del agua en mención para poder determinar a través de geotermómetros catiónicos utilizando Si, Na, K, Mg, utilización de gráficas para determinar la procedencia de las aguas del fondo del reservorio, y la temperatura.

Se realizaron estudios geofísicos a través de la utilización de electrodos que permitieron conocer la profundidad que poseen los reservorios de agua y la infiltración de la misma.

Cada uno de estos estudios fue necesario para poder determinar que el agua termal que posee el Centro Turístico puede ser utilizada con fines turísticos como baños termales y/o medicinales, deshidratación de alimentos, secado de madera, también puede ser utilizada industrialmente para la generación de energía eléctrica, sin embargo, es necesario realizar estudios complementarios antes de la realización de una campaña de perforación.

Palabras clave: geotermia, energía, aguas termales, geotermómetros.

## **ABSTRACT**

This research was carried out with the purpose of knowing the energy potential of Tourist Center Lomas de Tarragona Hot Springs, which is located in Puerta del Llano Canton Candelaria, Township of Quetzaltenango, the work has focused on the physical and chemical analyzes in the water, to be able to determine through cationic geothermometers using Si, Na, K, Mg graphs to find the origins of waters in the bottom of the reservoir as also the temperature.

Geophysical studies were carried out through the use of electrodes that allowed us to know the depth of water reservoirs and their infiltration.

Each of these studies were necessary to be able to determine that the thermal water from Lomas de Tarragonas has can be use for tourist purposes such as thermal and or medicinal baths, food desydration, wood drying can also be used industrially for electrical generation, however it is necessary to carry out complementary studies before conducting a drilling campaign.

Keywords: geothermal energy, hot springs, geothermometers.

## Índice

CAPITULO I: .....	20
1. Introducción.....	20
1.1 Antecedentes.....	21
1.2 Planteamiento del problema de investigación. ....	23
1.3 Justificación del estudio .....	23
1.4 Hipótesis de investigación.....	25
1.4.1. Hipótesis nula y alternativa. ....	25
a. Hipótesis nula .....	25
b. Hipótesis alternativa .....	25
1.5 Objetivos del estudio .....	26
A. General.....	26
B. Específicos .....	26
CAPITULO II: Marco teórico.....	27
2.1 Geotermia .....	27
2.2 Origen del recurso geotérmico .....	27
2.3 Sistemas geotérmicos .....	30
a. Fuente de calor: .....	30
b. Reservorio geotérmico: .....	30
c. Sistema de suministro de agua o zona de recarga .....	30
d. Capa sello: .....	30
e. Fluido geotérmico:.....	30
2.4 Clasificación de las aguas geotérmicas .....	32
a. Aguas cloruro sódicas (pH neutro).....	32
b. Aguas ácidas sulfatadas .....	33
c. Aguas Sulfato Ácidas Cloruradas .....	33

d. Aguas Bicarbonatadas Sódicas.....	34
2.5 Diagramas de clasificación de aguas geotérmicas.....	34
a. Diagrama de Piper-Hill-Langelier .....	34
2.5.1 Diagramas triangulares .....	35
a. Diagrama Na-K-Mg.....	35
2.6 Geotermómetros .....	35
a. Geotermómetros acuosos.....	35
b. Geotermómetros catiónicos .....	36
c. Geotermómetro sílice.....	36
d. Análisis para líquidos .....	36
e. Geotermómetro de gases.....	37
f. Análisis de gases .....	37
2.7 Análisis geofísicos.....	38
2.8 Energía geotérmica y otras energías renovables .....	39
a. Energía solar .....	40
b. Energía eólica .....	40
c. Energía mareomotriz .....	40
d. Energía hidráulica.....	40
e. Biomasa .....	40
f. Energía geotérmica.....	40
g. Comparación económica de las energías renovables .....	41
h. Comparación económica de la energía utilizada en Guatemala.....	41
CAPITULO III: Marco Metodológico .....	42
3.1 Método de Investigación .....	42
3.2 Contexto Espacial y Temporal de la Investigación .....	42

3.3. Variables de la investigación:.....	42
3.3.1. Variables dependientes .....	42
3.3.2. Variables independientes.....	42
3.3.3. Definición conceptual, operativa e instrumental de cada una. ....	42
3.3.3.1. Variables dependientes .....	42
a. Composición química del agua.....	42
b. Temperatura de agua .....	43
c. Conductividad eléctrica .....	43
d. Potencial de hidrogeno (pH) en el agua.....	43
3.3.3.2. Variables independientes.....	43
• Temperatura del fondo .....	43
3.4. Sujetos: .....	44
3.4.1. Población .....	44
3.5. Fuentes de información. ....	44
3.5.1. Primarias.....	44
3.5.2 Secundarias.....	44
3.6. Técnicas e instrumentos utilizados en la recopilación de los datos.....	44
3.7. Pasos del trabajo de campo.....	45
3.9. Técnicas de análisis de los datos. ....	45
CAPITULO IV: Análisis e interpretación de resultados .....	46
4.1 Análisis de los datos .....	46
4.2 Estación de monitoreo .....	46
4.3 Método de muestreo .....	46
4.4 Resultados de geotermómetro en agua termal.....	48
4.5 Clasificación de las aguas geotérmicas .....	50

a. Diagrama de Piper-Hill-Langelier .....	50
b. Diagrama Triangular Giggenbach (Na-K-Mg).....	52
c. Diagrama Triangular Cl-SO <sub>4</sub> -HCO <sub>3</sub> .....	53
4.5.1. Geotermómetros acuosos.....	53
4.5.2 Geotermómetros catiónicos .....	53
a. Relación Na/K .....	54
b. Relación K <sup>2</sup> / Mg .....	55
c. Geotermómetro de sílice:.....	55
4.6 Estudios geofísicos .....	58
• Origen geológico:.....	58
4.7. Discusión de los resultados .....	60
CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones .....	62
5.1 Conclusiones.....	62
5.2 Recomendaciones .....	62
CAPITULO VI: .....	63
6.1 Propuesta .....	63
VII: Bibliografía .....	64
VIII.: Anexos .....	66
8.1. Instrumentos .....	66
8.1.1 Ficha Técnica de la Toma de Muestra de Agua .....	66
8.1.2 Ecuaciones empíricas de Geotermómetros acuosos .....	66
a. Ecuaciones para geotermómetros de Na/K.....	66
b. Ecuaciones para geotermómetros de K <sup>2</sup> / Mg .....	67
c. Ecuaciones para geotermómetros de SiO <sub>2</sub> .....	67
8.1.3 Ecuaciones empíricas de Geotermómetros de Gases.....	67



8.2 Anexos fotográficos.....	68
8.3 Cronograma .....	69
8.4 Presupuesto.....	70

## Índice de figuras

Figura 1: Mapa de manifestaciones geotérmicas en Guatemala .....	29
Figura 2: Ejemplo de la tabla de ingreso de datos que sirven de base para la hoja de cálculo Excel propuesta por .....	37
Figura 3:.....	38
Figura 4: Comparación económica de energías renovables .....	41
Figura 5: Comparación económica de la energía utilizada en Guatemala .....	41
Figura 7: Localización de las aguas de Lomas de Tarragona dentro del Diagrama de Piper Hill Lagelier.....	51
Figura 8: Localización de las aguas de Lomas de Tarragona dentro del Diagrama Triangular Giggenbach (Na-K-Mg) .....	52
Figura 9 Localización de las aguas de Lomas de Tarragona dentro del Diagrama Triangular Cl-SO4-HCO3 .....	53
Figura 10. Estructura de suelo en transformación de señales sísmicas .....	58
Figura 11. Aguas magmáticas .....	58
Figura 12. Profundidad de las aguas.....	59
Figura 13. Infiltración de agua en el suelo .....	59

## Índice de tablas

Tabla 1. Temperaturas de fluidos geotérmicos.....	31
Tabla 2. resultados de análisis físicos medidos en el sitio (Centro Turístico Lomas de Tarragona, Quetzaltenango) .....	47
Tabla 3. Resultados de los Análisis Químicos medidos en los laboratorios de Calidad de Agua de EMAX y de la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC. ....	48
Tabla 4. Datos geoquímicos de aniones de las fuentes termales del Centro Turístico Lomas de Tarragona.....	49
Tabla 5. Datos geoquímicos de cationes de las fuentes termales del centro turístico lomas de Tarragona.....	49
Tabla 6. Balance iónico .....	50
Tabla 7. Cálculos de los geotermómetros teóricos de Na/K propuestos por Truesdell (1976), Fournier (1979) Giggenbach (1988) y también los geotermómetros empíricos de Arnórsson (1983b) y Díaz-González (2008), dados en °C. ....	54
Tabla 8. . Cálculos de los geotermómetros teóricos de K <sup>2</sup> / Mg propuestos por Giggenbach (1983) y Fournier (1991), dados en °C.....	55
Tabla 9. . Cálculos de los geotermómetros teóricos de SiO <sub>2</sub> propuestos por Fournier (1985) y Verma & Santoyo (1997), dados en °C. ....	57

## **CAPITULO I:**

### **1. Introducción.**

La energía geotérmica es la energía que se puede obtener de aquellos materiales o sustancias de la corteza que tienen una temperatura superior a la temperatura ambiente. Esos materiales o sustancias pueden ser rocas calientes, gases y vapores de fumarolas, aguas termales, lodos calientes o lava.

La energía geotérmica es una de las fuentes de energía renovable menos conocida y se encuentra almacenada bajo la superficie terrestre en forma de energía calorífica ligada a volcanes, aguas termales, fumarolas y géiseres. (España, 2008)

La geotermia junto a la energía solar han sido de las primeras formas de energía aprovechada por los humanos en forma de calor. La energía geotérmica es una energía confiable, limpia y renovable siendo hasta 50,000 veces más abundante que todos los recursos petroleros y de gas juntos ( Departamento de Energía, 2003). En la superficie la geotermia se manifiesta en los manantiales termales que descargan agua caliente y vapor. Este recurso se puede aprovechar para: Baños medicinales, calefacción, turismo, recreación, actividades industriales y generación de energía eléctrica. En general los lugares más apropiados para el aprovechamiento de este calor están cerca de los volcanes o grandes fallas o fracturas de la corteza terrestre, en cuyo interior se localizan rocas a altas temperaturas, que calientan el agua que se infiltra en el subsuelo. (Marzolf, 2007)

Los procesos asociados a las Placas Tectónicas dan origen a diversos tipos de sitios geotérmicos. Dentro de estos procesos está el fenómeno tectónico de subducción que a la vez produce volcanes. Guatemala se encuentra dentro de los campos geotérmicos que están asociados al fenómeno de subducción, prácticamente en todo el llamado “Circulo de Fuego”, por lo que el área se denomina de alta capacidad para la generación de energía a través de la geotermia.

Es por ello que en el centro turístico Lomas de Tarragona, el cual está ubicado al costado suroeste del volcán Cerro Quemado, en Puerta del Llano, Cantón Candelaria, municipio de Quetzaltenango, la optimización y aprovechamiento sustentable de los bienes naturales puede ser importante debido a que dentro de las instalaciones existen fluidos geotérmicos

asociados a dicho volcán, es decir, aguas termales que pueden ser utilizadas para uso industrial, por ejemplo para la generación de energía eléctrica. Sin embargo, es indispensable realizar estudios preliminares que permitan justificar otros más profundos para conocer si estas aguas son propicias para la generación de energía eléctrica o para otros fines por medio de geotermia. Uno de los estudios preliminares económicos es el uso de geotermómetros acompañados de mediciones de propiedades físico-químicas. Por ello se pretenden realizar pruebas físicas como la temperatura, pH y conductividad eléctrica y también análisis químicos que permitan conocer la concentración de Silicio, Sodio, Magnesio, Calcio y Potasio, con la finalidad de efectuar las mediciones que sean necesarias a través de varios geotermómetros que permiten deducir la temperatura de fondo de reservorios geotérmicos, basados en la relación biunívoca directa que existe entre la temperatura asociada a las concentraciones de elementos durante el intercambio catiónico, con el objetivo de que en un futuro el área cercana al centro turístico pueda desarrollar tecnologías para la generación de energía eléctrica, tomando en cuenta la sostenibilidad del centro turístico que debe inferir en lo económico, social, ambiental y en la sustentabilidad, permitiendo brindar un buen funcionamiento al centro turístico y ofrecer un mejor servicio a los visitantes.

## **1.1 Antecedentes**

Guatemala posee dos centrales geotérmicas, que producen en conjunto, alrededor de 42 MW de electricidad. Ambas centrales son propiedad de una empresa llamada Ormat.

La central generadora ubicada en Zunil, municipio del departamento de Quetzaltenango, se llama Orzunil y trabaja con 8 pozos de extracción, que son propiedad por ley de la nación originalmente administrada por el INDE y ahora por la mencionada empresa bajo contrato de concesión.

Orzunil posee 7 unidades generadoras independientes, capaces de producir 4.5 MW cada una. El diseño hace que 6 de ellas se mantengan en funcionamiento simultáneamente para producir aproximadamente 24MW incorporables al Sistema Nacional Interconectado -SNI-. (Instituto de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo , 2013)

El vapor extraído de los campos geotérmicos de Zunil es de alta entalpía (vapor con temperaturas de 250°C, ideal para generación eléctrica), sin embargo, contiene altas

cantidades de sílica y azufre, que por problemas de incrustaciones y corrosión hacen imposible introducirlo directamente a la turbina para generar electricidad, por lo que se trabaja con un ciclo binario que consiste en transferir el calor del vapor de agua extraído del campo geotérmico a otro fluido, llamado fluido secundario o fluido de trabajo, con características especiales, que es inocuo para la turbina.

En Orzunil el fluido de trabajo utilizado es el pentano que, como en cualquier central térmica para generación de energía eléctrica, trabaja bajo el Ciclo de Rankine. El Ciclo de Rankine es un ciclo termodinámico que transforma calor en trabajo. En su forma ideal utiliza un fluido de trabajo que opera en ciclo cerrado (es decir sin gastar o consumir el fluido) en cuatro etapas:

1. Intercambio de energía calorífica a través de un intercambiador de calor que traslada el calor del vapor extraído de los pozos del campo geotérmico al fluido de trabajo convirtiéndolo en vapor;
2. Transformación de energía calorífica a energía mecánica a través de una turbina;
3. Condensación del fluido de trabajo
4. El vapor de agua extraído del campo geotérmico, luego de haber cedido al fluido de trabajo la mayor parte de su energía aprovechable, es condensado y reinyectado al subsuelo a través de tres pozos, llamado pozos de reinyección, con el fin de recargar el reservorio y extender la vida útil del campo geotérmico algunos años.

