

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA**



TESIS

**“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOQUÍMICA DE
FLUIDOS EN EL SISTEMA GEOTÉRMICO ARARÓ,
MICHOACÁN, MÉXICO”**

PRESENTA

ANA JULIA VIGIL BARRIENTOS

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS**

NOVIEMBRE, 2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



La Tesis

“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOQUÍMICA DE FLUIDOS EN
EL SISTEMA GEOTÉRMICO ARARÓ, MICHOACÁN, MÉXICO”

Que presenta

ANA JULIA VIGIL BARRIENTOS

Ha sido aceptada como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.

Director de Tesis

M.C. AUGUSTO ANTONIO RODRÍGUEZ DÍAZ

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

NOVIEMBRE DE 2017



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA



La Tesis

“CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA Y GEOQUÍMICA DE FLUIDOS EN EL
SISTEMA GEOTÉRMICO ARARÓ, MICHOACÁN, MÉXICO”

Que presenta

ANA JULIA VIGIL BARRIENTOS

Ha sido aceptada como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS GEOLÓGICAS

Vo. Bo.
Comité de Titulación

M.C. Augusto Antonio Rodríguez Díaz
Director de Titulación

Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández
Co-Director de Titulación

M.C. Andrés Ramos Ledezma
Co-Director de Titulación

LINARES, NUEVO LEÓN, MÉXICO

NOVIEMBRE, 2017

Por este conducto declaro bajo protesta que este trabajo ha sido desarrollado personalmente con el apoyo del Comité de Titulación. Toda la información utilizada para este estudio ha sido citada debidamente.

Ana Julia Vigil Barrientos

Noviembre de 2017

"El peor error es no hacer nada por pensar que es poco lo que se puede hacer".

E. BURKE

DEDICATORÍA

A quienes luchan por sus sueños.

A mis padres, a mi esposo.

Los Amo.

AGRADECIMIENTOS

A Dios simplemente por permitirme estar donde estoy.

*A mis padres, **Gloria Barrientos** y **Maximiano Vigil**, a mi hermano **Luis Vigil** por todo el esfuerzo y apoyo que me brindaron a lo largo de esta etapa, por alentarme a entrar al posgrado y sobre todo por todas las palabras de aliento cuando estaba por decir adiós.*

*A la **Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL)** y al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT)** por las becas otorgadas durante los estudios de posgrado. A la **Facultad de Ciencias de la Tierra (FCT)** por el apoyo económico a través del Programa Integral del Fortalecimiento Institucional (PIFI), que se tradujo en estancias de investigación en el **Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM)**.*

*El trabajo de tesis, salida a campo, análisis químicos, fue financiado por el proyecto # 207032-2013-04 P02 “**Mapa de provincias geotérmicas de México a partir de la geoquímica de fluidos y distribución de acuíferos: herramienta para la exploración y desarrollo de recursos geotérmicos convencionales**” del Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (**CeMIE-Geo**) Fondo Sectorial CONACYT-SENER-Sustentabilidad Energética a cargo de la **Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada**, a quien agradezco por todo su apoyo, atenciones y conocimiento compartido.*

*En especial agradecer enormemente a mi asesor, tutor, maestro, amigo, al **M.C. Augusto Antonio Rodríguez Díaz** por su apoyo académico y personal durante la maestría y por brindarme la oportunidad de realizar mi posgrado.*

*A mis asesores internos, el **M.C. Andrés Ramos Ledezma** y el **Dr. Juan Alonso Ramírez Fernández** por su interés en el trabajo, el tiempo invertido, paciencia, comentarios y orientación en la elaboración de la tesis.*

*A todas las personas del equipo de trabajo de la unidad de Geoquímica de Fluidos Geotérmicos, que hicieron de mi estancia en el Instituto de Geofísica de la UNAM, a cargo de la **Dr. Ruth Esther Villanueva Estrada**, fuese de lo más placentero. A la **IBQ Blanca Xóchitl Felipe Martínez** por la colaboración en el cromatógrafo iónico para medición de aniones y cationes, capacitación y preparación de las muestras y a la **Dra. Ma. Teresa de Jesús Rodríguez-Salazar** del Depto. de Química Analítica, Facultad de Química / Depto. De Recursos Naturales, Instituto de Geofísica, UNAM, por su colaboración para el análisis de i) CRDS, ii) ICP-AOS y en la capacitación para la preparación de material y muestras para ambos análisis.*

A Carlos Linares del Laboratorio Universitario de Petrología por el apoyo en mediciones, al Laboratorio de Petrografía y Microtermometría del Departamento de Recursos Naturales del

Instituto de Geofísica por las mediciones de SWIR y SEM, al el Dr. Rubén Bernard por su apoyo en campo, en las mediciones in situ y el soporte durante la campaña de campo y muestreo. A el Ing. Roberto Rocha, Ing. Antolín, Ing. David Avalos Tapía.

Al personal administrativo de la FCT, especialmente a la subdirección de posgrado a cargo del Dr. Fernando Velasco Tapia y ahora al Dr. Carlos Gilberto y a Karla Casas por ayudarme siempre con los trámites.

A mis compañeros de Posgrado: Xavier, Magdaleny, Myriam, Meme, Chava, Chucho, Ángelo, Simón, Christian, Merlo, Carlos, Jovany, el Sr. Raúl, Dessiré, Anita, Márgil, Danny, Sahid, Many, Adrián, Cesar, sin ustedes el posgrado no habría sido el mismo. Los extrañaré muchísimo.

A Floresita, amiga, gracias por siempre estar. Y a todos mis demás amigos.

Por último y con especial aprecio a mi esposo Xavier Pérez, quien no solo es esposo, es amigo y compañero, por ser una maravillosa persona y quien me da su apoyo incondicional en todo momento, sin ti, este trabajo no habría sido concluido. Gracias por todo este tiempo a mi lado y por todo lo que has hecho por mí; gracias amor.

Por último a todas las personas que llegué a omitir involuntariamente, pero que me han mostrado amistad a lo largo de este trabajo.

	Pág.
LISTA DE FIGURAS.....	I
LISTA DE TABLAS.....	III
RESUMEN.....	IV
ABSTACT.....	VI
1. GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.2 ANTECEDENTES.....	5
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.4 OBJETIVO.....	7
1.4.1 OBJETIVO GENERAL.....	7
1.4.2 OBJETIVOS PARTICULARES.....	7
1.5 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	8
2. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS GEOTÉRMICOS	9
2.1 HISTORIA DE LA GEOTERMIA.....	9
2.2 NATURALEZA DE LOS RESERVORIOS GEOTÉRMICOS.....	10
2.3 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS RESERVORIOS GEOTÉRMICOS.....	13
2.4 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN.....	17
2.4.1 PROSPECCIÓN QUÍMICA.....	18
2.4.2 GEOTERMÓMETROS.....	19
2.4.3 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA.....	20
2.4.4 PERFORACIÓN DE POZOS.....	21
2.5 UTILIZACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS.....	21
3. MARCO GEOLÓGICO	23
3.1 GEOLOGÍA REGIONAL.....	23
3.2 GEOLOGÍA LOCAL.....	26
3.2.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL.....	28
3.2.2 MANIFESTACIONES TERMALES.....	30
4. METODOLOGÍA	35
4.1 CAMPAÑA DE MUESTREO.....	35
4.2 SITIOS DE MUESTREO.....	36

4.3 PETROGRAFÍA.....	37
4.4 DIFRACCIÓN DE RAYOS X	38
4.5 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO	39
4.6 ESPECTROMETRÍA DE INFRARROJO DE ONDA CORTA.....	41
4.7 CROMATOGRAFÍA IÓNICA	42
4.8 ESPECTRÓMETRO LÁSER CRDS PARA ISOTÓPOS ESTABLES.....	43
4.9 TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ATÓMICA	45
5. RESULTADOS	47
5.1 MANIFESTACIONES LA REGIÓN DE ARARÓ Y SAN AGUSTÍN DEL PULQUE.	47
5.2 ALTERACIONES HIDROTERMALES	58
ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS FLUIDOS TERMALES.....	60
6. DISCUSIÓN	68
6.1 ALTERACIONES HIDROTERMALES	68
6.2 ESTRUCTURAS RELACIONADAS AL SISTEMA GEOTÉRMICO	72
6.3 RESULTADOS DE LA GEOQUÍMICA.....	73
6.4 PLAY GEOTERMICO.....	74
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	75
7.1 CONCLUSIONES.....	75
7.2 RECOMENDACIONES	76
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78
ANEXOS	83