Guatemala tiene un potencial estimado de 1000MW de los cuales se aprovecha únicamente el 2.4%. La generación de energía eléctrica a partir de geotermia representa poco menos del 3% de toda la energía generada e integrada al SNI. (Instituto de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo , 2013)

La energía geotérmica también ha sido aprovechada aunque en pequeña proporción, para otros fines por ejemplo en balnearios turísticos de aguas termales-, en la industria de la construcción para el curado de bloques de construcción y en la industria artesanal para el bataneo de lana en Momostenango, Totonicapán para la producción de sal en Sacapulas, Quiché -esta última desde tiempos prehispánicos-.

El país tiene manifestaciones geotérmicas en prácticamente todo el territorio, distribuidos en dos grandes bloques: el bloque volcánico, gobernado por la cadena volcánica, y el bloque tectónico estructural gobernado por el complejo de las fallas Motagua-Polochic (González E. , 1995) Los campos geotérmicos más estudiados han sido los campos Moyuta, Tecuamburro, San Marcos, Amatitlán y Zunil. (Aguilar, 2013)

## **1.2 Planteamiento del problema de investigación.**

Para el centro turístico Lomas de Tarragona, ubicado en los antiguos baños de Xetuj, la inestabilidad del servicio de energía eléctrica que brinda la Empresa Eléctrica Municipal de Quetzaltenango –EEMQ- es uno de sus problemas principales. La inestabilidad del servicio de energía eléctrica ha creado grandes conflictos para la prestación de servicios debido a que los fines de semana no cuentan con energía eléctrica, como lo refieren los propietarios del centro turístico, lo que impide el desarrollo de las actividades del mismo. También se ha tomado en cuenta que en los próximos años el pago por el servicio de energía eléctrica podría aumentar. Por eso, conocer la potencialidad energética de los fluidos geotérmicos del área del Centro Turístico Lomas de Tarragona puede ser una alternativa que contribuya a mejorar la disponibilidad de electricidad en ese ramal.

## **1.3 Justificación del estudio**

Guatemala cuenta con gran variedad de bienes naturales, incluyendo entre ellos las aguas termales, las cuales son conocidas por su energía calorífica y una alta concentración de minerales que brotan del subsuelo de manera natural. En el departamento de Quetzaltenango existen fuentes de aguas geotermales, siendo una de ellas los antiguos y ancestrales baños de Xetuj, donde actualmente funciona un centro turístico llamado Lomas de Tarragona que se utiliza con fines turísticos y de diversión. Este afloramiento está asociado al volcán Cerro Quemado, y sus coordenadas son 14° 48' 51.95" N 91° 32' 00.37" O

Dicha fuente de agua no ha sido estudiada para determinar su potencialidad como fuente de energía geotérmica de media o alta entalpía, la que podría utilizarse para la generación de electricidad. Es por ello que se propone la realización de esta investigación para evaluar la potencialidad energética que poseen las aguas con la finalidad de ser aprovechadas y utilizadas para la generación de electricidad. Para esto es necesaria la realización de análisis fisicoquímicos cuyos datos se puedan utilizar en los geotermómetros.

Dicha energía podría ayudar a los baños del Centro Turístico Lomas Tarragona, debido a que la energía que actualmente utiliza no cumple con la calidad y cantidad que el centro turístico necesita, pues los fines de semana el Centro turístico no cuenta con energía eléctrica en sus instalaciones. Es por esto que la propuesta de generación de energía geotérmica, que es una de las energías renovables para generación de electricidad, podría satisfacer las necesidades que se tienen en el centro turístico. Esto también puede ser un ejemplo para las autoridades del departamento, ya que pueden utilizar la geotermia para abastecer de energía eléctrica a las comunidades cercanas a fuentes termales.

La generación de electricidad por medio de energía geotérmica posee una alta confiabilidad y disponibilidad, con factores de planta (de uso) de más de 80%. Mientras que el factor de uso de las hidroeléctricas es de cerca del 60% (a excepción de la Hidroeléctrica ITAIPU que puede sobrepasar el 100%) y la energía solar y eólica con apenas valores entre 25 al 27% de factor de uso. Esto es uno de los factores atractivos para la explotación de la Geotermia para contribuir a la reducción de gases de efecto invernadero y a minimizar los efectos del cambio climático.

La energía geotérmica es la mejor de las energías renovables debido a que entrega su energía las 24 horas del día los 365 días del año ya que proviene de la energía interna del suelo y subsuelo terrestre y no le afectan las condiciones climáticas, ni está sujeta a variaciones del precio del mercado por lo que es una energía firme y confiable en comparación a otras energías renovables.

Para la realización de las mediciones necesarias se dispone de varios geotermómetros acuosos que permiten deducir la temperatura de fondo de reservorios geotérmicos basados en la relación biunívoca directa que existe entre la temperatura asociada a las concentraciones de elementos durante el intercambio catiónico. Entre estos geotermómetros están los de Silicio, los de la relación Sodio/Magnesio (Na/Mg), los de concentraciones Calcio-Sodio-Potasio (Ca-Na-K) y los de Calcio-Sodio-Potasio-Magnesio (Ca-Na-K-Mg). Conociendo la concentración de uno o varios elementos, se puede conocer la temperatura que hay en el subsuelo profundo (más de 500 metros de profundidad). (Montalvo, 2015) Se utilizarán dichos elementos químicos debido a que son constituyentes mayoritarios de los fluidos termales.



La aplicación de los geotermómetros constituye una parte de los estudios geoquímicos, junto a los estudios geofísicos, previos a iniciar una campaña de perforación de pozos geotérmicos. La campaña de perforación es de costo elevado y amerita hacer todos los estudios previos y tener mayor certeza de encontrar un reservorio geotérmico de media o alta temperatura (media o alta entalpía), necesaria para la generación de electricidad. Es posible aplicar los geotermómetros con hojas de cálculo de Excel de (Powell y Cumming, 2010) a través de ecuaciones empíricas.

El tema a tratar también está contenido dentro de las líneas de investigación del Sistema de Investigación del Centro Universitario de Occidente –SINCUNOC- y en concordancia con la política ambiental de la Universidad de San Carlos de Guatemala, para la conservación de los bienes naturales y la protección del ambiente.

#### **1.4 Hipótesis de investigación.**

Las aguas termales del centro turístico Lomas de Tarragona tienen la capacidad para generar energía eléctrica de media o alta entalpía.

##### **1.4.1. Hipótesis nula y alternativa.**

###### **a. Hipótesis nula**

Las aguas termales de los balnearios del centro turístico Lomas de Tarragona no poseen las concentraciones de elementos químicos como K, Na, Ca, Mg, Si, necesarios para la generación de energía eléctrica a través de la geotermia.

###### **b. Hipótesis alternativa**

Las aguas termales de los balnearios del centro turístico Lomas de Tarragona poseen concentraciones de elementos químicos como K, Na, Ca, Mg, Si, propicios para la generación de energía eléctrica por medio de la geotermia.

## **1.5 Objetivos del estudio**

### **A. General**

Determinar la potencialidad de las aguas geotermales, del Centro Turístico Lomas de Tarragona para generar energía eléctrica a través del uso de geotermómetros.

### **B. Específicos**

1. Determinar las concentraciones de Ca-Na-K-Si-Mg a través de análisis químicos y otras propiedades físicas de muestras de agua geotermal procedente del balneario del centro turístico Lomas de Tarragona.
2. Deducir la temperatura del subsuelo profundo a través de geotermómetros acuosos a partir de la concentración de los elementos químicos medidos, para determinar la energía almacenada en el subsuelo.
3. Determinar, a través de un escaneo por medio de frecuencia Hz, la probabilidad de la existencia de un reservorio y la profundidad del agua del balneario Lomas de Tarragona.
4. Determinar el potencial energético de las aguas geotermales del balneario Lomas de Tarragona para determinar si es apta para la generación eléctrica.

## **CAPITULO II: Marco teórico.**

### **2.1 Geotermia**

La geotermia es una rama de la ciencia geofísica dedicada al estudio de las condiciones térmicas de la Tierra. Se emplea indistintamente para designar tanto a la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales necesarios en la extracción de esta energía geotérmica, es decir, calor útil para producir energía eléctrica para el ser humano. (Servicio Geológico Mexicano, 2017)

### **2.2 Origen del recurso geotérmico**

La tierra está compuesta por una secuencia de capas cuyo centro es el núcleo interno, el cual está compuesto por metales pesados, principalmente Níquel y Hierro y sólidos de alta densidad. Luego se encuentra el núcleo externo que es semisólido y está conformado por elementos menos pesados. El manto es una masa fluida de silicatos ferro-magnesianos que recubre el núcleo externo. La rotación del núcleo y la circulación de la roca fundida en el manto son responsables de la formación del campo magnético de la tierra.

La corteza terrestre, más sólida y liviana, flota sobre el manto, desplazándose sobre él, lo cual produce un fenómeno conocido como deriva continental, causante del choque entre las placas continentales y las placas marinas.

Según (González E. , 2011) las manifestaciones geotérmicas son una de las consecuencias de la Tectónica de Placas, pudiéndose clasificar estas los sitios geotérmicos así:

- Sitios geotérmicos volcánicos
- Sitios geotérmicos estructurales
- Sitios geotérmicos neo- corticales

Entre los sitios geotérmicos volcánicos se incluyen todos los alrededores de los volcanes según sea el proceso tectónico. Guatemala se encuentra dentro de los campos geotérmicos que están asociados al fenómeno de subducción, prácticamente en todo el llamado “Circulo de Fuego”, el cual circunda todo el Océano Pacífico. La subducción, es un fenómeno que hace deslizar la placa oceánica por debajo de la capa continental. En los sitios cercanos al contacto entre las placas continentales y marinas se genera una alta actividad volcánica por

el ascenso del magma líquido, incrementando los movimientos telúricos y originando el levantamiento de las cordilleras.

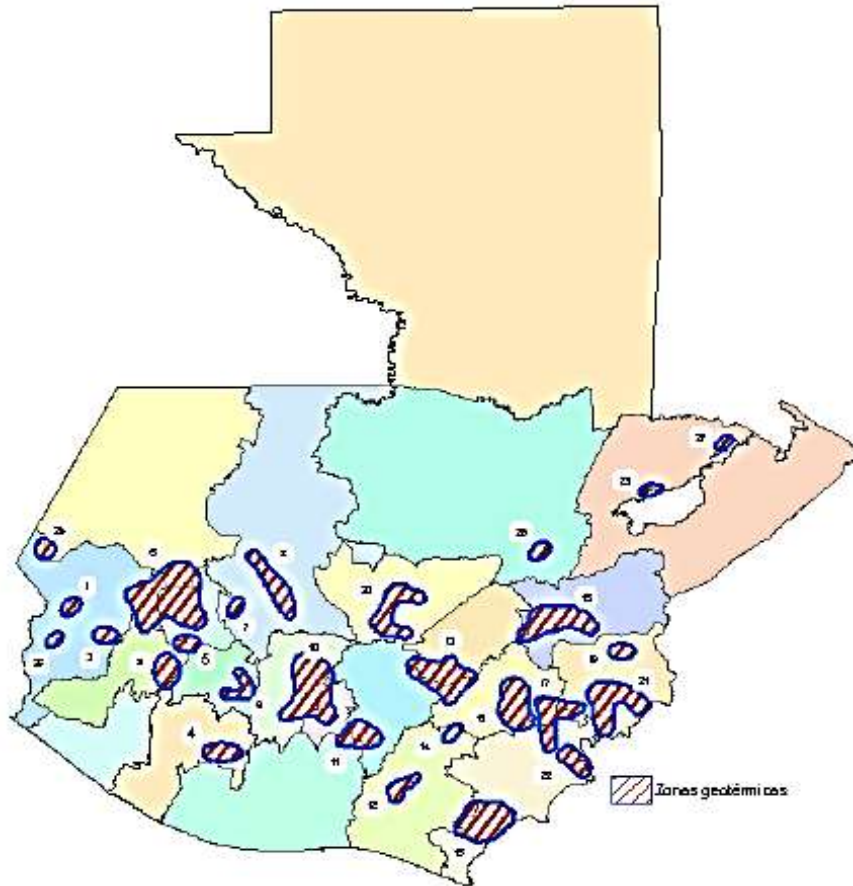
La mayor expresión de la actividad volcánica, producida por el choque y subducción entre las placas tectónicas, se localiza en lo que se denomina El Cinturón de Fuego del Pacífico, el cual rodea la línea de la costa occidental del continente americano. Estas zonas presentan una elevada actividad sísmica y volcánica, con un alto potencial geotérmico

El gradiente geotérmico o aumento de la temperatura de la tierra en la profundidad es una variable indicativa del potencial geotérmico de un sitio. Un valor normal de gradiente térmico corresponde a un aumento de entre 25 y 30 °C/km.

En algunas regiones, especialmente en aquellas donde se presentan volcanes, el gradiente geotérmico es superior al normal. El Campo Zunil tiene cerca de 250°C a 1500 metros de profundidad aproximadamente. Comúnmente en estas zonas afloran manantiales de aguas termales que constituyen una evidencia de la presencia de rocas calientes, masas magmáticas o gases volcánicos en ascenso, cerca de la superficie y que provienen del calor del interior de la tierra. Las regiones con estas características podrían ser promisorias para desarrollos geotérmicos y especialmente, para generación de energía eléctrica. No se han realizado investigaciones que determinen el potencial energético de las aguas termales del centro turístico Lomas de Tarragona, asociado al volcán Cerro Quemado; dicho potencial energético podría ser aprovechado por 210 personas mensualmente. En el siguiente mapa se encuentran las manifestaciones geotérmicas de Guatemala.