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1:1 Ubicación de los campos geotérmicos principales de México, así como su capacidad instalada y en operación representada en MW (Gutierrez-Negrín et al.,2015).</i>	1
<i>Figura 1:2 Localización del área de estudio. La región Geotérmica de Araró (estrella amarilla) se encuentra al SW del poblado de Araró y al NE del poblado de Zimirao.</i>	8
<i>Figura 2:1 La corteza, manto y núcleo de la Tierra. Arriba a la derecha: una sección a través de la corteza y del manto superior (tomada de IGA, 2015).</i>	10
<i>Figura 2:2 Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal (Rodríguez-Díaz, 2015).</i>	12
<i>Figura 2:3 Diagrama que muestra las diferentes categorías de recursos geotérmicos. (Tomado de Muffler y Cataldi, 1978). El eje vertical es el grado de viabilidad económica; El eje horizontal es el grado de aseguramiento geológico.</i>	14
<i>Figura 2:4 Diagrama que muestra la utilización de fluidos geotérmicos (Lindal, 1973).</i>	22
<i>Figura 3:1 Mapa que muestra la ubicación del Cinturón Volcánico Mexicano, la estrella amarilla muestra la región de Araró y sus alrededores (Modificado de Gómez-Tuena, 2005).</i>	23
<i>Figura 2:2 Mapa Geológico a detalle de la zona de Araró y alrededores (Modificado de INEGI., 2016).</i>	25
<i>Figura 3:3 Mapa geológico de la región de Araró, Michoacán. (Tomado y modificado de García Peralta, 2017).</i>	27
<i>Figura 3:4 Columna estratigráfica local de la región de Zimirao, en base a los principales afloramientos (García Peralta, 2017).</i>	28
<i>Figura 3:5 Imagen satelital que muestra los lineamientos presentes (rosa) en la región de Araró y San Agustín del Pulque. (Tomado de Google Earth).</i>	29
<i>Figura 3:6 Imagen satelital que las manifestaciones (morado) en la región de Araró y San Agustín del Pulque.</i>	30
<i>Figura 3:7 Manantial gas-hidrotermal de Zimirao con emanaciones de gas con olor fétido, la línea amarilla es el escarpe de falla con dirección NE-SW15°.</i>	31
<i>Figura 3:8 Manantial termal en Los Hervideros con emanaciones de líquido y gas.</i>	32
<i>Figura 3:9 Sedimentos denominados salineras desarrollados en el área de alteración.</i>	32
<i>Figura 3:10 Desarrollo de terrazas con crecimiento hacia la superficie por actividad hidrotermal representadas dentro de la elipse color amarillo.</i>	33
<i>Figura 3:11 Depósitos hidrotermales desarrollados adyacentes al manantial termal de Huíngo. A) La presencia de biofilmes en tonalidades verdes y naranjas está asociada a estos depósitos y B) En la imagen se aprecian las esferas silicocarbonatadas de color blanco.</i>	33
<i>Figura 3:12 Imagen que muestra sedimento de San Agustín de Pulque, se aprecian organismos, como tallos, diatomeas y algunas pantas.</i>	34
<i>Figura 4:1 Presenta las localidades termales muestreadas (estrellas).</i>	36
<i>Figura 4:2 Microscopio Zeiss con analizador de imágenes utilizado para la descripción petrográfica de las muestras.</i>	38
<i>Figura 4:3 Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D, del Laboratorio de Difracción de Rayos X, del Departamento de Geoquímica, en el Instituto de Geología, UNAM.</i>	39
<i>Figura 4:4 Imagen del MEB utilizado para los análisis mineralógicos.</i>	40
<i>Figura 4:5 Imagen del espectrómetro portátil LabSpecPro utilizado para realizar los análisis de SWIR.</i>	42
<i>Figura 4:6 Cromatógrafo Iónico, Dionex ICS 5000+ DC.</i>	43
<i>Figura 4:7 CRDS (Analizador de isótopos estables), Laboratorio de UGFG del instituto de Geofísica de la UNAM.</i>	45
<i>Figura 4:8 Componentes del ICP-OES.</i>	46
<i>Figura 4:9 ICP-OES (Analizador de elementos traza) del laboratorio UGFG, de la UNAM.</i>	46
<i>Figura 5:1 Ubicación de manifestaciones termales con el patrón alineamiento que tienen, fallas presentes y el límite de la alteración hidrotermal en la zona geotérmica de Araró.</i>	47
<i>Figura 5:2 Poza de lodo de Zimirao con emanaciones de gas con olor fétido.</i>	48

Figura 5:3 Minerales depositados en el sedimento del manantial termal. Imágenes de SEM y análisis EDS (muestra SS-5). a) Cinabrio dispuesto entre las partículas de silicatos del sedimento. b) Espectro EDS evidenciando la presencia del mineral de mercurio cinabrio c) Espectro EDS del mineral titanomagnetita d) Titanomagnetita hexagonal, procedente de la roca encajonante.	48
Figura 5:4 Depósitos asociados a la fumarola. A) Imagen de costras de ópalo formadas en la pared de la barda al pie de la fumarola B) Imagen de la fumarola.	49
Figura 5:5 Imágenes del análisis de alteraciones de suelo. A) Imagen de tablillas del mineral de Illita. B) Imagen general de las partículas sólidas que componen el suelo en su mayoría de sílice. C) Imagen de un cuarzo bipiramidal como componente del suelo. D) Imagen del mineral de ulexita con una morfología similar a la de tablillas de diferentes tamaños.	50
Figura 5:6 Balneario de Huingo. Emanación de fluidos desde un sustrato de sedimentos.	51
Figura 5:7 A) Barita detectada en sedimentos mineralizados del Balneario Huingo y B) Mineral de arsenopirita (centro) observado mediante MEB en sedimento del Balneario Huingo; incluye espectro EDS donde predominan los elementos arsénico, aluminio, potasio y hierro además del silicio.	51
Figura 5:8 Organismos presentes en sedimento mineralizado del área de Huingo; muestra BH1-10 a) Diatomea con buena preservación, b) parte de planta incrustada en matriz de ópalo. Imágenes obtenidas mediante MEB.	52
Figura 5:9 Estructura de depósito tipo sínter. Desarrollado por la precipitación en superficie de soluciones hidrotermales ricas en sílice.	52
Figura 5:10 Estructuras fibrosas en muestra de sínter, posiblemente cianobacterias. Muestra SH, objetivo: 10x, NII.	53
Figura 5:11 Diatomeas presentes en muestra SH (Sinter Huingo). La mineralogía presente es mayormente ópalo con escasos minerales y abundantes restos de organismos.	53
Figura 5:12 Carbonato concéntrico y diatomea (sector derecho) en matriz de ópalo con textura coloforme. Muestra MAR-6, objetivo 20x, NII.	54
Figura 5:13 Difractograma de la muestra BH2-2 en un sector con tonalidad oscuro. Destacan el ópalo y tridimita como minerales abundantes.	55
Figura 5:14 Espectro de EDS obtenido mediante MEB en un mineral altamente reflectante en muestra BH2-1, correspondiente a sedimento del área de Los Hervideros. Se identifica este mineral como arsenopirita. ...	55
Figura 5:15 Muestra EQ11, San Agustín del Pulque, A) Organismos tabulares, posibles troncos o ramas y B) Presencia de diatomeas y algunos feldespatos alterados.	56
Figura 5:16 EDS de la muestra el Fe, probablemente Titanomagnetita en la muestra EQ11.	56
Figura 5:17 Fotografía de muestra EQ11 tomada en el SEM de muestra EQ11, Clasto brillante de Pirita heredado de la roca encajonante.	57
Figura 5:18 EDS de muestra EQ11 de las diatomeas, donde se aprecia la predominancia del sílice.	57
Figura 5:19 A) Muestra de mano MPL-11, B) Análisis de SWIR, donde se aprecia la línea roja que arroja el dato de calcedonia, C) Análisis de SWIR, donde se aprecia el espectro del ópalo el cual es la línea roja.	58
Figura 5:20 A) Muestra de mano MLP-12, B) Análisis del SWIR, donde la línea roja muestra el espectro arrojado de cuarzo.	58
Figura 5:21 Muestra MAR-11. Alteración hidrotermal presente en rocas andesita-basalto asociadas a la Falla Huingo (a y b). Nótese la orientación preferencial de los cristales. 2.5X, NII.	59
Figura 5:22 Muestra de mano mar-11, espectro de SWIR, donde se aprecia la línea roja que corresponde a montmorillonita.	59
Figura 5:23 Gráfico que muestra la distribución de las muestras con isótopos estables de D y ^{18}O . Agua subterránea del estado de Michoacán reportada por Vasegnarr.	63
Figura 5:24 Relación de la línea de agua con la del agua meteórica.	64
Figura 5:25 Diagrama de Na-K-Mg para los cinco campos geotérmicos en estudio. (Elaboración propia). .	65
Figura 5:26 Diagrama de Giggenbach para Campos Geotérmicos en Estudio. (Elaboración propia).	66
Figura 5:27 Diagrama de Piper-Hill-Langelier para los cinco campos geotérmicos en estudio. (Elaboración propia).	67

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Fuente: Clasificación de Sistemas Geotérmicos de Acuerdo a su Temperatura.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabla 2. Muestra los isotopos estables.</i>	<i>44</i>
<i>Tabla 3 Parámetros fisicoquímicos.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabla 4 Estimación de la temperatura, de reservorio empelando geotermómetro, catiónicos y de sílice.</i>	<i>61</i>
<i>Tabla 5 Isótopos estables y temperaturas de las muestras de campo</i>	<i>62</i>

RESUMEN

La región de Araró, ubicada al este del Lago de Cuitzeo, en el norte del estado de Michoacán, presenta diversas manifestaciones termales que incluyen los manantiales de Huingo, Hervores, La Salud, Zimirao y San Agustín del Pulque con descargas acuosas y de gases con temperaturas promedio de 85 °C a 100 °C, pozos termales, alteraciones hidrotermales y depósitos de tipo sinter, Estas manifestaciones y alteraciones en las zonas termales revelan el potencial geotérmico de la zona. Geológicamente la zona de Araró comprende litologías piroclásticas ácidas y derrames andesíticos afectadas por fallas normales de orientaciones preferenciales E-W y NW-SE volcánicas. Estas fallas controlan la presencia de los manantiales termales.

El objetivo de este trabajo es caracterizar las asociaciones minerales de las alteraciones hidrotermales y depósitos de sinter relacionadas con la actividad termal, así mismo la química de los fluidos termales para conocer el tipo de agua y la temperatura del reservorio de la zona sur de Araró. Esta investigación está beneficiada por el Proyecto P02 del CeMIE-Geo “Mapa de provincias geotérmicas de México a partir de la geoquímica de fluidos y distribución de acuíferos”. La identificación y caracterización de los minerales se realizó mediante la microscopía óptica de luz reflejada y transmitida, asimismo para complementar los estudios mineralógicos se utilizaron técnicas determinativas y cualitativas mineralógicas: Difracción de rayos X, Espectroscopia de Infrarrojo de onda corta y Microscopía electrónica. La química del agua se llevó a cabo con mediaciones de aniones y cationes, mediante cromatografía iónica, mediciones de elementos traza, isotopos estables y aplicación de geotermómetro de SiO₂.

Los depósitos de sinter se componen de fases de sílice (ópalo a cuarzo criptocristalino) y abundantes diatomeas, las texturas y fases de sílice diagenéticas denotan condiciones prolongadas de actividad termal en un ambiente relativamente de baja energía. Los depósitos y alteraciones incluyen sinter silícicos, vetillas, brechas, sedimentos mineralizados y alteración argílica en la roca. La asociación mineral identificada consiste de ópalo, cuarzo, minerales de arcilla (esmectita, ilita), zeolita, marcasita, arsenopirita, pirita, cinabrio, estibinita, barita, ramsdellita, casiterita, ulexita, y apatito esta asociación denota termalismo activo, con fluidos termales de pH alrededor del neutro y de temperaturas considerables, siendo de importancia la asociación de minerales de arcilla y sulfuros y los depósitos de sinter como indicadores del potencial geotérmico de la zona.

El fluido hidrotermal es de tipo sódico-clorurado, con pH entre 6 y 7, sólidos totales disueltos y elementos traza, presenta un enriquecimiento en sílice elementos o iones.

El geotermómetro de sílice, validado por depósitos de sílice superficiales, calculado es de 220 °C. Este valor estimado para el reservorio es compatible con la presencia de depósitos de sínter silicio en la superficie.

El sector ubicado en dirección S-SE de los Balnearios de Huingo y Los Hervideros, se propone como zona de interés para continuar con pozos explotarios.

ABSTRACT

The Araró region, located east of Lake Cuitzeo in northern Michoacan state, has several thermal manifestations that include the Huingo, Hervores, La Salud, Zimirao and San Agustín del Pulque springs with aqueous discharges and gases with temperatures of 85 °C at 100 °C, thermal wells, hydrothermal alterations and deposits of sintered type, these manifestations and alterations in the thermal zones reveal the geothermal potential of the area. Geologically, the Araró zone comprises acidic pyroclastic lithologies and andesitic spills affected by normal faults of preferential E-W and NW-SE volcanic orientations. These faults control the presence of thermal springs.

The objective of this work is to characterize the mineral associations of the hydrothermal alterations and sintered deposits related to the thermal activity, as well as the chemistry of the thermal fluids to know the type of water and the temperature of the deposit of the Araró zone. This research is funded by CeMIE-Geo's P02 Project "Map of Mexico's geothermal provinces of fluid geochemistry and aquifer distribution". The identification and characterization of the minerals are made by light microscopy of the reflected light and the transmission, also to complement the mineralogical studies were used mineralogical determinants and qualitative techniques: X-ray diffraction, short-wave infrared spectroscopy and electron microscopy. The water chemistry was carried out with the anions and mean anions, using chromatography, trace element measurements, isotopes, and the use of the SiO₂ geothermometer.

Sintering deposits are composed of silica (opal, cryptocrystalline quartz) phases and abundant diatoms, textures and diagenetic sinusoidal phases denote the prolonged conditions of thermal activity in a relatively low energy environment. The deposits and alterations include sinterisks, veins, lagoons, mineralized sediments and argillic alterations in the rock. The association identified with opal, quartz, clay minerals (smectite, illite), zeolite, marcasite, arsenopyrite, pyrite, cinnabar, sibbinite, barite, ramsdellite, cassiterite, ulexite and apatite is associated with the active thermal fluid. Temperatures, being important the association of minerals and sulphides of clay and sinter deposits as indicators of the geothermal potential of the area.

The hydrothermal fluid is chlorinated sodium, with pH between 6 and 7, total dissolved solids and trace elements, has an enrichment in elements of silicon or ions.

The silica geothermometer, validated by surface silica deposits, calculated is 220 °C. This estimated value for the deposit is compatible with the presence of surface synthesis deposits.

The sector located in the S-SE direction of the Spas of Huingo and Los Hervideros, is proposed as an area of interest to continue the exploitation of wells.

1. GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente la industria de energías alternas, como lo es la energía geotérmica, se encuentra en una situación favorable a nivel global y nacional. México ocupa el 4° lugar mundial en producir este tipo de energía (SENER, 2015). El país cuenta con plantas geotérmicas que producen más de 570 MW siendo estas: Cerro Prieto y Tres Vírgenes en el estado de Baja California Norte, y los Azufres y los Humeros, situados en el Cinturón Volcánico Mexicano (Figura 1.1). Por su contexto geológico México ofrece los escenarios favorables: Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) y distensivos con la apertura del Golfo de California, para la presencia de manifestaciones termales (Prol-Ledesma & Juárez, 1986; Hiriart-Le Bert, 2011).

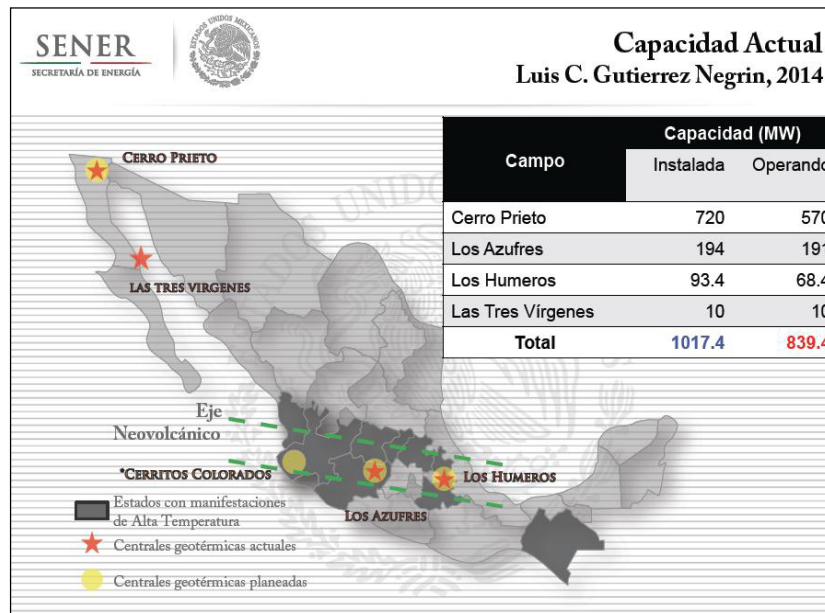


Figura 1:1 Ubicación de los campos geotérmicos principales de México, así como su capacidad instalada y en operación representada en MW (Gutierrez-Negrin et al., 2015).

En diciembre del 2013 se realizaron correcciones a tres artículos constitucionales por los congresos federales y estatales de México referentes a los sectores eléctricos y de hidrocarburos, lo que constituye la Reforma Energética Nacional. A partir de ésta se crearon dos leyes, aprobadas en agosto de 2014 y publicadas en el Diario Oficial de la Federación. Estas leyes generan un mercado de exploración y explotación de energía geotérmica

(SENER, 2015) con la participación tanto de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), como de particulares nacionales y extranjeros, a través de concesiones que licitará la Secretaría de Energía o la solicitud específica de zonas. Adicionalmente a este marco legislativo y político para fomentar la energía geotérmica, se generó el Centro Mexicano para la Innovación en Energía Geotérmica (CeMIE-Geo), organismo académico industrial y gubernamental con el objetivo de promover y acelerar el uso y desarrollo de la energía geotérmica en nuestro país (<http://www.cemiegeo.org/index.php/quienesSomos>). El CeMIE-Geo cuenta con el apoyo de la Secretaría de Energía y del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT). Dentro de los objetivos específicos del CeMIE-Geo se pretende la generación de recursos energéticos y humanos (<http://www.cemiegeo.org/index.php/quienesSomos>).

El aumento desmedido de la población en el mundo está estrechamente ligado con un incremento en el uso de recursos naturales para producir distintos tipos de energías particularmente la eléctrica, la cual utiliza los hidrocarburos como recurso primordial para su generación. La exploración y aprovechamiento de los diferentes tipos de energías tienen impactos en el ambiente durante su desarrollo, especialmente aquellas derivadas de los combustibles fósiles. Durante la extracción del recurso hasta la entrega de los servicios de energía, los contaminantes se producen, se emiten o se desechan y en ocasiones tienen graves impactos en la salud pública y en el ambiente. Ante tal situación las energías renovables, por ejemplo la geotermia, permiten producir energía de forma estable y puede ser suministrada por periodos largos de tiempo y sin repercusiones considerables al ambiente. México se encuentra en una de las regiones con mayor potencial geotérmico del mundo y cuenta con ventajas comparativas al ser un país con un contexto geológico propicio para este tipo de energía. La exploración geotérmica en el país comenzó en el año de 1959, cuando se instaló la primera planta geotérmica en Pathé, Hidalgo, a través de la CFE, produciendo 3,500 kilovatios.