Figura 1: Mapa de manifestaciones geotérmicas en Guatemala

## MANIFESTACIONES GEOTÉRMICAS EN GUATEMALA



MANIFESTACIONES GEOTÉRMICAS DE GUATEMALA		
Área Geotérmica	Temperatura Superficial °C	Temperatura Deducida °C
1 Tajumulco		
2 San Marcos	87	185(284)
3 Zunil	87	208
4 La Memoria	60	160
5 Totonicapán	49	199
6 Momostenango	95	180 (234)
7 Quiché		
8 Sacapulas-Zacualpa	45	160
9 Atilán	47	150(195)
10 Chimaltenango	48	185
11 Amatitlán	90	240 (237)
12 Ixpaco	95	205 (195)
13 Sanarate	93	185
14 Ayarza		
15 Moyuta	88	185(193)
16 Monjas	49	160
17 Ipala	64	180
18 Zacapa	86	160
19 Camotán	49	150
20 Granados	87	200
21 Esquipulas	50	221
22 Asunción Mita	94	200
23 Polochic-Agua Caliente		
24 San Marcos-Tacaná		
25 San Marcos-Malacatán		
26 Polochic-Canlún		
27 Polochic-Livingston		

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM)

### 2.3 Sistemas geotérmicos

Se denomina sistema geotérmico a un conjunto de elementos naturales que se pueden presentar en una misma área o campo geotérmico y de la cual es posible extraer fluidos geotérmicos con diferentes fines. Los componentes principales de este tipo de sistemas son los siguientes: (Marzolf, 2007)

- a. **Fuente de calor:** puede ser; una roca caliente que ha incrementado su temperatura por contacto con un cuerpo volcánico intrusivo; una cámara magmática o gases calientes de origen magmático. Generalmente la fuente de calor presenta temperaturas mayores a los 600 °C. Estas fuentes se pueden encontrar a diferentes profundidades. (Marzolf, 2007)
- b. **Reservorio geotérmico:** formación de rocas permeables, donde circula el fluido geotérmico a profundidades económicamente explotables. Conocido también como yacimiento geotérmico. (Marzolf, 2007)
- c. **Sistema de suministro de agua o zona de recarga:** sistema de fallas o diaclasas en las rocas que permiten la recarga del reservorio geotérmico con el agua que se infiltra en el subsuelo. Este flujo reemplaza los fluidos que salen del reservorio en forma de manantiales termales o aquellos que son extraídos a través de pozos. (Marzolf, 2007)
- d. **Capa sello:** estrato impermeable, generalmente compuesto por arcillas (esmectita o montmorillonita) producto de la alteración de las rocas por alta temperatura, que cubre el reservorio, lo contiene y evita la pérdida de agua y vapor. (Marzolf, 2007)
- e. **Fluido geotérmico:** se denomina así al agua, en su fase líquida, de vapor o en combinación, que se encuentra en el reservorio geotérmico y que puede aflorar a la superficie de manera natural mediante manantiales de aguas termales o pozos geotérmicos. Estos fluidos a menudo contienen sustancias químicas disueltas como cloruros (Cl), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfatos (SO<sub>4</sub>) y sales minerales. (Marzolf, 2007)

Los sistemas geotérmicos se pueden clasificar de acuerdo con su entalpía (capacidad de absorber o ceder energía termodinámica), representada en la temperatura de los fluidos geotérmicos, como sigue, según diferentes autores:

Tabla 1. Temperaturas de fluidos geotérmicos

Clase de sistema	Muffler & Cataldi (1978)	Hichstein (1990)	Benderitter & Cormy (1990)	Haene Rybach & Stegena (1998)
Baja entalpia (Agua Termal)	< 90°C	<125°C	< 100°C	< 150°C
Media entalpia (vapor y agua)	90 a 150°C	125 a 225°C	100 a 200°C	NA
Alta entalpia (Vapor seco)	> 150°C	> 225°C	> 200°C	>150°C

Elaboración propia/ (Marzolf, 2007)

Actualmente se mencionan las manifestaciones geotérmicas de muy baja entalpía que van desde los 20°C.

La transferencia de calor en los sistemas geotérmicos es controlada por la convección o el movimiento de los fluidos geotérmicos. El movimiento de los fluidos tiene lugar debido al calentamiento y a la consecuente expansión del agua y el vapor. Los fluidos son calentados por la roca caliente, el magma o gases volcánicos, en la base del sistema de circulación y, por su menor densidad, tienden a ascender y a ser reemplazados por fluidos fríos de mayor densidad que provienen de los límites externos del sistema. (Marzolf, 2007)

La convección, por su naturaleza, tiende a incrementar las temperaturas de la parte superior del sistema, mientras que en la parte inferior las disminuye.

La estructura, geometría y funcionamiento de un sistema geotérmico parece bastante simple, sin embargo, entender y representar fielmente un sistema geotérmico real, a partir de sus modelos, no es fácil. Para ello se requiere la recolección en campo y la compilación y análisis en oficina, de información de varias disciplinas como: fotogrametría, cartografía, geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología, entre otras, además de una vasta experiencia para poder interpretar la información técnica y abstraer de ella la geometría, localización y

funcionamiento del sistema hidrotérmico, todo lo cual es representado en un Modelo Geotérmico Conceptual.

Los sistemas geotérmicos se encuentran en la naturaleza en una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas específicas, dando así origen a diferentes tipos de sistemas geotérmicos.

El corazón de un sistema geotérmico lo constituye la fuente de calor. Si las condiciones son favorables, los demás componentes pueden ser adecuados artificialmente. En algunos casos, si se encontrara roca caliente seca, es posible inyectar agua superficial y obtener vapor o agua caliente; esta tecnología se llama Roca Seca Caliente.

Los fluidos geotérmicos usados para la generación de energía pueden ser devueltos al sistema de roca caliente o a un reservorio geotérmico, mediante pozos de reinyección, una vez que los fluidos se han utilizado y hayan perdido calor y presión; de esta manera se asegura la recarga del reservorio. (Marzolf, 2007)

Otra forma de mantener campos geotérmicos viejos o agotados, es la recarga artificial mediante pozos de inyección. Así se hizo cuando, debido a una falta de fluidos, en 1998 la producción del campo geotérmico de los Geysers, en California (EE.UU), empezó a declinar dramáticamente. Allí se inició el transporte y reinyección de 0,48 m<sup>3</sup>/segundo de aguas residuales tratadas, las cuales fueron transportadas desde una distancia de 66 kilómetros, con lo que se logró reactivar la mayoría de plantas de generación de energía eléctrica del campo. (Marzolf, 2007)

## **2.4 Clasificación de las aguas geotérmicas**

### **a. Aguas cloruro sódicas (pH neutro)**

Aguas con contenido mayor de 1 g/L de sustancias mineralizantes, donde el ion cloruro, en una concentración superior a 20% meq/L suele estar acompañado de sodio en proporción semejante. La composición de este tipo de agua refleja un origen profundo. La ocurrencia de fallas y grietas facilita su ascenso hacia la superficie. Las aguas a menudo ocurren en áreas con manantiales en ebullición y actividad de geyser y son comunes para muchas áreas geotérmicas en desarrollo en rocas volcánicas y sedimentarias. El rango de pH va de moderadamente ácido a moderadamente alcalino (pH 5-9).



Aunque hay predominancia de cloro, sodio y potasio también existe calcio que usualmente es bajo pero variable, contiene apreciable sílice, una significativa pero variable cantidad de sulfatos, bicarbonatos y cantidades mínimas de flúor, amoníaco, arsénico, litio, rubidio y gases disueltos como dióxido de carbono y sulfuro de hidrógeno.

#### **b. 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 hidrógeno 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 volcánico solo el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno permanecen en el vapor que sube a través de la roca.

Los constituyentes presentes en las aguas son principalmente lixiviados de las rocas, generalmente tienen pH de 0 a 3, y contienen vapor separado y gases no condensables como dióxido de carbono, metano, amoníaco, hidrógeno, sulfuro de hidrógeno, nitrógeno. Debido a su naturaleza generalmente superficial, su significado geoquímico usualmente indica origen superficial.

#### **c. Aguas Sulfato Ácidas Cloruradas**

Aguas calientes en una gran variedad de ambientes pueden contener una gran cantidad de cloruros y sulfatos, pudiendo ser ácidas (pH 2-5). 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.

#### **d. Aguas Bicarbonatadas Sódicas**

Aguas ricas en bicarbonatos, son originadas ya sea por la disolución del dióxido de carbono o por la condensación de vapor geotérmico en aguas subterráneas libre de oxígeno y relativamente profunda.

Debido a la ausencia de oxígeno se evita la oxidación del sulfuro de hidrógeno, la acidez de estas soluciones es debida a la disociación de  $H_2CO_3$ . 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. Se debe tener presente que:

- 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 sodio bicarbonato se encuentran generalmente en la “zona de condensación” de sistemas vapor dominantes y en las partes marginales de sistemas líquido-dominantes. Sin embargo, están también presentes en yacimientos geotérmicos profundos en rocas metamórficas y/o sedimentarias.

### **2.5 Diagramas de clasificación de aguas geotérmicas**

#### **a. Diagrama de Piper-Hill-Langelier**

Formado por dos triángulos equiláteros donde se representa, respectivamente la composición aniónica y catiónica del agua y un campo central romboidal en que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes. Es necesario calcular las concentraciones de los iones en porcentaje y solo se pueden reunir en cada triángulo tres aniones y tres cationes. A cada vértice le corresponde el 100% de un anión o catión. Como aniones se suele representar a  $HCO_3$ ,  $SO_4$  y  $Cl$  y como cationes a  $Na$ ,  $K$ ,  $Ca$  y  $Mg$ . (Manuel Alejandro Pacheco Acosta, 2015)

## **2.5.1 Diagramas triangulares**

### **a. Diagrama Na-K-Mg**

Giggenbach (1986) propuso la combinación de los geotermómetros de Na/K y K/Mg en un diagrama triangular, a partir del cual se pueden clasificar las aguas y extrapolar la probable temperatura del reservorio, de una manera más sencilla y directa. En este diagrama los dos sistemas están representados por dos conjuntos de líneas, uno para las razones de Na/K y otro para las razones de K/Mg, donde cada valor representa líneas isotermas. La intersección de las isotermas de Na/K y K/Mg, referidas a la misma temperatura, corresponden a la composición del agua en equilibrio con las fases minerales controlando ambos geotermómetros y delineando la llamada “curva de equilibrio total”.

## **2.6 Geotermómetros**

### **a. Geotermómetros acuosos**

En la exploración y monitoreo de un sistema geotérmico, la estimación de las temperaturas ayuda a estimar el potencial geotérmico y la factibilidad de explotar sus recursos para la generación de energía eléctrica. Esta estimación de temperaturas se realiza mediante el uso de geotermómetros que emplean la composición química o isotópica de los fluidos que emergen en manantiales hidrotermales o fumarolas, o que son extraídos de pozos perforados (Rodríguez, 2008).

La composición de fluidos geotérmicos está controlada por reacciones químicas, que dependen principalmente de la temperatura de equilibrio entre el fluido geotérmico y los minerales a profundidad.

Los geotermómetros químicos son herramientas de bajo costo que se usan, tanto para predecir las temperaturas de equilibrio de los sistemas geotérmicos, como para dilucidar los principales procesos geoquímicos que ocurren en el interior de los yacimientos (Arnórsson, 2000); están basados en ecuaciones analíticas fundamentadas, en forma empírica, en bases de datos creadas con mediciones de temperatura y de composición química de fluidos muestreados en pozos o manifestaciones termales. (Rodríguez, 2008) Los geotermómetros pueden ser aplicados en fase acuosa, gaseosa y mineral. Los geotermómetros en fase acuosa asumen la consecución del equilibrio químico en los sistemas geotérmicos. Se considera que

los geotermómetros de gases corresponden al equilibrio entre los respectivos gases y los buffer minerales (Renderos, 2002)

#### **b. Geotermómetros catiónicos**

Se basan en la distribución de álcalis entre la fase sólida y la fase líquida, pueden ser: Na/K, Na-K-Ca, Na-Ca-K-Mg, entre otros (Na-Li, K-Mg,). Funcionan bien para aguas calientes, por lo que la aplicabilidad podría llegar hasta los 350°C debido a que están basados en relaciones que son menos afectadas por diluciones y separación de vapor, volviendo el reequilibrio más lento en comparación a los geotermómetros de sílice. (Manuel Alejandro Pacheco Acosta, 2015)

#### **c. Geotermómetro sílice**

Su principio básico es la variación de la solubilidad de sílice con la temperatura. Como la sílice está presente en diferentes formas es posible estimar temperaturas con geotermómetros de cuarzo, cristobalita, calcedonia, sílice amorfa entre otras. La solubilidad de la sílice es controlada por la sílice amorfa a baja temperatura y por el cuarzo a una alta temperatura. Entre las consideraciones al utilizar estos geotermómetros está que su rango de aplicabilidad es hasta los 250°C debido a que la separación de vapor, y el incremento de pH proporciona temperaturas sobreestimadas, mientras que la mezcla con agua fría las temperaturas son subestimadas. (Manuel Alejandro Pacheco Acosta, 2015)

#### **d. Análisis para líquidos**

Se utilizara una hoja de cálculo Excel propuesta por (Powell y Cumming, 2010)(Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls) que contiene entradas de datos de los análisis químicos e informes sobre geotermometría. En la siguiente figura se muestra la entrada de datos necesaria para el cálculo:

Figura 2: Ejemplo de la tabla de ingreso de datos que sirven de base para la hoja de cálculo Excel propuesta por (Powell y Cumming, 2010) (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	BM	BW	BO	DU	DV	DW	DX	DY	
1	CSH Ternary		NKM Ternary			XYZ Ternary			Isotopes			Piper Plot										
2	factor		factor			column	element	Factor				Separation of plot fields										
3	Cl	1	Na	1	K	Li	1	Position of fractionation cluster			-10	-20	0.2									
4	SO4	1	K	10	Y	Rb	4	Position of meteoric trend line label			-16											
5	HCO3	1	Mg	5	1000	Z	Cs	10														
6	kg																					
7	HCO3	CO3	NH4	As	Rb	Cs	Sr	Ba	Fe	Mn	Cond µmhos/cm	del <sup>18</sup> O	del D	sum cations	sum anions	Charge Balance						
8	5				2.20	2.00								57.71	56.38	1%						
9	30				2.30	2.10								60.61	60.36	0%						
10	310				0.30	0.75								41.93	40.60	2%						
11	330				0.29	0.60								43.38	51.09	-8%						
12	150				1.90	2.00								51.89	51.69	0%						
13	500				0.08	0.02								18.03	17.05	3%						
14	40				1.05	0.60								96.25	94.50	1%						
15	910				0.21	0.34								89.84	90.76	-1%						
16					0.37	0.04								103.97	260.23	-43%						
17	175				0.56	0.62								31.89	31.93	0%						
18	63				0.43	1.12								34.42	32.34	3%						
19	190				0.15	0.34								7.57	7.51	0%						
20	145				0.34	0.29								5.66	3.60	22%						
21	6				0.74	0.09								74.06	70.98	3%						
22	75				0.16	0.01								57.99	54.73	3%						
23	400				0.00	0.00								5.16	6.61	-12%						
24	265				0.11	0.07								14.84	15.64	-3%						
25	30				0.10	0.00								418.61	446.27	-3%						
26	630				0.71	0.08								368.41	366.15	0%						
27	-1				5.40	0.36								992.69	1193.14	-9%						
28														-4.5	-40							
29														-7.0	-45							
30														-5.7	-43							
31														-6.7	-45							

Fuente: Hoja de cálculo Excel propuesta por (Powell y Cumming, 2010) (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

### e. Geotermómetro de gases

Los geotermómetros para vapor pueden ser clasificados en tres grupos, el primero está basado en el equilibrio gas-gas, el segundo grupo se basa en el equilibrio gas-mineral e involucra a gases residuales H<sub>2</sub>S, H<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub> y el tercer grupo se basa en el equilibrio gas-mineral. Los dos primeros grupos de geotermómetros para gases requieren sólo los datos sobre la abundancia relativa de los componentes gaseosos en una fase gaseosa, mientras que el tercer grupo pide información sobre las concentraciones de gases del vapor. (Jacobo, 2003)

### f. Análisis de gases

Para realizar análisis de gases se utiliza una hoja de cálculo Excel que contiene una plantilla para cuatro diagramas ternarios y cinco geotermómetros de gases además de una hoja de referencia GGrid que proporciona las coordenadas de la grid de gases. En la siguiente figura se muestra la entrada de datos necesaria para el cálculo:

Figura 3: Ejemplo de la tabla de ingreso de datos que sirven de base para la hoja de cálculo Excel propuesta por (Powell y Cumming, 2010)(Gas\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

BB18 : X ✓ f<sub>x</sub> =LOG(AR18)-H\*LOG(AX18)-LOG(AW18)

Gas data input sheet				CCH Ternary		NCA Ternary		NHA Ternary		XYZ Ternary			CAR-HAR	COCO				
					factor		factor		factor	column	gas	factor						
				CH4	200	N2	100	N2	1	i	CO2	1	RH	R				
				CO2	1	CO2	1	He	1000	j	H2S	10	-2.8	-2				
				H2S	10	Ar	10000	Ar	100	k	NH3	1000						
				RH	-2.8													
				initial reservoir T	200													
Copy data into columns inside bold box. Input values are in black, fixed headings and calculations are in blue.				This will be the label plotted on the charts		Input one of these values. Percentages are decimals (e.g. 1.75% = 1.75)		Enter gas analysis as percentages of gases in decimals (e.g. 95.6% = 95.6). Include reported % air to calculate the percent N2 and Ar from air contamination. Include %CO2 if reported, and % air, % N2 and % Ar will be calculated. Enter numbers less than detection as negative numbers. Data will be plotted at the detection limit.										
				Total noncondensable gas			mole percent of dry gas in analysis											
Sample Name	Source	Type	Date	Sample Label	G/S x10 <sup>6</sup>	mole percent	weight percent	CO2	H2S	NH3	Ar	N2	CH4	H2	He	CO	O2 (if reported)	% air c
Oninemutu		fun		3	1000			71.2	2.0	0.200	0.5100	25.6	0.28	0.13	0.0058	0.0005	-0.030	
North Kuirau				5	1001000			89.5	0.7	0.001	0.0650	5.7	3.79	0.14	0.0176	-0.0020	0.92	
QE Hospital				8	18500			85.8	9.8	0.010	0.0430	3.9	0.19	0.22	0.0020	0.0030	-0.003	
South Kuirau				12	1001000			89.6	1.4	0.004	0.0810	5.8	2.95	0.13	0.0164	0.0060	-0.007	
Sulphur Point				15	280000			78.5	5.8	0.002	0.0710	7.5	0.47	7.64	0.0033	0.0060	-0.010	
Polynesian Pool				16	13000			75.3	16.5	0.020	0.0950	7.9	0.03	0.20	0.0012	0.0060	-0.007	
Well M9		well		22	2200			63.0	26.8	0.085	0.1100	8.8	0.08	1.19	0.0062	-0.0020	-0.009	
Ngapuna pool		pool		23	12000			73.6	21.9	0.046	0.0120	1.1	0.34	2.87	0.0020	0.00470	-0.004	
Ngapuna river		stream		23	1001000			74.8	17.4	0.002	0.0410	2.6	0.71	4.45	0.00310	0.00110	0.015	
Placemakers				26	54000			80.6	17.4	0.009	0.0060	0.3	0.32	1.40	0.0069	0.00280	-0.002	
Lake Rotokawa		lake		LP	710000			89.0	0.1	0.001	0.1400	8.9	1.39	0.01	0.00320	-0.0010	-0.003	
Hinemoa's Pool		pool		HP	1001000			12.7	-0.1		1.9000	80.4	4.70	0.00	0.01240	-0.00100	0.300	

Fuente: Hoja de cálculo Excel propuesta por (Powell y Cumming, 2010) (Gas\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

## 2.7 Análisis geofísicos

La propiedad física más importante asociada a los campos geotérmicos, aparte de la temperatura, parece ser la baja resistividad eléctrica resultante de la elevada temperatura de los fluidos, el incremento, en general, en la concentración de iones disueltos, y el aumento de la conductividad de la roca encajante asociado con procesos de alteración. La baja resistividad asociada a muchos campos geotérmicos proporciona un objetivo muy favorable para el empleo de métodos eléctricos de superficie. (Ministerio de Industria y Energía, 1985)

Este método se basa en hacer circular una corriente eléctrica en el terreno que se va a estudiar. Esta corriente se inyecta por medio de dos electrodos y el potencial causado por ella se mide usando otros dos electrodos a una cierta distancia de los primeros. Con estos dos parámetros se puede calcular la resistividad de las rocas a una profundidad que depende de la separación

entre los electrodos de corriente y los de medición. Este método es con mucho el más importante para la exploración geotérmica, ya que la resistividad de las rocas disminuye notablemente cuando éstas se encuentran saturadas por fluidos altamente mineralizados y a temperaturas elevadas, y también, cuando por la acción de estos fluidos los minerales que forman las rocas del yacimiento son alterados hidrotermalmente, transformándose principalmente en arcillas, las cuales son minerales con una conductividad muy elevada.

La determinación de la resistividad de las rocas se efectúa por el método anterior, pero en lugar de llevar a cabo una cobertura superficial del área, se obtiene en cada punto de observación la variación de la resistividad para diferentes profundidades cambiando la separación de los electrodos. Esto se puede hacer, ya que la profundidad de penetración de la corriente depende de qué tan separados estén los electrodos: a mayor separación de éstos, mayor es la profundidad que alcanza la corriente inyectada, excepto en algunos casos particulares en que la corriente se concentra en alguna capa altamente conductora y su penetración a mayores profundidades queda restringida por este efecto. (PROL-LEDESMA, 1998)

## **2.8 Energía geotérmica y otras energías renovables**

Las energías renovables son aquellas que se obtienen de fuentes naturales virtualmente inagotables, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

La energía renovable suele suministrar energía en cuatro áreas importantes: generación de energía, calefacción/refrigeración de aire y agua, transporte y servicios energéticos rurales (fuera de la red).

El término energía renovable se refiere a formas de energía que se regeneran rápidamente en comparación con los tiempos característicos de la historia humana. Las fuentes de estas formas de energía se denominan recursos energéticos renovables.

Entre las energías renovables se encuentran las siguientes:

### **a. Energía solar**

La energía solar es una fuente de energía de origen renovable, obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética procedente del Sol.

### **b. Energía eólica**

La energía eólica es la energía obtenida a partir del viento, es decir, la energía cinética generada por efecto de las corrientes de aire, y que es convertida en otras formas útiles de energía para las actividades humanas.

### **c. Energía mareomotriz**

La energía undimotriz, u olamotriz, es la energía que permite la obtención de electricidad a partir de energía mecánica generada por el movimiento de las olas.

### **d. Energía hidráulica**

La energía hidráulica, energía hídrica o hidroenergía es aquella que se obtiene del aprovechamiento de la energía cinética y potencial de la corriente del agua, saltos de agua o mareas.

### **e. Biomasa**

La biomasa es una de las principales fuentes de energía renovable en muchas zonas del planeta. La Biomasa tiene carácter de energía renovable ya que su contenido energético procede en última instancia de la energía solar fijada por los vegetales en el proceso fotosintético.

### **f. Energía geotérmica**

La energía geotérmica es aquella energía que puede obtenerse mediante el aprovechamiento del calor del interior de la Tierra.

Las posibilidades que ofrece la geotermia para los hogares son múltiples y útiles en todas las dependencias de la vivienda. Con la energía geotérmica disfrutará del máximo confort reduciendo al mínimo su gasto energético y económico. Su uso en los hogares pasa por calefacción mediante radiadores o suelo radiante, refrigeración por fan coils, agua caliente sanitaria o climatización de piscinas, entre otros. (Green Technology, 2018)



## g. Comparación económica de las energías renovables

Figura 4: Comparación económica de energías renovables

Tecnología	Costo Inversión US\$ / MW	Factor de Planta	Costo Variable US\$ / MWh	Costo Medio US\$ / MWh
Hidroeléctrica < 40 MW	1,9	0,6	2	44,5
Eólica	2,2	0,3	2	100,3
Geotermia	3,5	0,9	5	57,1
Solar	6	0,25	2	323,8
Biomasa	2	0,85	45	76,5
Mareomotriz (olas)	5	0,4	62	229,6

Fuente: (Corvalán, 2011)

## h. Comparación económica de la energía utilizada en Guatemala

Figura 5: Comparación económica de la energía utilizada en Guatemala

### Tarifa Eléctrica Social

### Tarifa Eléctrica No Social

Tarifa	May - jul 2018 Q/kWh	Ago - Oct 2018 Q/kWh	Variación Q/kWh	Variación %
EEGSA	1.10	1.08	0.02	-2%
DEOCSA	1.77	1.78	0.013	0.7%
DEORSA	1.68	1.69	0.005	0.3%

Tarifa	May - jul 2018 Q/kWh	Ago - Oct 2018 Q/kWh	Variación Q/kWh	Variación %
EEGSA	1.14	1.13	0.02	-2%
DEOCSA	1.86	1.88	0.018	1.0%
DEORSA	1.74	1.75	0.012	2.0%

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2018)

Llevando el tema de energías renovables a un mundo corporativo, no sólo tenemos la satisfacción de ayudar al planeta, sino que también generamos ahorro significativo en costos, pues al ser el petróleo un recurso que se ha ido agotando, su precio se va incrementado y por lo tanto los productos derivados. (Energía Inteligente , 2016)

Considerando lo anterior, al implementar la energía geotérmica, se disminuyen los gastos y en consecuencia podemos ser más competitivos en el mercado, sin dejar de lado que esta energía no depende de condiciones climáticas lo que la hace más eficiente en comparación con las demás energías renovables.

## **CAPITULO III: Marco Metodológico**

### **3.1 Método de Investigación**

Debido a la naturaleza del estudio, el cual pretende analizar el contenido de elementos químicos como K, Na, Ca, Mg, Si, que puedan generar a través de la geotermia energía eléctrica, para lo cual se utilizara el método cuantitativo no experimental. La investigación consistirá en determinar el potencial energético de las aguas geotermiales del balneario Lomas de Tarragona.

### **3.2 Contexto Espacial y Temporal de la Investigación**

El estudio se realizará en los balnearios del centro turístico Lomas de Tarragona ubicado en Puerta del Llano, Cantón Candelaria, municipio de Quetzaltenango, dichos balnearios poseen aguas termales que pueden ser propicias para la generación de energía eléctrica por medio de la geotermia.

### **3.3. Variables de la investigación:**

#### **3.3.1. Variables dependientes**

- Composición química del agua
- Temperatura del agua
- Conductividad eléctrica
- Potencial de hidrogeno (pH) en el agua

#### **3.3.2. Variables independientes**

- Temperatura de Fondo

#### **3.3.3. Definición conceptual, operativa e instrumental de cada una.**

##### **3.3.3.1. Variables dependientes**

###### **a. Composición química del agua**

La composición química del agua de los manantiales es producto de la disolución de la roca con la que estuvo en contacto antes de aflorar a la superficie. Y a la vez dependiente de la temperatura de fondo (Partida, 2001)

La realización de análisis químicos permite evidenciar claramente si existieran contenidos de elementos químicos como Ca, Na, K Mg, Si, que servirán para la determinación del potencial energético de las aguas geotermales.

#### **b. Temperatura de agua**

Su influencia en el agua es debido a la relación que se establece entre temperatura y solubilidad de sales y gases: a mayor temperatura mayor solubilidad de iones, y menor en gases, factores ambos que degradan la calidad de las aguas, ya que disminuyen la capacidad de disolución de oxígeno. (Enciclopedia Cubana, 2010)

Se medirá la temperatura de las muestras de agua con una sonda multi-parámetro que permita conocer los valores en el lugar, los cuales serán medidos en grados Centígrados (°C).

#### **c. Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la capacidad que posee el agua de transmitir corrientes eléctricas, esta capacidad depende de la actividad, tipo de iones disueltos y la temperatura del agua en que la muestra es tomada.