Ante el contexto nacional reciente sobre el fomento a las energías renovables, México se ha comprometido en las recientes leyes en materia energética. Se tiene contemplado aumentar de un 25% a 35% la generación de electricidad a partir de energías renovables para el año 2024 (<http://www.gob.mx/presidencia/prensa/mexico-tiene-un-compromiso-para-cuidarel-medio-ambiente-e-pn>). Adicionalmente, el gobierno nacional ha externado en

foros internacionales la visión de un país que sea potencia en materia de energías limpias, un impulso que representará el 69% de toda la electricidad generada en este país para el año 2040, apuntó el organismo Bloomberg New Energy Finance (BNEF, 2015). Estas disposiciones están acordes con el compromiso de México sobre el cambio climático en el marco del acuerdo de París, para disminuir a la mitad sus emisiones contaminantes para el año 2050.

El potencial del sector de las energías renovables, así mismo, representa una enorme oportunidad de inversión en el país, calculada en 186,000 millones de dólares en los próximos 25 años, (SENER, 2015)

El impulso que se genera para la geotermia, involucrá la inversión nacional y extranjera en materia de exploración y explotación. Respecto a la exploración, actualmente se tienen documentadas más de 2,000 manifestaciones termales en el territorio nacional (ProLedesma & Juárez, 1986), de las cuales se cuentan Ixtlán de los Hervores, Los Negritos, Los Azufres, La Primavera, San Marcos, Hervores de la Vega, La Soledad, Los Humeros y Araró Michoacán, áreas con presumible potencial energético para la exploración a detalle (Mercado *et al.*, 1982).

La exploración geotérmica de estas regiones ha sido abordada por la CFE y algunos estudios aislados elaborados por la comunidad académica (e.g. La Primavera, Jalisco, 1912, Piedras de Lumbre, Chihuahua, 1941; Araró, Michoacán 2011). Sin embargo, mucha de la información sobre las características de estas zonas geotérmicas es inaccesible o insuficiente. Teniendo en cuenta este contexto es necesario realizar estudios de exploración que sustenten la identificación de *plays* geotérmicos con una evaluación de su potencial. Dentro de la exploración geotérmica se tienen a las exploraciones: geológica, geoquímica y geofísica como las metodologías a seguir para el desarrollo de un proyecto energético (Hiriart-Le Bert, 2011).

Para poder llevar a cabo el estudio de zonas con interés geotérmico es necesario conocer y analizar las expresiones de termalismo que se ubican dichas zonas, tales como manantiales termales y alteraciones hidrotermales. La investigación de zonas termales hace uso de estudios aplicados a los fluidos termales, mineralógicos en los depósitos y reemplazamientos en las rocas. La geoquímica de fluidos busca entender la distribución de los elementos químicos y las características del fluido para conocer la temperatura del

reservorio geotérmico. La composición química del agua subterránea es el resultado de continuos procesos de interacción entre el agua de precipitación que se infiltra en el terreno y la litología por donde circula.

Parte de los componentes químicos son adquiridos en la zona de recarga, mientras que otros se adquieren en el largo recorrido del flujo del agua subterránea hasta que ésta es captada en pozos o emerge en la zona de descarga a través de un manantial. Los estudios que se realizan en el agua son los siguientes:

- temperatura
- pH
- Potencial redox (Eh)
- Conductividad
- Iones mayoritarios
- Elementos traza y menores

Las alteraciones hidrotermales son un fenómeno que mediante procesos químicos y físicos de interacción agua-roca tiene como consecuencia la formación de paragénesis de minerales secundarios. Estas asociaciones minerales -llamadas alteraciones hidrotermales- suelen involucrar cambios físicos en las rocas, principalmente en su coloración, textura, porosidad, densidad y competencia mecánica, que las hacen conspicuas en el campo y claramente distintas a las rocas sin alterar. El estudio de las alteraciones, así como depósitos hidrotermales, proporciona información acerca de la variabilidad espacial del sistema y de la evolución (i.e. temporal) del mismo (Browne, 1977, Thompson & Thompson, 1996). La primera información es especialmente útil para definir “objetivos” para la perforación, permitiendo una mejor planeación y por ende una reducción de costos durante las etapas más avanzadas de la exploración geotérmica.

Con esta herramienta podemos determinar las características del sistema geotérmico, como las cualidades particulares que presenta respecto a su potencial y así proponer zonas para futuras exploraciones, indirectas (geofísica) o directas (perforaciones).

1.2 ANTECEDENTES

Un sistema geotérmico se define como un sistema de transporte de energía, en este caso de calor, desde una fuente ubicada a profundidad hasta una zona de descarga en la superficie, a través de un fluido geotérmico, dando origen a los recursos geotérmicos. Éstos se encuentran distribuidos en diferentes partes del mundo en zonas donde existen anomalías geológicas, es decir bajo condiciones tectónicas particulares (Canet *et al.*, 2005); por ejemplo, en rifts, en zonas de falla, en zonas de vulcanismo reciente y en los “hotspots” o puntos calientes.

Los sistemas geotérmicos se dividen en baja temperatura ($< 120^{\circ}\text{C}$ o < 400 J/g, respectivamente), temperatura intermedia ($120\text{-}180^{\circ}\text{C}$ o $800\text{-}1200$ J/g) o alta temperatura ($>180^{\circ}\text{C}$ o ~ 2400 J/g) (Nicholson, 1993).

El uso directo de la energía geotérmica es de los más antiguos, versátiles y es la forma más común de utilización (Dickson & Fanelli, 2003). Un sistema de alta temperatura o entalpía se explota para la generación de electricidad mientras que los sistemas de baja temperatura pueden ser utilizados de manera directa para la acuicultura o con fines recreativos como balnearios (Nicholson, 1993; Canet & Prol-Ledesma, 2006), así como también para uso industrial, uso agrícola para el secado de granos, para el calentamiento de invernaderos, para derretir la nieve, entre otros. En México se estima que al menos mil años antes de la conquista española, muchos asentamientos le daban un uso directo a las manifestaciones termales (Suárez-Arriaga *et al.*, 1997).

Al norte del campo geotérmico de Los Azufres, existen varias manifestaciones termales con potencial geotérmico, por ejemplo: San Agustín del Maíz y San Agustín del Pulque en los límites del Lago de Cuitzeo y la región de Araró, Michoacán. La zona de Araró es de especial interés para el desarrollo de la energía geotérmica, a pesar de la escasa información existente sobre la zona, se ha determinado un potencial de producción de 32 MW mediante el método de descompresión gradual asignado por reportes internos de CFE (Hiriart-Le Bert, 2011).

La geología de la región de Araró ha sido brevemente descrita en informes internos de la CFE durante las primeras etapas de exploración en el país (Canul & Rocha, 1983); sin embargo, es en Hiriart-Le Bert (2011) donde el marco geológico es abordado públicamente

de una manera más amplia. La zona se encuentra al interior de una depresión tectónica de dirección general E-O, conocida como Graben de Cuitzeo-Maravatío; esta depresión parece ser parte de una fosa tectónica más grande, que se extiende desde Chapala, Jalisco, hasta Tepetongo, México. Las fallas más relevantes, conocidas como Falla Huingo y Falla Araró-Zimirao, presentan la misma dirección y actúan como conductos para el movimiento de los fluidos hidrotermales, con temperaturas superficiales entre 31 y 98° C; mecanismo distinto al que ocurre en Los Azufres. En la zona de Araró se encuentran manantiales termales con escape de fluidos y zonas de alteración, agrupados en varias áreas, de las cuales la más importante es la conocida como San Nicolás Zimirao (con temperaturas de descarga entre los 48 y 99°C en una superficie de 10 hectáreas). Las aguas de los manantiales en esta área son de tipo clorurado sódico con concentraciones promedio de boro de 55 ppm. El geotermómetro de potasio-sodio indica temperaturas promedio de fondo de 205°C y máximas de 228°C (Hiriart-Le Bert, 2011).

El yacimiento geotérmico de Araró está contenido en una secuencia de rocas andesíticas más antiguas que las que afloran en la periferia, de probable edad miocénica y semejantes a las que hospedan a los fluidos en el campo de los Azufres, que presentan un fuerte fracturamiento (Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrin, 2003; Hirart-Le Bert, 2011).

1.3 JUSTIFICACIÓN

La Ley de Cambio Climático en el país de 2012 tiene entre otros objetivos, el desarrollo y uso de fuentes renovables, como la geotermia. La misma ley establece como meta que el país para el año 2024 el 35% de la energía provenga de fuentes renovables, así como la reducción de emisiones de 30% al año 2020 y de 50% para el 2050 (SENER, 2013).

Respecto a la geotermia, México cuenta con los recursos naturales para lograr las metas propuestas. Sin embargo, actualmente muchas de las manifestaciones termales, específicamente las de media y baja temperatura, son poco estudiadas y aprovechadas pues no tienen la capacidad energética de un sistema de alta temperatura. Por tal razón lo que no se les considera importantes y consecuentemente son poco exploradas. Por lo anterior y sabiendo que México tiene numerosas manifestaciones termales de media y baja temperatura, surge la imperante necesidad de investigar, caracterizar y entender estos sistemas de manera íntegra a partir del análisis multidisciplinario, para así destinarles algún

uso productivo que impulse su desarrollo, sin poner en riesgo el medio natural ni la salud de los seres.

1.4 OBJETIVO

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

El objetivo general del trabajo es caracterizar las variables geológicas que incurren en una zona con manifestaciones termales y la geoquímica del fluido hidrotermal que descargan manantiales para evidenciar el potencial geotérmico con fines exploratorios en la región de Araró, localizada dentro del Cinturón Volcánico Mexicano.