#### **d. Potencial de hidrogeno (pH) en el agua**

Es la medida de la acidez o alcalinidad del agua, expresada por una escala entre 1 y 14, de forma que el valor 1 indica condiciones de máxima acidez, y 14 de alcalinidad extrema. (Enciclopedia Cubana, 2010)

El pH del agua se mide a través de un multi-parámetro que muestra la escala de acidez o alcalinidad del agua.

### **3.3.3.2. Variables independientes**

- **Temperatura del fondo**

La distribución de la temperatura en la parte principal del yacimiento es uno de los factores importantes que determinan el valor económico de un recurso geotérmico. Durante las etapas de exploración, antes de comenzar costosas operaciones de perforación, se busca una evidencia razonable de la existencia de alta temperatura de fondo en el yacimiento.

La temperatura, que podemos medir en los primeros kilómetros de la corteza, aumenta con la profundidad siguiendo una progresión media de 3°C cada 100 metros de profundidad. La

relación entre la variación de temperatura y la profundidad recibe el nombre de gradiente geotérmico.

En los casos en los que el fluido geotérmico sube y descarga en la superficie, la aplicación de ciertas herramientas denominadas geotermómetros químicos ha resultado de gran utilidad.

Un geotermómetro es un modelo matemático que relaciona la temperatura del yacimiento con la composición química de los fluidos que afloran de manera natural o por medio de pozos a la superficie. (Víctor Arellano Gómez, 1999)

### **3.4. Sujetos:**

#### **3.4.1. Población**

El centro turístico Lomas de Tarragona se encuentra ubicado en Puerta del Llano, Cantón Candelaria, municipio de Quetzaltenango. Dentro del centro turístico existen dos balnearios que contienen aguas termales, las fuentes de dicho centro turístico están asociadas al volcán Cerro Quemado.

### **3.5. Fuentes de información.**

#### **3.5.1. Primarias.**

- Propietarios del centro turístico Lomas de Tarragona.
- Contextualización de la situación en el centro turístico Lomas de Tarragona.

#### **3.5.2 Secundarias.**

- Revisión bibliográfica de documentos actualizados relacionados al tema.

### **3.6. Técnicas e instrumentos utilizados en la recopilación de los datos.**

- Análisis químicos en laboratorio para la determinación del contenido de K, Na, Ca, Mg, Si.
- Análisis físicos in situ para la determinación de la temperatura del agua termal del centro turístico Lomas de Tarragona.
- Análisis físicos en laboratorio para la determinación de conductividad eléctrica y pH que poseen las aguas del centro turístico Lomas de Tarragona.
- Utilización de varios geotermómetros que permitan deducir la temperatura de fondo de reservorios geotérmicos basados en la relación biunívoca directa que existe entre la

temperatura asociada a las concentraciones de elementos durante el intercambio catiónico.

### **3.7. Pasos del trabajo de campo.**

1. Toma de muestras de agua del centro turístico Lomas de Tarragona, debidamente rotulado en recipientes estériles, químicamente inocuos y termo-resistentes.
2. Realización de medición de temperatura en muestras de agua in situ.
3. Transporte de las muestras de agua al laboratorio.
4. Realización de medición de pH y conductividad eléctrica in situ y en el laboratorio.
5. Realización del análisis químico de las muestras de agua en el laboratorio

### **3.9. Técnicas de análisis de los datos.**

- Depuración de valores (valores extremos y valores no reales), ordenamiento en clases si el número de variables es de 20 o 30.
- Escogencia de valores representativos (valores de tendencia central, valor de dispersión sesgo, curtosis al menos).
- Gráficas, si fuera necesario, y el análisis de las gráficas y datos procesados (curva de regresión y graficas de dispersión, varianza)

## **CAPITULO IV: Análisis e interpretación de resultados**

### **4.1 Análisis de los datos**

### **4.2 Estación de monitoreo**

La estación de monitoreo fue establecida dentro del territorio del Centro Turístico Lomas de Tarragona, Puerta del Llano, Cantón Candelaria, en donde se encuentra ubicada un afloramiento de aguas termales, el cual fue monitoreado con la finalidad de realizar análisis físicos y químicos para la determinación de la temperatura de fondo del reservorio y análisis de resistividad eléctrica para determinar la profundidad del agua que se encuentra en el balneario.

### **4.3 Método de muestreo**

Para la realización del muestreo de aguas termales es necesario contar con recipientes termo-resistentes y estériles, hacer la toma de muestras y trasladados al laboratorio para determinar el contenido químico de cada una de las muestras (ver tabla 3); sin embargo, durante la toma de muestras se debe medir la temperatura, conductividad, pH en el lugar del muestreo (ver tabla 2), las cuales fueron medidas con un multi- parámetro. Datos importantes que deben agregarse a la boleta de muestreo son las coordenadas, fecha y hora de recolección de cada una de las muestras.

Para la determinación de los resultados químicos las muestras fueron llevadas al Laboratorio de Calidad de Agua de la Empresa Municipal de Aguas de Xelajú y al Laboratorio de Aguas de la División de Ciencias de la Ingeniería del Centro Universitario de Occidente de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

*Tabla 2. Resultados de análisis físicos medidos en el sitio (Centro Turístico Lomas de Tarragona, Quetzaltenango)*

Numero de muestra	Temperatura a °C	Unidades de pH	Conductividad uS/cm	Solidos disueltos mg/L	Salinidad mg/L	Oxígeno disuelto mg/L O <sub>2</sub>
1	48	7.44	518	354	176	7.1
2	48	7.37	325	221	171	7.1
3	49	7.44	518	354	176	7.1
4	49	7.27	508	347	289	7.1
5	51	7.25	533	376	247	7.1
6	51	7.12	537	376	297	7.1

Elaboración propia/ Análisis efectuados en los Laboratorios de Calidad de Agua de EMAX y de Calidad de Aguas de la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC, en el período de noviembre de 2018 a febrero de 2019

*Tabla 3. Resultados de los Análisis Químicos medidos en los laboratorios de Calidad de Agua de EMAX y de la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC.*

Muestra	mg/L K	mg/L Na	mg/L Ca	mg/L Mg	mg/L Si	mg/L Mn	mg/L Cl	mg/L SO4	mg/L CaCO3
1	1.1	298.20	8.55	6.6	105.20	0.04	48.1	91.2	50
2	1.05	298.20	8.5	5.7	105.20	0.02	48.1	91.2	50
3	1.15	298.20	8.65	5.9	105.20	0.03	48.1	91.2	50
4	1.17	298.20	8.67	5.91	105.20	0.02	48.1	91.2	50
5	1.01	298.20	8.66	5.9	105.20	0.02	48.1	91.2	50
6	1.06	298.20	8.53	5.75	105.20	0.04	48.1	91.2	50

Elaboración propia/ Análisis efectuados en los Laboratorios de Calidad de Agua de EMAX y de Calidad de Aguas de la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC, en el período de noviembre de 2018 a febrero de 2019

#### **4.4 Resultados de geotermómetro en agua termal**

Para la utilización de geotermómetros se utilizaron los elementos químicos K, Na, Ca, Mg, SiO<sub>2</sub>, Mn, Cl y SO<sub>4</sub> cada uno de ellos expresados en mg/L, también se utilizaron parámetros físicos como temperatura, pH y conductividad eléctrica, dichos análisis fueron realizados en los laboratorios de Calidad de Agua de EMAX y de Calidad de Aguas de la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC, en el período de noviembre de 2018 a febrero de 2019.



*Tabla 4. Datos geoquímicos de aniones de las fuentes termales del Centro Turístico Lomas de Tarragona*

Muestra	SO4 (mg/L)	Cl (mg/L)
1	91.20	48.10
2	91.20	48.10
3	91.20	48.10
4	91.20	48.10
5	91.20	48.10
6	91.20	48.10

Fuente: Elaboración propia/ Análisis efectuados en los Laboratorios de Calidad de Agua de EMAX y de Calidad de Aguas de la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC, en el período de noviembre de 2018 a febrero de 2019/ Hoja de cálculo en Excel propuesta por Powell y Cumming (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

*Tabla 5. Datos geoquímicos de cationes de las fuentes termales del centro turístico lomas de Tarragona*

Muestra	Ca (mg/L)	K (mg/L)	Mg (mg/L)	Mn (mg/L)	Na (mg/L)	SiO2 (mg/L)
1	8.6	1.10	6.60	0.04	298.20	105.20
2	8.5	1.05	5.70	0.02	298.20	105.20
3	8.7	1.15	5.90	0.03	298.20	105.20
4	8.7	1.17	5.91	0.02	298.20	105.20
5	8.7	1.01	5.90	0.02	298.20	105.20
6	8.5	1.06	5.75	0.04	298.20	105.20

Fuente: Elaboración propia/ Análisis efectuados en los Laboratorios de Calidad de Agua de EMAX y de Calidad de Aguas de la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC, en el período de noviembre de 2018 a febrero de 2019/ Hoja de cálculo en Excel propuesta por Powell y Cumming (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

Tabla 6. Balance iónico

Muestra	$\Sigma$ Cationes	$\Sigma$ Aniones	Carga de equilibrio
1	13.97	3.26	62%
2	13.89	3.26	62%
3	13.92	3.26	62%
4	13.92	3.26	62%
5	13.92	3.26	62%
6	13.90	3.26	62%

Fuente: Elaboración propia/ Análisis efectuados en los Laboratorios de Calidad de Agua de EMAX y de Calidad de Aguas de la División de Ciencias de la Ingeniería del CUNOC, en el período de noviembre de 2018 a febrero de 2019/ Hoja de cálculo en Excel propuesta por Powell y Cumming (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

#### 4.5 Clasificación de las aguas geotérmicas

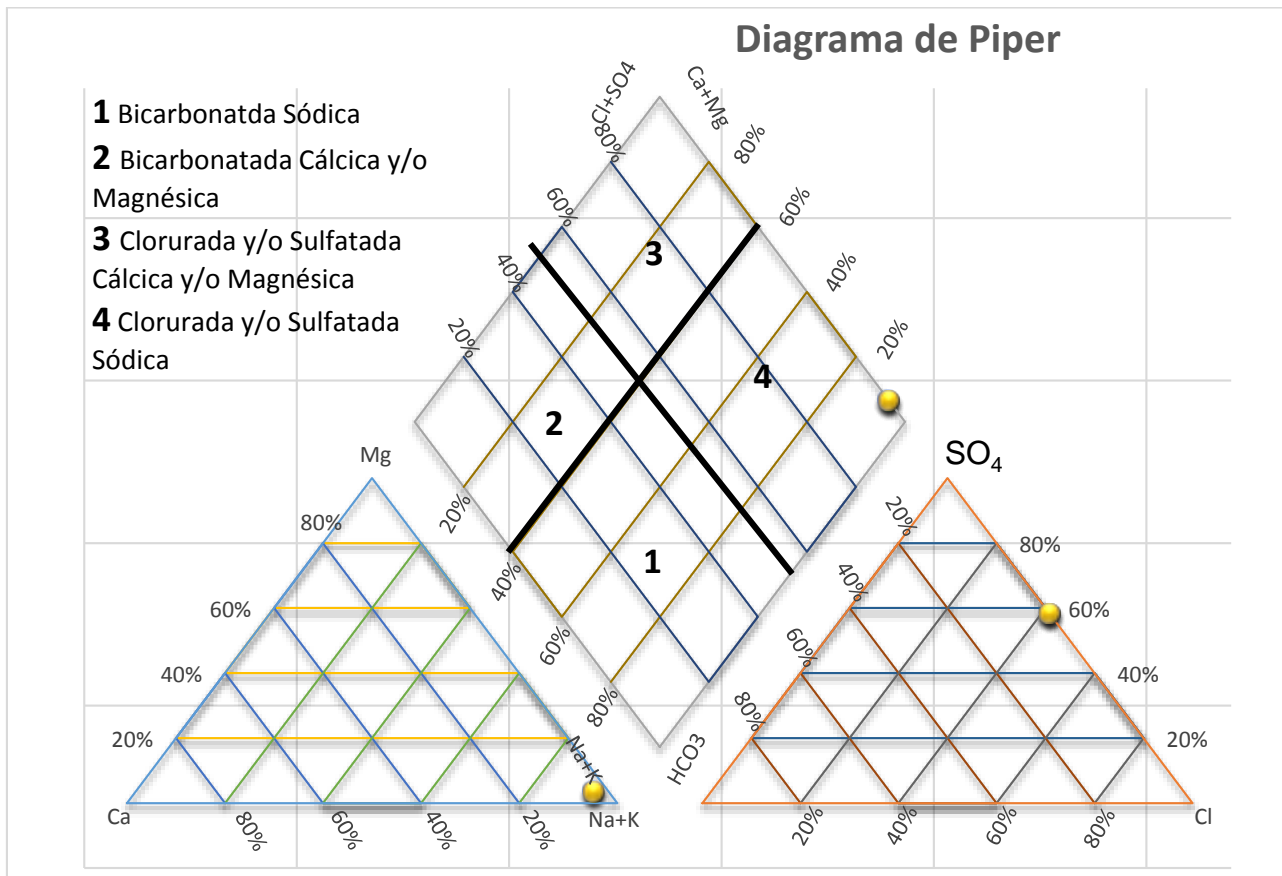
Para la clasificación de las aguas geotérmicas se utilizaron diversos gráficos como:

- Diagrama de Piper -Hill-Langelier
- Diagramas triangulares Giggensbach (Na-K-Mg), Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>
- Geotermómetros acuosos (estimación de temperatura con geotermómetros de K, Na, Mg, Si)

##### a. Diagrama de Piper-Hill-Langelier

Los resultados de la figura 7 muestran que el contenido catiónico de las aguas termales del Centro Turístico Lomas de Tarragona son cloruradas y/ o sulfatadas sódicas.

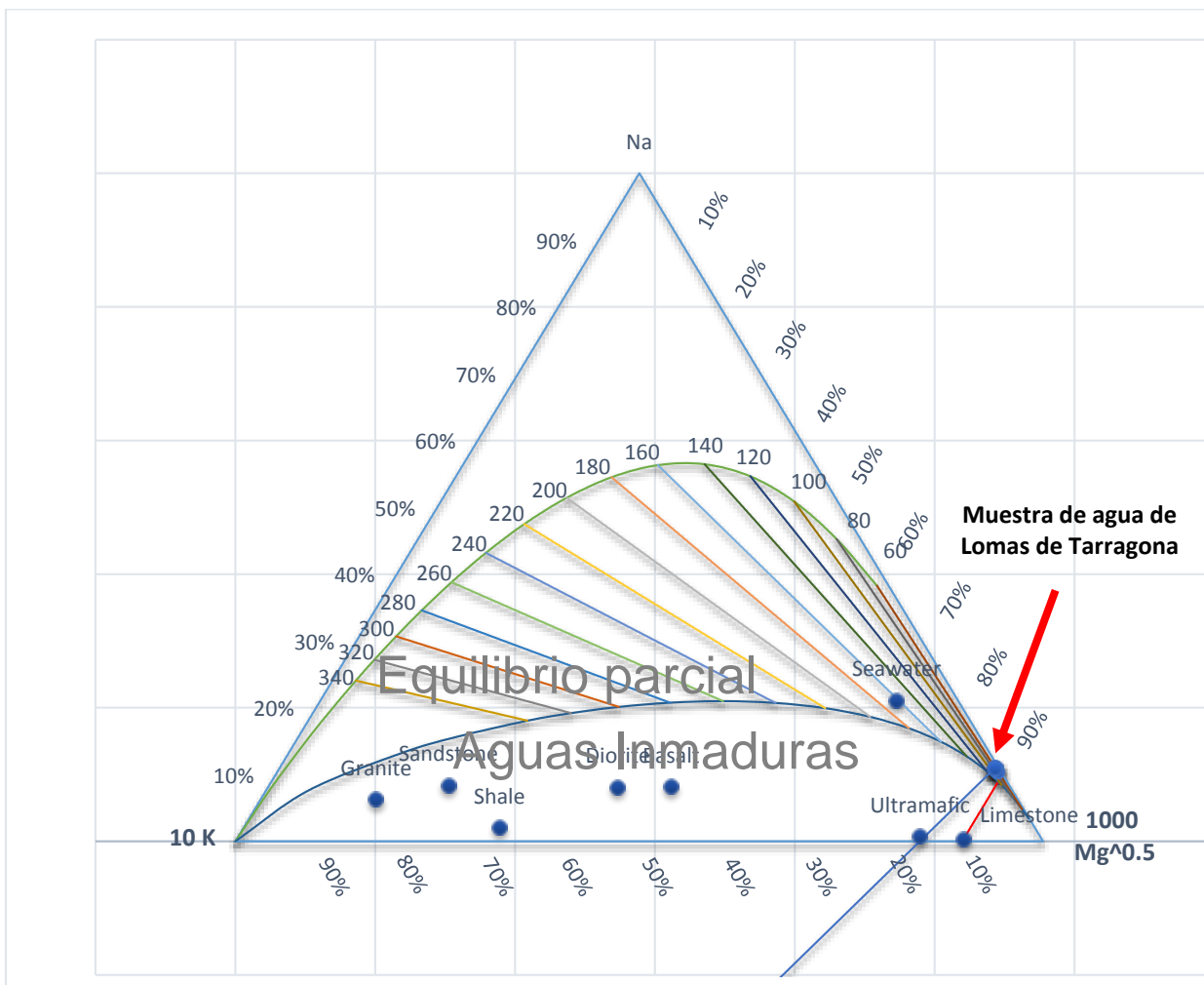
Figura 7: Localización de las aguas de Lomas de Tarragona dentro del Diagrama de Piper Hill Lagelier



Fuente: Elaboración propia/ Hoja de cálculo en Excel propuesta por Powell y Cumming (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

## b. Diagrama Triangular Giggenbach (Na-K-Mg)

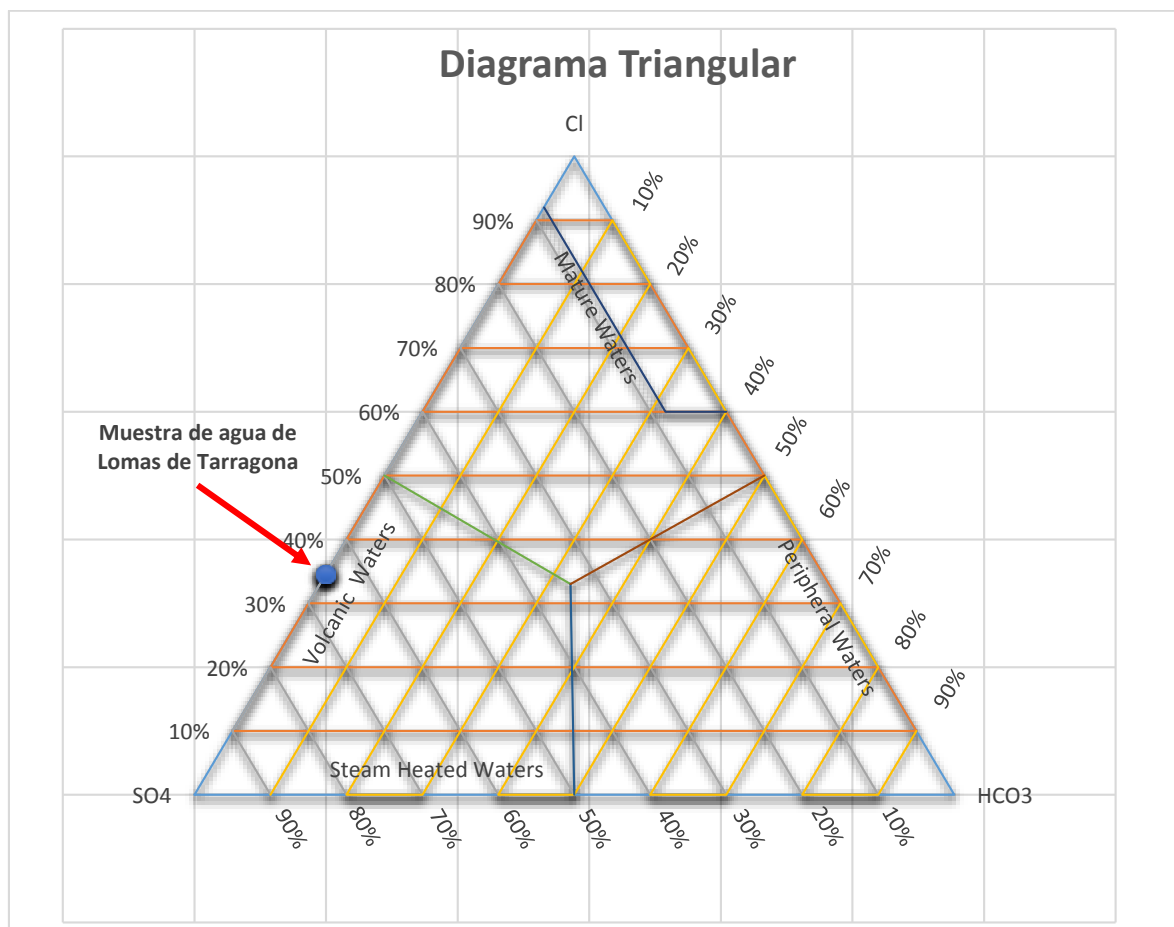
Figura 8: Localización de las aguas de Lomas de Tarragona dentro del Diagrama Triangular Giggenbach (Na-K-Mg)



Fuente: Elaboración propia/ Hoja de cálculo en Excel propuesta por Powell y Cumming (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

### c. Diagrama Triangular Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>

Figura 9 Localización de las aguas de Lomas de Tarragona dentro del Diagrama Triangular Cl-SO<sub>4</sub>-HCO<sub>3</sub>



Fuente: Elaboración propia/ Hoja de cálculo en Excel propuesta por Powell y Cumming (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

#### 4.5.1. Geotermómetros acuosos

#### 4.5.2 Geotermómetros catiónicos

Los resultados obtenidos de las aguas geotérmicas del área de estudio se evaluaron a través del uso de geotermómetros catiónicos desarrollados a partir de los elementos químicos: K, Na, Ca, Mg, y otros como Mn, Cl y SO<sub>4</sub>. Debido a que los geotermómetros son herramientas de bajo costo, son utilizados para determinar la temperatura de fondeo del reservorio; también fue necesario utilizar parámetros físicos como pH y conductividad eléctrica con la finalidad de estimar la temperatura de equilibrio entre el fluido geotérmico y los minerales a profundidad. “Éstos se debe a que no se ven tan afectados por procesos secundarios

(ebullición o dilución) que los geotermómetros basados en componentes individuales.”  
(Abarzúa, 2012)

Es importante mencionar que se utilizaron diferentes geotermómetros catiónicos para determinar la temperatura en grados centígrados del yacimiento en cuestión.

#### a. Relación Na/K

Para realizar los cálculos de los geotermómetros se hizo uso de geotermómetros teóricos de Na/K de Truesdell (1976), Fournier (1979) Giggenbach (1988) y también los geotermómetros empíricos de Arnórsson (1983) y Díaz-González (2008), a continuación se presentan las ecuaciones utilizadas y cada uno de los resultados (ver tabla 7).

$$T(^{\circ}C) = \frac{1217}{\log \frac{Na}{K} + 1.483} - 273.15 \quad (\text{Fournier, 1977})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{855.6}{\log \frac{Na}{K} + 0.8573} - 273.15 \quad (\text{Truesdell, 1976})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{1390}{\log \frac{Na}{K} + 1.75} - 273.15 \quad (\text{Giggenbach, 1988})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{933}{\log \frac{Na}{K} + 0.933} - 273.15 \quad (\text{Arnórsson, 1983})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{833}{\log \frac{Na}{K} + 0.908} - 273.15 \quad (\text{Díaz –González, et al., 2008})$$

Las ecuaciones anteriormente presentadas son utilizadas para la medición del geotermómetro de Na/K; dichos elementos están medidos en mg/L.

*Tabla 7. Cálculos de los geotermómetros teóricos de Na/K propuestos por Truesdell (1976), Fournier (1979) Giggenbach (1988) y también los geotermómetros empíricos de Arnórsson (1983b) y Díaz-González (2008), dados en °C.*

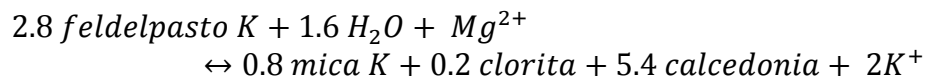
Muestra	Fournier	Truesdell	Giggenbach	Arnórsson	Díaz – González
1	228.57	79.35	299.88	111.24	70
2	224.54	76.46	295.17	108.08	67.29
3	232.51	82.17	304.45	114.30	72.85
4	234.08	83.27	306.24	115.51	73.90
5	221	74.07	291.31	105.48	64.97
6	225.22	77.04	296.13	108.72	67.86

Fuente: Elaboración propia

## b. Relación K<sup>2</sup>/ Mg

La razón K<sup>2</sup>/Mg es un buen indicador de la temperatura de equilibrio del sistema, esto es debido a que el Mg disminuye su concentración en el agua al aumentar la temperatura, ya que se incorpora a los minerales de alteración, como por ejemplo clorita (D'Amore & Arnórson, 2000). Este geotermómetro es muy utilizado dentro del rango de 120-140°C, porque en este rango los minerales involucrados dentro del geotermómetro de Na/K no alcanzan un equilibrio (Nicholson, 1993)

Este geotermómetro se basa las siguientes ecuaciones:



Del cual se desprende las siguientes ecuaciones para el geotermómetro:

$$T(^{\circ}C) = \frac{4410}{14 - \log_{Mg} \frac{K^2}{Mg}} - 273.15 \quad (\text{Giggenbach, 1983 b})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{2330}{7.35 - \log_{Mg} \frac{K^2}{Mg}} - 273.15 \quad (\text{Fournier, 1991})$$

Tabla 8. . Cálculos de los geotermómetros teóricos de K<sup>2</sup>/ Mg propuestos por Giggenbach (1983) y Fournier (1991), dados en °C.

Muestra	Giggenbach	Fournier
1	42.58	44.59
2	42.56	44.57
3	42.49	44.50
4	42.48	44.49
5	42.6	44.61
6	42.56	44.56

Fuente: Elaboración propia

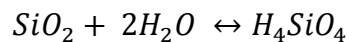
## c. Geotermómetro de sílice:

Este geotermómetro es una herramienta importante para conocer la temperatura del yacimiento (Abarzúa, 2012), ya que su principio básico es la variación de la solubilidad del sílice con la temperatura; como la sílice está presente en diferentes formas es posible estimar temperaturas con geotermómetros de cuarzo, cristobalita, calcedonia, sílice amorfa entre otras. La solubilidad de la sílice es controlada por la sílice amorfa a baja temperatura y por el cuarzo a una alta temperatura. Entre las consideraciones al utilizar estos geotermómetros

está que su rango de aplicabilidad es hasta los 250°C debido a que la separación de vapor, y el incremento de pH proporciona temperaturas sobreestimadas mientras que la mezcla con agua fría las temperaturas son subestimadas. (Manuel Alejandro Pacheco Acosta, 2015)

Para la determinación de los resultados fue necesario tomar 6 muestras de agua, cada una de ellas fue tomada en diferentes horas, posteriormente estas fueron analizadas química y físicamente para conocer la cantidad de elementos químicos que posee cada una y su varianza, tomando en cuenta que para predecir la temperatura del reservorio geotérmico se han desarrollado diversos geotermómetros, sin embargo se pueden obtener diferentes valores de temperaturas del reservorio, debido a diferentes velocidades de reacción.