1.4.2 OBJETIVOS PARTICULARES

El objetivo general se ve apoyado por una serie de objetivos particulares que contribuirán con el alcance del trabajo, ellos consisten:

- Mapear las unidades litológicas y estructuras geológicas adyacentes a la zona de manifestaciones termales, en especial aquella que las alberga
- Caracterizar, identificar y delimitar las alteraciones y depósitos hidrotermales asociadas a la actividad termal para definir zonas superficiales para exploraciones futuras.
- Clasificar el tipo de fluido por la concentración de los iones mayoritarios.
- Denotar y categorizar firmas geoquímicas en el fluido termal que sirvan de guías en la exploración geotérmica.
- Calcular geotermómetros a través de la geoquímica de los fluidos para discernir temperaturas a profundidad de reservorios geotérmicos.

1.5 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona geotérmica de Araró se ubica en la porción nororiental del estado de Michoacán (Figura 1.2), a unos 40 kilómetros al noreste de la ciudad de Morelia: a 30 kilómetros al noreste del campo geotérmico los Azufres y al oriente del lago Cuitzeo.

Geológicamente en la porción centro oriental del Cinturón Volcánico Mexicano, en la zona volcánica de Michoacán-Guanajuato y al norte del campo geotérmico activo de Los Azufres.

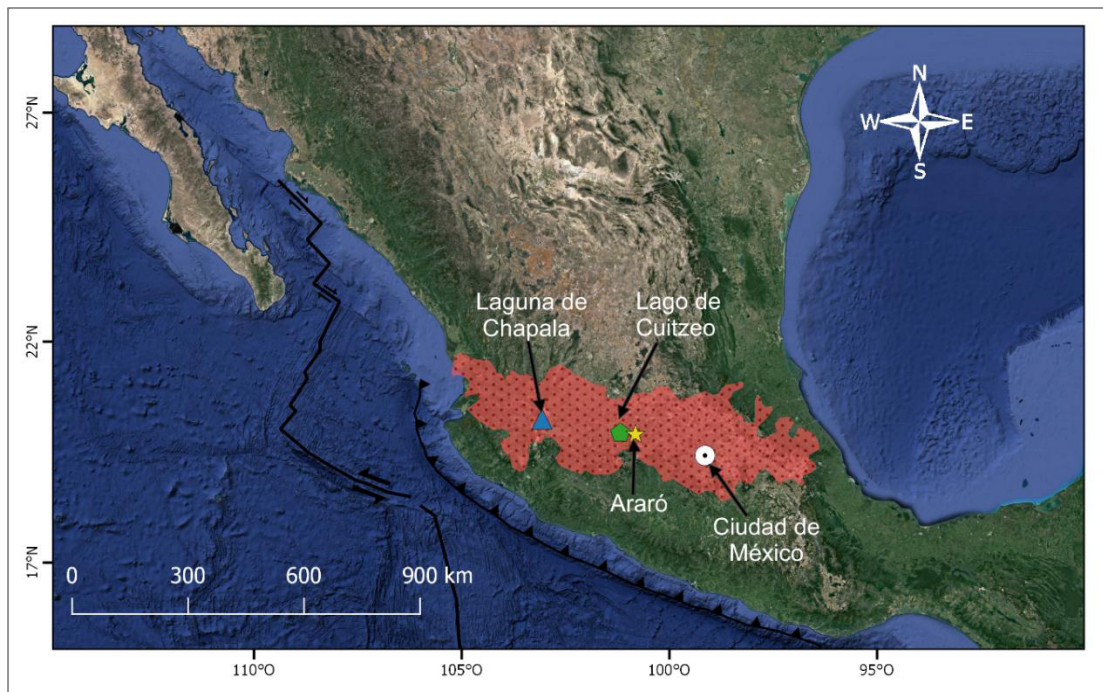


Figura 1:2 Localización del área de estudio. La región Geotérmica de Araró (estrella amarilla) se encuentra al SW del poblado de Araró y al NE del poblado de Zimirao.

2. GENERALIDADES DE LOS SISTEMAS GEOTÉRMICOS

El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es, literalmente, el calor contenido dentro de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria. Sin embargo, la energía geotérmica se usa hoy en día para indicar esa parte del calor de la Tierra que puede, o podría, ser recuperada y explotada por el hombre (IGA, 2016).

2.1 HISTORIA DE LA GEOTERMIA

La presencia de volcanes, aguas termales y otros fenómenos térmicos debieron haber llevado a nuestros antepasados a suponer que las partes del interior de la Tierra estaban calientes. Sin embargo, no fue hasta un período entre los siglos XVI y XVII, cuando las primeras minas fueron excavadas a unos pocos cientos de metros bajo nivel del suelo, que el hombre dedujo, a partir de simples sensaciones físicas, que la temperatura de la Tierra aumentó con la profundidad.

Las primeras mediciones por termómetro fueron realizadas probablemente en 1740 por De Gensanne, en una mina cerca de Belfort, en Francia (Buffon, 1778). En 1870, se estaban utilizando métodos científicos modernos para estudiar el régimen térmico de la Tierra (Bullard, 1965), pero no fue hasta el siglo XX y el descubrimiento del papel desempeñado por el calor radiogénico, ayudó a esclarecer el origen de la energía geotérmica y su utilización.

De hecho, todos los modelos térmicos modernos de la Tierra deben tener en cuenta el calor continuamente generado por la desintegración de los isótopos radioactivos de larga vida del uranio (U^{238} , U^{235}), el torio (Th^{232}) y el potasio (K^{40}), que están presentes en la Tierra (Lubimova, 1968). Además del calor radiogénico, en proporciones inciertas, hay otras fuentes potenciales de calor, como la energía primordial de la acreción planetaria. Las teorías realistas sobre estos modelos no estaban disponibles hasta los años 80's, cuando se demostró que no había equilibrio entre el calor radiogénico generado en el interior de la Tierra y el calor disipado en el espacio desde la Tierra y que nuestro planeta se estaba enfriando lentamente. Para dar una idea del fenómeno involucrado y su escala, citaremos un equilibrio térmico de Stacey & Loper (1988), en el que el flujo total de calor de la Tierra se estima en

42×10^{12} W (conducción, convección y radiación). De ésta cifra, 8×10^{12} W provienen de la corteza, que representa sólo el 2% del volumen total de la Tierra, la cual es rica en isótopos radiactivos; 32.3×10^{12} W proceden del manto, lo que representa el 82% del volumen total de la Tierra La Tierra y $1,7 \times 10^{12}$ W proceden del núcleo, que representa el 16% del volumen total y no contiene isótopos radiactivos. (Figura 2.1).

La energía térmica de la Tierra es inmensa, pero sólo una fracción podría ser utilizada por la humanidad. Hasta ahora nuestra utilización de esta energía se ha limitado a áreas en las que las condiciones geológicas permiten que un portador (agua en la fase líquida o vapor) "transfiera" el calor de zonas calientes profundas hacia o cerca de la superficie, dando lugar a recursos geotérmicos (IGA, 2015)..

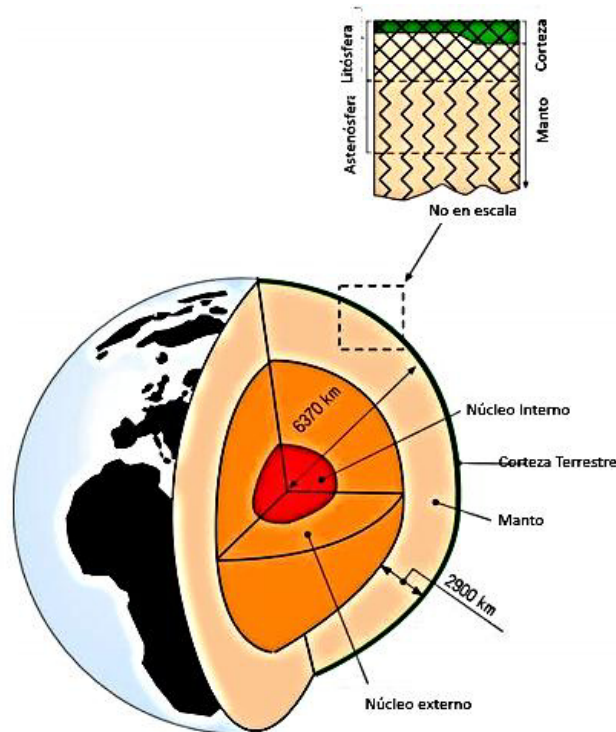


Figura 2:1 La corteza, manto y núcleo de la Tierra. Arriba a la derecha: una sección a través de la corteza y del manto superior (tomada de IGA, 2015).

2.2 NATURALEZA DE LOS RESERVORIOS GEOTÉRMICOS

El gradiente geotérmico expresa el aumento de temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. Hasta las profundidades accesibles por perforación con tecnología moderna. Se puede suponer razonablemente que la temperatura será de alrededor de 65° - 75° C a 2000 m de profundidad, 90° - 105° C a 3000 m y así por otros miles de metros (IGA, 2015). Hay,

sin embargo, extensas áreas en las que el gradiente geotérmico está por encima del valor promedio, como, por ejemplo, en el campo geotérmico los Azufres, Michoacán, México. El flujo térmico terrestre promedio de continentes y océanos es de 65 y 101 mWm^{-2} , respectivamente, estos valores se basan en 24,774 mediciones en 20,201 sitios que cubren aproximadamente el 62% de la superficie de la Tierra.