Las bases de este geotermómetro están indicadas por la reacción que gobierna la disolución del ácido silícico:



Muchos geotermómetros de sílice han sido propuestos, con base empírica y/o teórica. Para efectos de esta investigación se utilizan los propuestos por Fournier (1985), debido a la confiabilidad que poseen, además fueron re-correctos por Verma & Santoyo (1997), el cual posee un rango más acotado de temperatura en comparación a los otros geotermómetros, además de un error asociado mucho menor. (Abarzúa, 2012)

A continuación se presentan las ecuaciones de los geotermómetros utilizados:

- $T(^{\circ}C) = 731 \div (4.52 - \log SiO^2) - 273.15$  (Amorphus Silica, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 1000 \div (4.78 - \log(SiO^2)) - 273.15$  (Alpha Cristobalite, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 781 \div (4.51 - \log(SiO^2)) - 273.15$  (Beta Cristobalite, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 1032 \div (4.69 - \log(SiO^2)) - 273.15$  (Chalcedony Conductive, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 0.00000031665 \times SiO^2 - 0.00036686 \times SiO2^2 + 0.28831 \times SiO^2 + 77.034 \times \log SiO^2 - 42.198$  (Quartz Conductive, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 1522 \div (5.75 - \log SiO^2) - 273.15$  (Quartz Adiabatic, Fournier 1985)

Corrección de Verma & Santoyo (1997):

- $T(^{\circ}C) = -44.119 + 0.24469 \times SiO^2 - 1.7414 \times 10^{-4} \times SiO2^2 + 73.305 \times \log SiO^2$



Donde ( $\text{SiO}_2$ ) es la concentración de sílice en mg/l (o ppm), la temperatura se calcula en grados Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ). Los parámetros de las ecuaciones fueron obtenidos de forma experimental por Fournier (1985) y Verma & Santoyo (1997).

*Tabla 9. . Cálculos de los geotermómetros teóricos de  $\text{SiO}_2$  propuestos por Fournier (1985) y Verma & Santoyo (1997), dados en  $^{\circ}\text{C}$ .*

Muestra	Amorphous Silica (Fournier)	Alpha Cristobalite (Fournier)	Beta Cristobalite (Fournier)	Chalcedony conductive (Fournier)	Quartz conductive (Fournier)	Quartz adiabatic (Fournier)	Sílice (Verma & Santoyo)
1	19	89	41	114	140	135	127.91
2	19	89	41	114	140	135	127.91
3	19	89	41	114	140	135	127.91
4	19	89	41	114	140	135	127.91
5	19	89	41	114	140	135	127.91
6	19	89	41	114	140	135	127.91

Fuente: Elaboración propia/ Hoja de cálculo en Excel propuesta por Powell y Cumming (Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls)

Fournier (1985) notó que la cinética de reacción de sílice amorfa era relativamente rápida en comparación a la del cuarzo y calcedonia. Por lo tanto, los manantiales calientes en equilibrio con sílice amorfo (compuestos esencialmente de sílice amorfo) raramente preservarán concentraciones de  $\text{SiO}_2 > 350$  ppm, imponiendo un límite superior de  $220^{\circ}\text{C}$  para el geotermómetro de cuarzo. (Abarzúa, 2012)

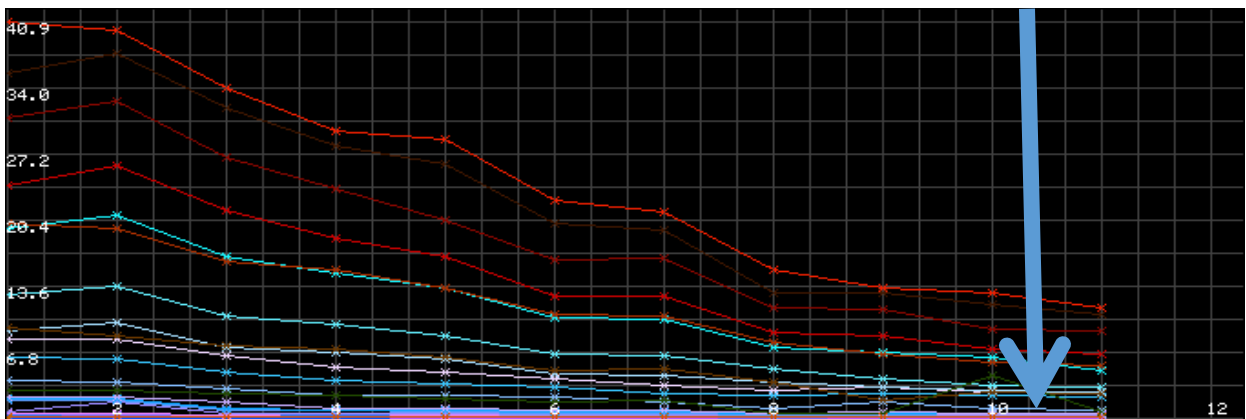
La ecuación de Verma & Santoyo está destinada a corregir dicho efecto en manantiales en ebullición. Al contrario de la ebullición, la mezcla de aguas termales con aguas meteóricas provocará una disminución de la concentración de  $\text{SiO}_2$ , potenciando la subestimación de temperaturas de subsuelo. Los efectos ebullición y dilución pueden superponerse en los

manantiales calientes, por lo que siempre es recomendable usar todas las ecuaciones geotermométricas. (Abarzúa, 2012)

#### 4.6 Estudios geofísicos

La estructura del suelo provoca una transformación de la señal sísmica que viaja de la roca a la superficie y se evidencia en una modificación de su amplitud y frecuencia, en la figura 10 se presenta una depresión de nivel, lo que nos indica que existe una conexión del agua subterránea profunda hacia la superficie, esta conexión posiblemente se debe a agua termal.

Figura 10. Estructura de suelo en transformación de señales sísmicas

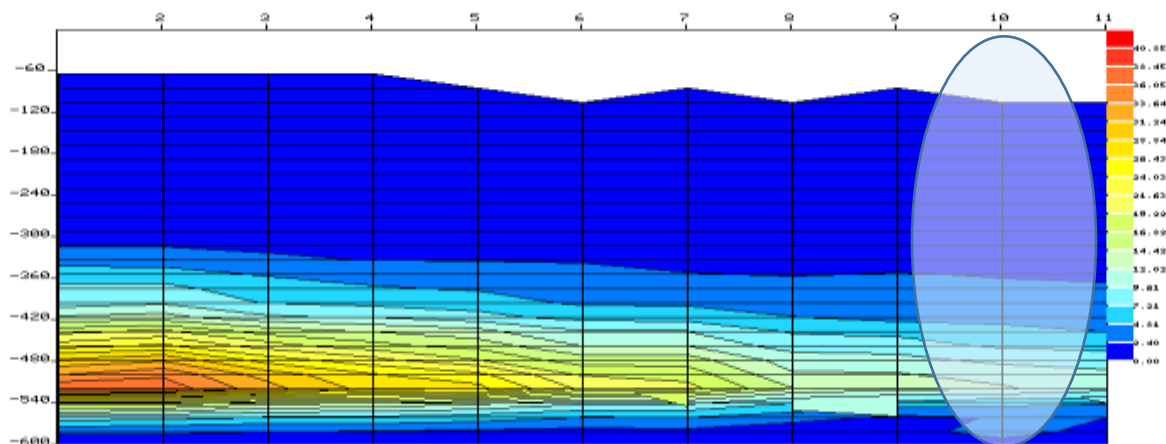


Fuente: PhD. Dagoberto Bautista

- **Origen geológico:**

Aguas magmáticas: Las aguas encontradas tienen su origen de carácter eruptivo y en relación a su caudal constante en composición y temperatura.

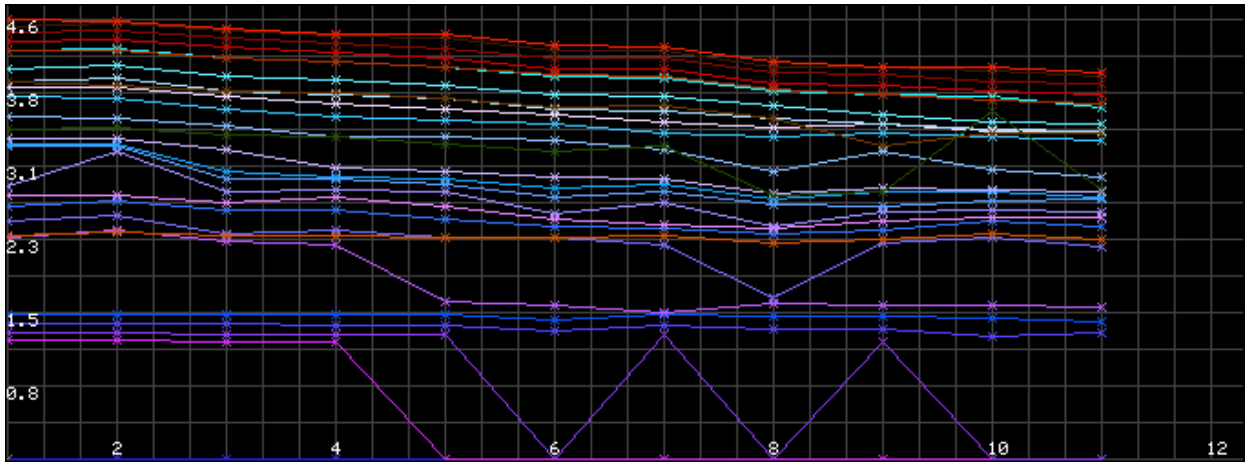
Figura 11. Aguas magmáticas



Fuente: PhD. Dagoberto Bautista

También podemos observar una capa de agua subterránea a una profundidad de 60 metros a 140 metros, este tipo de aguas se les denominan aguas telúricas: ya que su caudal varía dependiendo de la época del año ya que proviene de la infiltración de las lluvias.

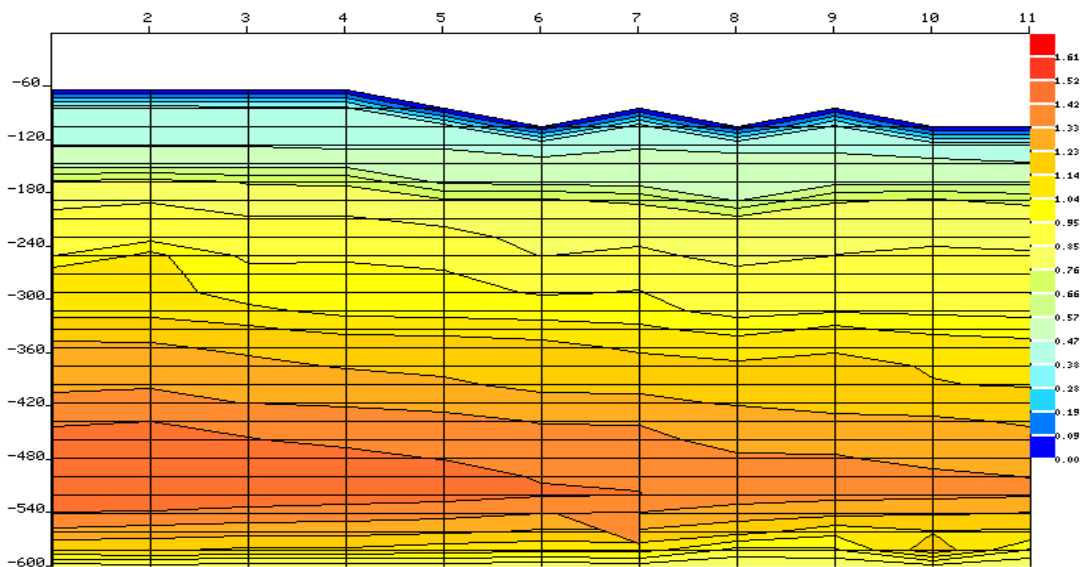
*Figura 12. Profundidad de las aguas*



Fuente: PhD. Dagoberto Bautista

Estas podrían contribuir también al infiltrarse en el suelo hasta llegar a la zona magmática, en donde se produce un calentamiento de la misma y debido a la presión que esta conlleva sale a la superficie formando surtidores intermitentes. Las rocas encontradas son blandas a duras, las rocas duras las ubicamos a la profundidad de 360 metros a 600 metros

*Figura 13. Infiltración de agua en el suelo*



Fuente: PhD. Dagoberto Bautista

#### **4.7. Discusión de los resultados**

- El análisis de los resultados en la tabla 6 indican que existe un equilibrio parcial de un 62% en todas las muestras, es decir, nos indica que las concentraciones de los elementos catiónicos y aniónicos están propensos a cambios por las concentraciones de los elementos con las rocas circundantes.
- Analizando las temperaturas mostradas en la tabla 7, se puede evidenciar que todas ofrecen posibilidades para la generación eléctrica. Los resultados obtenidos con los geotermómetros de Fournier y Giggenbach ofrecen posibilidades para el uso de plantas geotérmicas de alta entalpia y de condensación, por otro lado los geotermómetros de Truesdell, Díaz- Gonzalez y Arnórsson presentan la opción de generación de fluidos de muy bajo punto de ebullición que servirán para climatización ambiental empleando bombas de calor. En el caso de los primeros geotermómetros (Fournier y Giggenbach) es posible generar energía eléctrica con plantas de ciclo binario tal como la planta geotérmica de Zunil.
- En la gráfica 7 se muestra que existen características salinas típicas de los campos geotérmicos, el contenido aniónico muestra concentraciones sulfatadas que proporcionan indicios de alta salinidad en las aguas, de esta manera se deduce que la composición de las aguas geotérmicas estudiadas presentan altas concentraciones de sales evidenciado gráficamente en el campo romboidal del diagrama clasificándose las aguas como cloruradas y/o sulfatadas sódicas, teniendo un equilibrio parcial para la generación de energía geotérmica.
- A través de los resultados obtenidos en el diagrama de la figura 8, la distribución dentro del gráfico evidencia que el campo del Centro Turístico de Lomas de Tarragona ha alcanzado un grado de equilibrio parcial, sin embargo, esta se encuentra relativamente cercana al extremo de Magnesio (Mg), lo que indica que el agua termal en cuestión presenta una pequeña dilución o mezcla de aguas frías, lo que se evidencia por la concentración de Mg que se encuentra en las aguas analizadas. La temperatura estimada para este método se ubica entre 80 y 100°C. Es importante mencionar que dicho geotermómetro es utilizado para aguas termales con pH neutro.

- A través de los resultados obtenidos en el diagrama de la figura 9 se observa que la distribución de la composición química del campo de estudio se encuentra cerca del vértice de sílice en el diagrama de aguas volcánicas, evidenciando que son sulfatadas sódicas y /o cloruradas, lo que indica un equilibrio parcial.
- Relacionando los resultados de geotermómetros de sílice, la forma en que se presenta este compuesto es afectado por la temperatura yendo hasta bajos valores de temperatura. Conociendo que el sitio de lomas de Tarragona se encuentra a un costado de las faldas del volcán Cerro Quemado, siendo este un volcán tipo domo caracterizado por rocas ácidas tales como escoria volcánica, dasita y obsidiana, cuyo contenido de sílice es relativamente alto, permite deducir que existe cristobalita y por lo tanto es muy probable que se pueda encontrar temperaturas relativamente bajas.

Por otro lado existe la presencia de andesita cuyos orígenes están contaminados con rocas félsicas (micro cristales de sílice en rocas con matriz afanítica)

## **CAPITULO V: Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

1. En base a la tabla 7 existen posibilidades de hacer uso de la energía calorífica para la generación de electricidad, sin embargo, dicha energía puede utilizarse con fines medicinales, industriales y de recreación.
2. Los laboratorios de Calidad de Agua en Quetzaltenango permiten realizar análisis de elementos químicos utilizados en geotermómetros, especialmente para conocer la concentración de sílice en el agua a estudiar.
3. El estudio geofísico de Escaneo del suelo por medio de frecuencias Hz, permitió determinar la ruta por la cual fluye el agua geotermal, así como las rutas de infiltración de recarga del reservorio por las cuales entra agua meteórica acorde con la existencia de alto contenido de Mg como se muestra en la figura 8.

### **5.2 Recomendaciones**

1. Se recomienda revisar el estado actual de la tecnología de uso de fluidos de media y alta entalpia tanto para la generación eléctrica como uso de baja entalpia (climatización).
2. Se recomienda continuar con los estudios mineralógicos enfocados a determinar los porcentajes de los minerales de cristobalita, tridimita y cuarzo cristal para poder definir los resultados obtenidos con el geotermómetro de sílice cuyos resultados se muestran en la tabla 9.
3. Se recomienda utilizar miligramos por litro (mg/L) o partes por millón (ppm) para la utilización de los geotermómetros para no alterar el resultado.
4. Se recomienda que la universidad continúe con estudios geofísicos previos a una campaña de perforación exploratoria.

## **CAPITULO VI:**

### **6.1 Propuesta**

De acuerdo a los resultados obtenidos a través de los geotermómetros se puede utilizar la energía calorífica de las aguas del Centro Turístico Lomas de Tarragona para la utilización industrial como: calefacción industrial, secado de madera, calentamiento de procesos industriales, deshidratación de alimentos o para climatización de ambientes por medio de bombas de calor; todo mientras se continúe la realización de estudios más profundos de exploración geotérmica y así poder determinar si se puede utilizar para generación de energía eléctrica.

## VII: Bibliografía

Departamento de Energía. (2003). U.S.A.

Abarzúa, R. A. (Mayo de 2012). *CARACTERIZACIÓN GEOQUÍMICA DEL SISTEMA GEOTERMAL TERMAS DE PUYEHUE – AGUAS CALIENTES, REGIÓN DE LOS LAGOS, CHILE.*

Aguilar, K. I. (26 de 06 de 2013). *Ozunil y la Energía Geotérmica*. Obtenido de <http://www.incyte.org/incyte/content/orzunil-y-la-energ-geot-rmica>

Arnórsson, S. (2000). *Isotopic and Chemical Techniques in Geothermal Exploration, Development and Use. Sampling Methods, Data Handling, Interpretation*” International Atomic Energy Agency. Viena, Austria.

Corvalán, R. (Junio de 2011). *Energías Renovables no Convencionales* . Chile , Arica .

D’Amore & Arnórson. (2000). *Geothermometry*. En: S. Arnórsson, ed. *Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use*. Vienna: International Atomic Energy Agency.

Enciclopedia Cubana. (2010). *EcuRed*. Obtenido de Calidad del Agua: [https://www.ecured.cu/Calidad\\_del\\_Agua](https://www.ecured.cu/Calidad_del_Agua)

Energía Inteligente . (2016). *Energía Renovable, Ahorro en Costos y Sustentabilidad*. Obtenido de <http://respaldodeenergia.com/energia-renovable/?v=cd6a9bd2a175>

España, I. p. (Junio de 2008). *Manual de Geotermia*. Obtenido de [http://dl.idae.es/Publicaciones/10952\\_Manual\\_Geotermia\\_A2008.pdf](http://dl.idae.es/Publicaciones/10952_Manual_Geotermia_A2008.pdf)

González, E. (1995). *Energía Geotérmica* .

González, E. (2011). *Introducción a la Energía Geotérmica*. Guatemala: Taller de Energía Geotérmica.

Green Technology. (4 de Agosto de 2018). *Energías Renovables*. Obtenido de <http://ecoinventos.com/energias-renovables/>



- Instituto de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo . (26 de 06 de 2013). *Seguridad energética* . Obtenido de InCytDe: <http://www.incytde.org/incytde/content/orzunil-y-la-energ-geot-rmica>
- Jacobo, P. (2003). Gas chemistry of the Ahuachapán and Berlín geothermal fields. El Salvador.
- Manuel Alejandro Pacheco Acosta, L. S. (30 de Octubre de 2015). Metodología geoquímica aplicada a Fluidos Geotermiales. El Salvador .
- Marzolf, N. C. (14 de Diciembre de 2007). Emprendimiento de la Energía Geotérmica en Colombia . Colombia .
- MEM. (Octubre de 2018). Ajuste Tarifario. Guatemala.
- Ministerio de Industria y Energía . (1985). Analisis y valoracion de las tecnicas geofisicas aplicadas a la investigacion geotermica. España .
- Montalvo, F. E. (2015). Metodología geoquímica aplicada a fluidos geotermiales . El salvador .
- Nicholson. (1993). *Geothermal Fluids: chemistry and exploration techniques*.
- Partida, E. G. (Junio de 2001). Interaccion agua geotermica- manantiales en el campo geotermico de los Humeros . México , Puebla .
- Powell y Cumming. (2010). *Hoja de calculo Excel*. Obtenido de Liquid\_Analysis\_v1\_Powell-2010-StanfordGW.xls
- PROL-LEDESMA, R. M. (1998). *EXPLORACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS*. Obtenido de <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/058/htm/tierra.htm>
- Renderos, R. (2002). Chemical Characterization of the Thermal Fluid Discharge from Well Production Tests in the Berlin Geothermal Field. El Salvador.

Rodríguez, L. S. (2008). hree New Improved Na/K Geothermometers Using Computational and Geochemiometrical Tools: Application to the Temperature Prediction of Geothermal Systems. *Ciencia Geologica* , 25.

Servicio Geológico Mexicano. (22 de Marzo de 2017). *Geotermia*. Obtenido de gob.mx: [https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones\\_geologicas/Geotermia.html](https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Geotermia.html)

Víctor Arellano Gómez. (Octubre de 1999). *Geotermia*. México. Obtenido de <https://www.ineel.mx//reno99/decada.pdf>

## VIII.: Anexos

### 8.1. Instrumentos

#### 8.1.1 Ficha Técnica de la Toma de Muestra de Agua

Numero de muestra

Nombre del solicitante \_\_\_\_\_ Fecha \_\_\_\_\_

Nombre del colector de la toma de muestra \_\_\_\_\_

Fecha de la realización de la toma de muestra \_\_\_\_\_

Hora de la realización de la toma de muestra \_\_\_\_\_

Tipo de fuente hídrica \_\_\_\_\_

Lugar de la realización de la toma de muestra \_\_\_\_\_

#### 8.1.2 Ecuaciones empíricas de Geotermómetros acuosos

##### a. Ecuaciones para geotermómetros de Na/K

$$T(^{\circ}C) = \frac{1217}{\log \frac{Na}{K} + 1.403} - 273.15 \quad (\text{Fournier, 1977})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{855.6}{\log \frac{Na}{K} + 0.8573} - 273.15 \quad (\text{Truesdell, 1976})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{1390}{\log \frac{Na}{K} + 1.75} - 273.15 \quad (\text{Giggenbach, 1988})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{933}{\log \frac{Na}{K} + 0.933} - 273.15 \quad (\text{Arnórsson, 1983})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{833}{\log \frac{Na}{K} + 0.908} - 273.15 \quad (\text{Díaz -González, et al., 2008})$$

## b. Ecuaciones para geotermómetros de K<sup>2</sup>/ Mg

$$T(^{\circ}C) = \frac{4410}{14 - \log \frac{K^2}{Mg}} - 273.15 \quad (\text{Giggenbach, 1983 b})$$

$$T(^{\circ}C) = \frac{2330}{7.35 - \log \frac{K^2}{Mg}} - 273.15 \quad (\text{Fournier, 1991})$$

## c. Ecuaciones para geotermómetros de SiO<sup>2</sup>

- $T(^{\circ}C) = 731 \div (4.52 - \log SiO^2) - 273.15$  (Amorphus Silica, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 1000 \div (4.78 - \log(SiO^2)) - 273.15$  (Alpha Cristobalite, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 781 \div (4.51 - \log(SiO^2)) - 273.15$  (Beta Cristobalite, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 1032 \div (4.69 - \log(SiO^2)) - 273.15$  (Chalcedony Conductive, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 0.00000031665 \times SiO^2 - 0.00036686 \times SiO^2 + 0.28831 \times SiO^2 + 77.034 \times \log SiO^2 - 42.198$  (Quartz Conductive, Fournier 1985)
- $T(^{\circ}C) = 1522 \div (5.75 - \log SiO^2) - 273.15$  (Quartz Adiabatic, Fournier 1985)

Corrección de Verma & Santoyo (1997):

- $T(^{\circ}C) = -44.119 + 0.24469 \times SiO^2 - 1.7414 \times 10^{-4} \times SiO^2 + 73.305 \times \log SiO^2$

## 8.1.3 Ecuaciones empíricas de Geotermómetros de Gases

Geotermómetro	Ecuación Empírica	Aplicabilidad
D'Amore y Panichi (DAP, 1980)	$T(^{\circ}C) = \frac{24775}{2 \log \frac{CH_4}{CO_2} - 6 \log \frac{H_2S}{CO_2} - 7 \log PCO_2 + 36.05} - 273.15$	Hasta 350 °C
Fischer-Tropsch (FT, Giggenbach, 1980)	$\log P_{CO_2} + 4 \log P_{H_2} - 2 \log P_{CH_4} = 10.76 - \frac{9323}{T}$	Hasta 350 °C
Nitrógeno- Amoniaco- Hidrógeno (NAH, Giggenbach, 1980)	$\log P_{N_2} + 3 \log P_{H_2} - 2 \log P_{NH_3} = 11.8 - \frac{5400}{T}$	Hasta 350 °C
Sulfuro de Hidrógeno- Hidrógeno (HSH, Giggenbach, 1997)	$3 \log P_{H_2S} - \log P_{H_2} = 15.71 - \frac{1041}{T}$	Hasta 350 °C

(Manuel Alejandro Pacheco Acosta, 2015)

## 8.2 Anexos fotográficos



Equipo para la determinación de temperatura y parámetros físicos



Recolección de muestras de agua en el lugar de estudio



Medición de temperatura



Medición de parámetros físicos



Equipo para la realización de sondeo eléctrico vertical



Realización de sondeo eléctrico vertical

### 8.3 Cronograma

Mes	Agosto				Septiembre				Octubre				Noviembre			
Semanas	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV
Actividades																
Presentación de Seminario I																
Toma de puntos de ubicación del centro turístico Lomas de Tarragona utilizando GPS																
Toma de muestras de aguas termales en el centro turístico Lomas de Tarragona																
Realización de análisis físicos de las muestras de aguas termales																
Realización de análisis químicos de las muestras de aguas termales																
Realización de ecuaciones empíricas de geotermómetro																
Interpretación de análisis e interpretación de resultados																
Entrega final del documento de investigación																

## 8.4 Presupuesto

Recurso	Cantidad y tiempo de uso	Valor unitario (Q.)	Costo Total (Q.)	Fuente
Equipo Multiparámetro	1 equipo multiparámetro 8 horas de uso	Q.100.00	Q.800.00	EMAX
Termómetro	1 termómetro 8 horas de uso	Q.80.00	Q.640.00	USAC/CUNOC
Equipo de laboratorio	8 horas de uso	Q.30.00	Q.240.00	EMAX
Análisis Químicos	6	Q. 500.00 c/u	Q.3000.00	EMAX
Frascos para la toma de muestras (estériles)	2 frascos	Q.15.00	Q.30.00	EMAX
Guantes de látex	4	Q.2.00	Q.8.00	Tesista
Marcadores de tinta indeleble	1	Q.15.00	Q.15.00	Tesista
Masking tape	1	Q.5.00	Q.5.00	Tesista
Cámara digital	1 cámara digital 4 horas de uso	Q.30.00	Q.120.00	Tesista
Linterna	1	Q.15.00	Q.15.00	Tesista
Equipo de transporte	1	Q.75.00	Q.75.00	EMAX
Agua destilada	1	Q.10.00	Q.10.00	EMAX
GPS	1 GPS 4 horas de uso	Q.25.00	Q.100.00	Oficina de Información Geográfica Municipalidad Quetzaltenango

Papel toalla	1	Q.10.00	Q.10.00	EMAX
Equipo de computo	1 computadora 8 horas de uso	Q.25.00	Q.200.00	Tesista
Internet	8 horas de uso	Q.5.00	Q.40.00	Tesista
Impresiones	50	Q.0.50	Q.25.00	Tesista
Teléfono celular	1 teléfono celular 4 horas	Q.5.00	Q.20.00	Tesista
Libreta de campo	1	Q.10.00	Q.10.00	Tesista
Papelería y útiles de oficina (lapiceros, hojas de papel bond)		Q.50.00	Q.50.00	Tesista
Transporte	1 vehículo 2 galones de combustible por visita	Q.27.00	Q.54.00	Tesista y EMAX
Personal calificado	1 personas 16 horas de trabajo al mes	Q.500.00 por 4 horas de trabajo	Q.8,000.00	
Total			Q.13,467.00	