Un sistema geotérmico se puede describir esquemáticamente como "agua convectiva en la corteza superior de la Tierra, que en un espacio confinado transfiere el calor de una fuente de calor a un disipador de calor, usualmente la superficie libre" (Hochstein, 1990). Un sistema geotérmico se compone de tres elementos principales: una fuente de calor, un depósito y un fluido, que es el portador que transfiere el calor. La fuente de calor puede ser una intrusión magmática de temperatura muy alta ($> 600\text{ }^{\circ}\text{C}$) que ha alcanzado profundidades relativamente superficiales (5-10 km) o un gradiente geotérmico anómalo. El depósito es un volumen de rocas permeables calientes a través de las cuales los fluidos circulantes extraen el calor. El depósito está generalmente cubierto por una de rocas impermeables y conectado a una zona de recarga superficial a través de la cual las aguas meteóricas pueden reemplazar total o parcialmente los fluidos que escapan del depósito o son extraídos por perforaciones. El fluido geotérmico es líquido o vapor. El mecanismo subyacente de los sistemas geotérmicos está gobernado en lo general por la convección del fluido. La convección ocurre debido al calentamiento y la exposición térmica del fluido, el calor que se suministra en la base del sistema de circulación (White, 1973). El fluido de menor densidad tiende a elevarse y a ser sustituido por fluido más frío de alta densidad, procedente de los márgenes del sistema. La Figura 2.2 describe esquemáticamente el mecanismo en el caso de un sistema hidrotermal ideal.

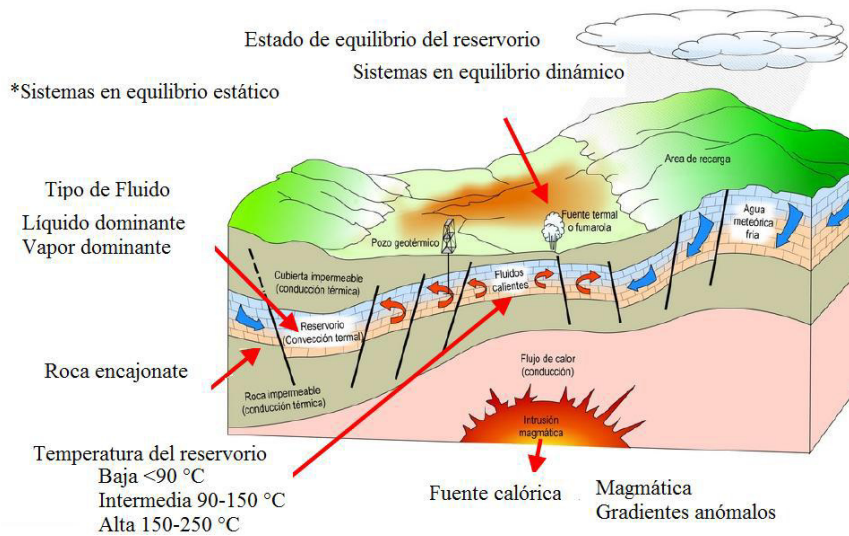


Figura 2:2 Representación esquemática de un sistema geotérmico ideal (Rodríguez-Díaz, 2015).

La convección, por su naturaleza, tiende a aumentar las temperaturas en la parte superior de un sistema a medida que se disminuye las temperaturas en la parte inferior (White, 1973).

El fenómeno que acabamos de describir puede parecer bastante simple, pero la reconstrucción de un buen modelo de un sistema geotérmico real no es fácil de lograr. Requiere habilidad en muchas disciplinas y una variedad de combinaciones de características geológicas, físicas y químicas; dando así lugar a varios tipos diferentes de sistema.

De todos los elementos de un sistema geotérmico, la fuente de calor es la única que necesita ser natural. Si las condiciones son favorables, los otros dos elementos pueden ser “artificiales”, por ejemplo, los fluidos geotérmicos extraídos del depósito para impulsar la turbina en una central geotérmica podrían ser inyectados de nuevo en el depósito a través de pozos de inyección específicos después de su utilización. De esta manera la recarga natural del ensamble se integra mediante una recarga artificial. Durante muchos años también se ha adoptado la reinyección en diversas partes del mundo como medio para reducir drásticamente el impacto en el medio ambiente de la planta geotérmica.

La recarga artificial a través de pozos de inyección también puede ayudar a reponer y mantener los campos geotérmicos “viejos” o “agotados”. Por ejemplo, en el campo de los Géiseres en California, E.U., uno de los mayores campos geotérmicos del mundo, comenzó a disminuir dramáticamente a finales de los años 80 debido a la falta de fluidos. Otro ejemplo de proyectos es en Pathé, Hidalgo en el año de 1959, que ese cerró por falta de agua

2.3 DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN DE LOS RESERVORIOS GEOTÉRMICOS

Actualmente la IGA (Por sus siglas en inglés, International Geothermal Association) ha tratado de definir y clasificar a los recursos geotérmicos. Sin embargo, no hay un consenso referente a la terminología en uso en toda la comunidad geotérmica, lo que es lamentable, ya que esto facilitaría la comprensión mutua. Las siguientes son algunas de las definiciones y clasificaciones más comunes en la literatura en esta disciplina.

De acuerdo con Muffler & Cataldi (1978), cuando hablamos genéricamente de los recursos geotérmicos, lo que solemos referirnos es lo que más se llamaría la base de recursos accesibles; es decir, toda la energía térmica almacenada entre la superficie de la Tierra y una profundidad especificada en la corteza, debajo de un área específica y medida a partir de la temperatura media anual local. La base de recursos accesibles incluye la base de recursos accesible útil llamado recurso (parte de la base de recursos accesible que podría extraerse económicamente y legalmente en un tiempo especificado en el futuro (menos de cien años). Esta categoría incluye el recurso económico identificado que es la reserva, la cual es aquella parte de los recursos de un área dada que se puede extraer legalmente a un costo competitivo con otras fuentes comerciales de energía y que son conocidos y caracterizados por la perforación o evidencias geoquímicas, geofísicas y geológicas. La Figura 2.3 ilustra gráficamente estos y otros términos que pueden ser utilizados por especialistas en geotermia.

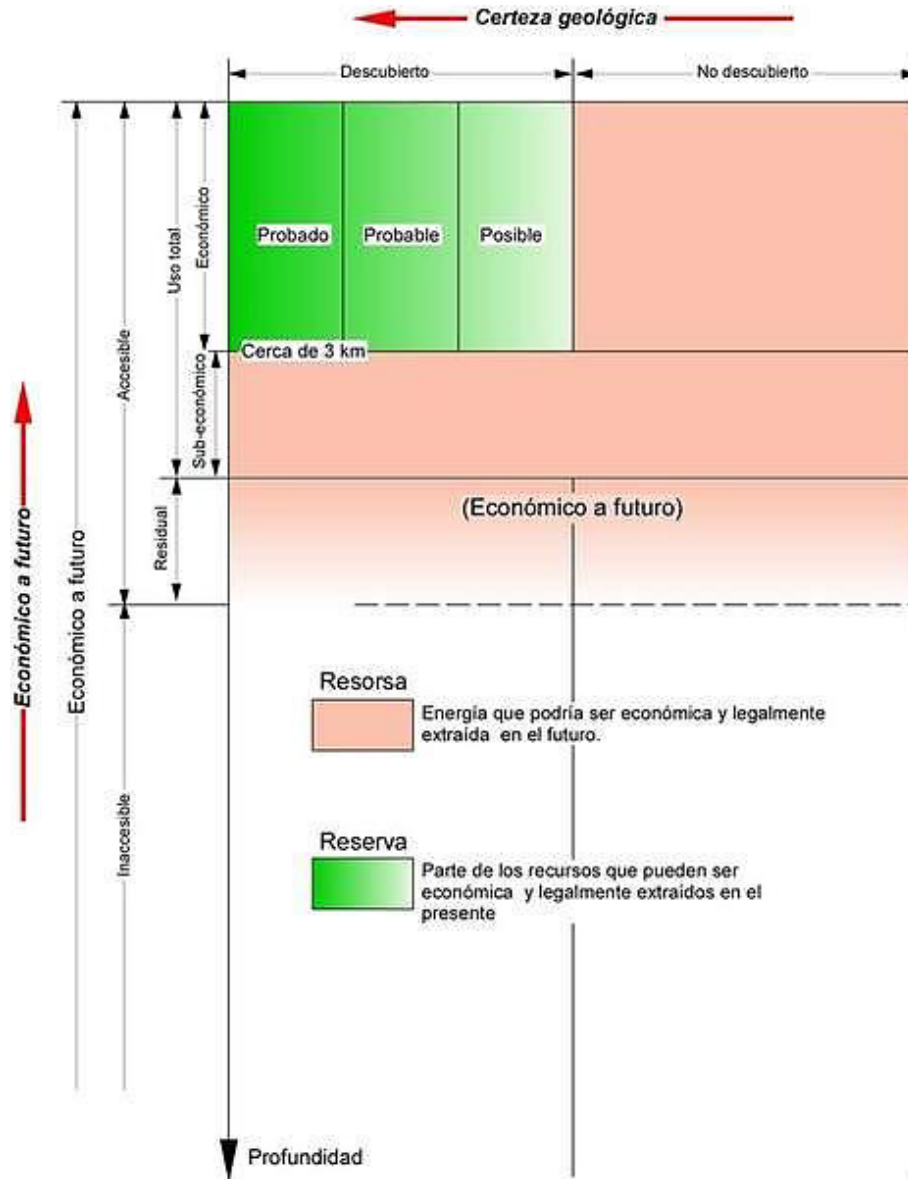


Figura 2:3 Diagrama que muestra las diferentes categorías de recursos geotérmicos. (Tomado de Muffler y Cataldi, 1978). El eje vertical es el grado de viabilidad económica; El eje horizontal es el grado de aseguramiento geológico.

El criterio más común para clasificar los recursos geotérmicos es, se basa en la entalpía de los fluidos geotérmicos. La entalpía, que puede considerarse más o menos proporcional a la temperatura. Se utiliza para expresar el contenido de calor (energía térmica) de los fluidos. Los recursos se dividen en: baja, media y alta temperatura (o entalpía). La tabla 1 presenta las clasificaciones propuestas por varios autores, con los rangos de temperatura correspondientes. En los sistemas dominados por líquido, el agua es la fase principal, el vapor puede estar presente, generalmente como burbujas discretas. Estos

sistemas geotérmicos, cuyas temperaturas pueden oscilar entre 125 y 225°C (IGA, 2015). Dependiendo de las condiciones de temperatura y presión, pueden producir mezclas de agua caliente, agua y vapor húmedo y, en algunos casos, vapor seco. En los sistemas dominados por el vapor, el agua y el vapor normalmente coexisten en el depósito. Los sistemas geotérmicos de este tipo son los más conocidos de los cuales son Larderello en Italia y El Geysir en California, son algo raro, y son sistemas de alta temperatura, normalmente producen vapor seco a sobrecalentado.

Tabla 1. Fuente: *Clasificación de Sistemas Geotérmicos de Acuerdo a su Temperatura*

	Muffler y Cataldi (1978)	Hochstein (1990)	Rodríguez Díaz (2015)
<i>Baja entalpía</i>	90°C	125°C	150°C
<i>Mediana Entalpía</i>	90-150°C	125-225°C	150-220°C
<i>Alta entalpía</i>	>150°C	>225°C	>220°C

Campo geotérmico es una definición geográfica que indica un área de actividad geotérmica en la superficie de la Tierra. En casos sin actividad superficial, este término puede usarse para indicar el área en la superficie correspondiente al depósito geotérmico debajo (Axelsson & Gunnlaugsson, 2000).

Los términos vapor húmedo, seco y sobrecalentado, son utilizados con frecuencia por los geotermistas. Para definir estos términos de forma simple, tomemos el ejemplo de una olla llena de agua líquida con presión constante a 1 atm (101.3 kPa). Si calentamos el agua, comenzará a hervir una vez que alcance la temperatura de 100°C (temperatura de ebullición del agua a una presión constante de 1 atm) y pasará de líquido a fase de gas (vapor). Después de un cierto tiempo la olla contendrá líquido y vapor. El vapor que coexiste en el líquido, en equilibrio termodinámico con él, es vapor húmedo. Si continuamos calentando la olla y mantenemos la presión a 1 atm, el líquido se evaporará por completo y la olla solo contendrá el vapor. Esto es lo que llamamos vapor seco. Tanto el vapor húmedo o el seco se denominan “vapor saturado”. Finalmente, aumentando la temperatura, por ejemplo a 120 °C y manteniendo la presión a 1 atm, se obtendrá vapor supercalentado con un sobrecalentamiento de 20°C, es decir, 20°C por encima de la temperatura de vaporización a esa presión (Muffler & Cataldi, 1978).

Otra división entre sistemas geotérmicos es la basada en el estado de equilibrio del yacimiento (Nicholson, 1993), considerando la circulación del fluido reservorio y el

mecanismo de transferencia de calor. En los sistemas dinámicos, el depósito se recarga continuamente por agua que se calienta y luego se descarga desde el depósito hasta la superficie o en formaciones subterráneas permeables. El calor se transfiere a través del sistema por convección y circulación del fluido. Esta categoría incluye sistemas de alta temperatura ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$) y baja temperatura ($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$). En los sistemas estáticos (estancamientos o sistemas de almacenamiento) sólo hay poca o ninguna recarga en el depósito y el calor se transfiere sólo por conducción. Esta categoría incluye sistemas de baja temperatura y geopresurizados. Los sistemas geopresurizados se encuentran característicamente en grandes cuencas sedimentarias (por ejemplo, el Golfo de México, Cuenca de Williston, EE. UU, etc.) a profundidades de ~ 3 a 7 km , estos sistemas consisten en rocas sedimentarias permeables, incluidas en estratos impermeables de baja conductividad, que contienen agua caliente presurizada la cual permaneció atrapada en el momento de la deposición de los sedimentos. La presión de agua caliente se aproxima a la presión litostática, superando ampliamente la presión hidrostática. Los depósitos geopresurizados también pueden contener cantidades significativas de metano. Estos sistemas también podrían producir energía térmica, hidráulica y gas metano, estos recursos se han investigado ampliamente, pero hasta ahora no ha habido exploración industrial extensiva, salvo casos específicos (e.g. Cuenca del río Rhin, Alemania).

El factor más crítico para la clasificación de la energía geotérmica como fuente de energía renovable es la tasa de recarga de energía. En la explotación de sistemas geotérmicos naturales, la recarga de energía se realiza por advección de agua termal en la misma escala de tiempo que la producción del recurso. En el caso de las rocas calientes y secas y algunos de los acuíferos de agua caliente en las cuencas sedimentarias, la recarga de energía es sólo por conducción térmica. (Stefansson, 2000).

2.4 MÉTODOS DE EXPLORACIÓN

Según Lumb, 1981, los objetivos de la exploración geotérmica son:

- Identificar expresiones superficiales geotérmicas.
- Comprobar que existe un campo útil de producción geotérmica o para uso directo.
- Estimar el tamaño del recurso.
- Determinar el tipo de campo geotérmico.
- Localizar zonas productivas.
- Determinar contenido de calor de los fluidos que serán descargados por los pozos en el campo geotérmico.
- Recopilar un conjunto de datos básicos contra los que se pueden ver los resultados de la supervisión futura.
- Determinar los valores de pre-explotación de los parámetros ambientalmente sensibles.
- Adquirir conocimientos sobre cualquier característica que pueda causar problemas durante el desarrollo del campo.

La importancia relativa de cada objetivo depende de una serie de factores, la mayoría están vinculados al propio recurso. Estos incluyen la utilización anticipada, la tecnología disponible, la economía, así como la situación, la ubicación y el tiempo, todo lo cual afecta al programa de exploración. La estimación del tamaño del recurso puede ser menos importante si se va a usar en una aplicación a pequeña escala que obviamente requiere mucho menos calor del que ya se está descargando de forma natural. Si la energía se va a utilizar para el calentamiento del distrito o alguna otra aplicación que requiera calor de baja intensidad, entonces un fluido a alta temperatura ya no es un objetivo importante (Lumb, 1981).

Existe un gran número de métodos y tecnologías disponibles para alcanzar estos objetivos. Muchos de estos métodos están en uso y han sido ampliamente experimentados en otros sectores de investigación. Sin embargo, las técnicas y metodologías que han demostrado ser exitosas en la exploración de minerales y petróleo o gas no serán necesariamente la mejor solución en la exploración geotérmica. Por el contrario, las técnicas

de poco uso en la exploración de petróleo podrían resultar herramientas ideales en la búsqueda del calor natural.

A continuación se describirán cada uno de los métodos de exploración.

Los estudios geológicos e hidrogeoquímicos son el punto de partida de cualquier programa de exploración y su función básica es identificar la ubicación y extensión de las áreas con valor geotérmico para investigar con mayor detalle y recomendar los métodos de exploración más adecuados para estas áreas. Estos estudios asumen un papel importante en las fases siguientes de la investigación geotérmica, hasta la ubicación de pozos exploratorios y productores. También proporcionan la información básica para interpretar los datos obtenidos con los otros métodos de exploración y, finalmente, para construir un modelo realista del sistema geotérmico y evaluar el potencial del recurso. La información obtenida de los estudios geológicos e hidrogeoquímicos también se puede utilizar en la fase de producción, proporcionando información valiosa para el embalse y los ingenieros de producción. La duración y el costo de la exploración pueden ser sensiblemente reducidos por un buen programa de exploración y una coordinación eficiente de la investigación.

2.4.1 PROSPECCIÓN QUÍMICA

Las manifestaciones superficiales producidas por la actividad hidrotermal son indicadores del flujo subterráneo y dan como resultado un conjunto de minerales que comparten características de condiciones de formación, como pH, temperatura, composición química promedio del fluido, generando una zonación mineralógica según el tipo de sistema geotérmico. Con ayuda de la geoquímica aplicada a las zonas de descarga se puede inferir la temperatura y extensión del reservorio actual, analizando la composición química de los iones, pH, gases, isotopos. Con estos datos se puede determinar el tipo agua predominante y conocer los procesos geoquímicos que ocurren en el subsuelo, así como evaluar el sistema de flujo subterráneo, distribución en profundidad, temperatura, presión y estado físico (vapor o agua), rocas subsuperficiales asociadas, origen y tiempo de residencia del fluido, dirección de circulación, permeabilidad y flujo natural de calor. En cuanto a los gases, el principal componente es el CO₂ que se mide en las zonas de descarga así como en las localidades aledañas para tener un perfil de la anomalía producida por la descarga de gases a la superficie

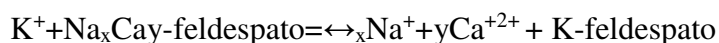
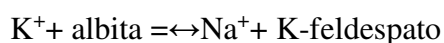
a través de los conductos permeables en y sobre el yacimiento geotérmico. (Marini, 2000; IGA, 2016).

El estudio geoquímico consiste en muestreo y análisis químicos e / o isotópicos del agua y del gas de las manifestaciones geotérmicas (aguas termales, fumarolas, etc.) y pozos en el área de estudio. Dado que el estudio geoquímico proporciona datos útiles para la planificación de la exploración y su costo es relativamente bajo en comparación con otros métodos más sofisticados, como las encuestas geofísicas, las técnicas geoquímicas deben utilizarse tanto como sea posible antes de proceder con otras metodologías más costosas.

2.4.2 GEOTERMÓMETROS

Los geotermómetros químicos se emplean para predecir la temperatura del yacimiento. La utilización de geotermómetros minerales han sido específicamente calibrados para su utilización en salmueras provenientes de cuencas sedimentarias y campos petrolíferos.

Los geotermómetros químicos (solutos y de sílice), aunque son desarrollados en forma empírica, se dispone de suficiente información de campo y laboratorio que permite asegurar que, a temperaturas relativamente altas, la mayoría del quimismo de los fluidos viene controlado por reacciones que dependen de la presión/temperatura. Algunas reacciones que representan la interacción del fluido con la roca a profundidad y que se emplean para definir los geotermómetros son las siguientes. (Ellis, 1967; Fournier & Rowe, 1966).



Durante la explotación de un campo geotérmico, los geotermómetros se utilizan para controlar los cambios fisicoquímicos que se originan en el yacimiento. Las técnicas de los geotermómetros, requieren análisis isotópicos o químicos de las aguas termales, vapor y gas provenientes de los pozos y fuentes. Los geotermómetros pueden dividirse en los siguientes grupos:

- Geotermómetros químicos (solutos y sílice).
- Geotermómetros gaseosos.
- Geotermómetros isotópicos.

El requisito fundamental para los tres grupos de técnicas es que las reacciones dependientes de la temperatura existentes entre la roca del yacimiento y el fluido, o los gases y el fluido, tiendan al equilibrio. Además, es también fundamental que no haya un reequilibrio mientras los fluidos abandonan el yacimiento para ser descargados en superficie (Fournier & Rowe, 1966; Truesdell, 1991; Ellis & Mahon, 1977). Se han propuesto varios geotermómetros químicos basados en las concentraciones de los elementos mayoritarios (Na, K, Ca, Mg) y minoritarios (Li, SiO₂) de las aguas termales, los cuales han sido extremadamente valiosos para estimar con precisión las temperaturas del subsuelo.

Algunas consideraciones importantes para la aplicación de geotermómetros son los contenidos en K, Na, Ca, y el pH de los fluidos en muchos terrenos donde abundan el cuarzo y el feldespato. El contenido en sílice parece estar limitado para temperaturas por encima de los 180 °C por la solubilidad del cuarzo (Fournier & Rowe, 1966) y por la solubilidad de la calcedonia cuando existen temperaturas inferiores. A temperaturas altas, la concentración de Mg está controlada por la formación de clorita (Ellis & Mahon, 1977).

2.4.3 PROSPECCIÓN GEOFÍSICA

Las prospecciones geofísicas están dirigidas a obtener indirectamente, a partir de la superficie o desde intervalos de profundidad cercanos a la superficie, los parámetros físicos de las formaciones geológicas profundas. Estos parámetros físicos incluyen:

- Temperatura (estudio térmico)
- Conductividad eléctrica (métodos eléctricos y electromagnéticos)
- Velocidad de propagación de ondas elásticas (levantamiento sísmico)
- Densidad
- Susceptibilidad magnética (levantamiento magnético).

Algunas de estas técnicas, como la sísmica, la gravimetría y la magnetometría, que tradicionalmente se aplican en la investigación petrolera, pueden dar información sobre la forma, el tamaño, la profundidad y otras características importantes de las estructuras geológicas profundas que podrían construir un reservorio geotérmico. La información sobre la existencia de fluidos geotérmicos en las estructuras geológicas puede obtenerse con las prospecciones eléctricas y electromagnéticas, que son más sensibles que las otras técnicas geofísicas a la presencia de estos fluidos ya las variaciones de temperatura; estas dos técnicas

se han aplicado ampliamente con resultados satisfactorios. El método magnetotelúrico (MT), que explota las ondas electromagnéticas generadas por las tormentas solares, ha mejorado mucho en los últimos años y ahora ofrece un amplio espectro de posible para la geotermia. La ventaja principal del método magnetotelúrico es que puede usarse para definir estructuras más profundas que las que se pueden obtener con las técnicas eléctricas y las otras técnicas electromagnéticas. El método Audiomagnético de fuente controlada (CSAMT), desarrollado recientemente, utiliza ondas inducidas artificialmente en lugar de ondas electromagnéticas naturales. La profundidad de penetración es más baja con esta técnica, pero es más rápida, más barata y proporciona mucho más detalle que el método MT (IGA, 2015).

2.4.4 PERFORACIÓN DE POZOS

La perforación de pozos exploratorios representa la fase final de exploración geotérmica y es el único medio para determinar las características reales del yacimiento geotérmico y así evaluar su potencial (Muffler & Cataldi, 1978). Los datos proporcionados por los pozos exploratorios deben ser capaces de verificar todas las hipótesis y modelos elaborados a partir de los resultados de la exploración superficial y de confirmar que el embalse es productivo y que contiene suficientes fluidos de características adecuadas para la utilización a la que se destina. La ubicación de los pozos exploratorios es por lo tanto una operación muy delicada.

2.5 UTILIZACIÓN DE RECURSOS GEOTÉRMICOS

La generación de electricidad es la forma más importante de utilización de los recursos geotérmicos de alta temperatura ($> 150\text{ }^{\circ}\text{C}$). Los recursos de temperatura media a baja ($<150\text{ }^{\circ}\text{C}$) son adecuados para otros tipos de aplicación directa, aunque también son usados para la generación de energía eléctrica se aplica en algunos países como Australia, Alemania, Francia, etc.

El diagrama de Lindal (Lindal, 1973), muestra los usos posibles de los fluidos geotérmicos a diferentes temperaturas (Figura 2.4) enfatizando dos aspectos importantes de la utilización de los recursos geotérmicos (Gudmundsson, 1988): (a) con usos en cascada y combinados es posible mejorar la factibilidad de los proyectos geotérmicos y b) la temperatura de los recursos puede limitar los posibles usos, pero los diseños existentes para

los procesos térmicos pueden modificarse para la utilización de los fluidos geotérmicos en ciertos casos, ampliando así su campo de aplicación.

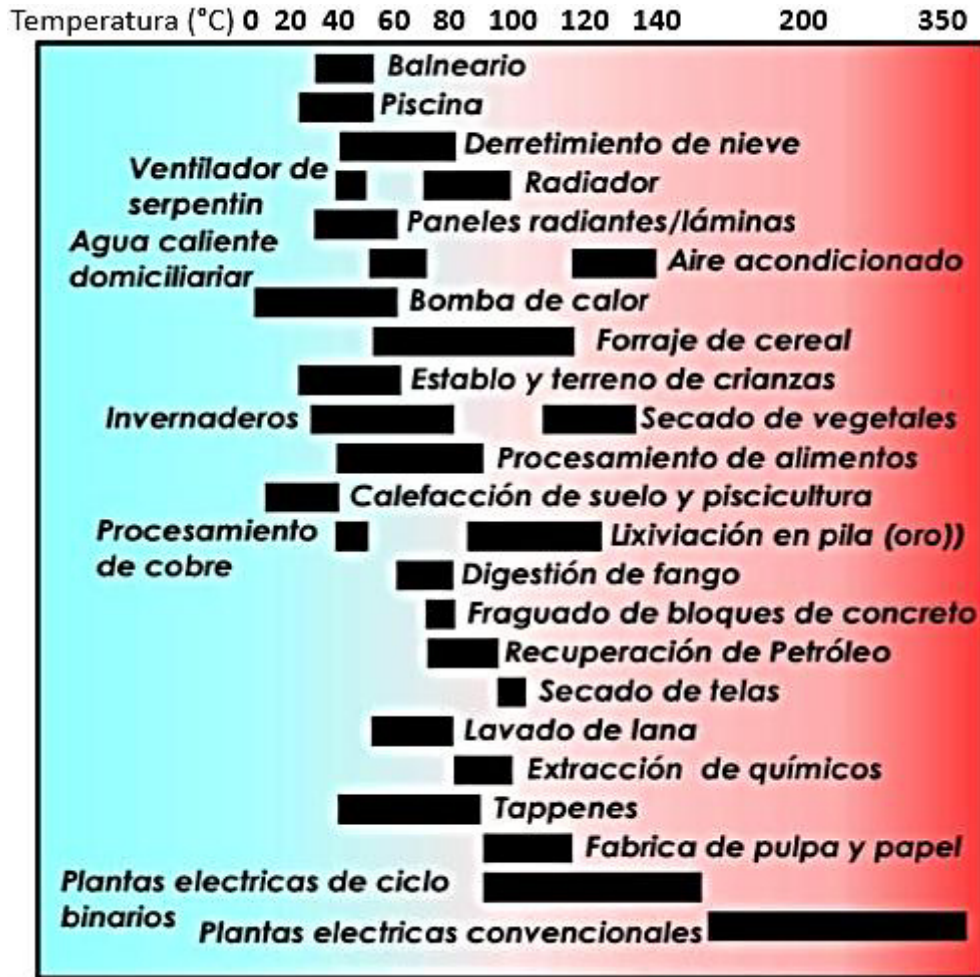


Figura 2:4 Diagrama que muestra la utilización de fluidos geotérmicos (Lindal, 1973).

3. MARCO GEOLÓGICO

3.1 GEOLOGÍA REGIONAL

El Cinturón Volcánico-Mexicano (CVM) ha sido interpretado como un arco magmático continental del Mioceno medio-tardío al reciente, desarrollado en el margen suroeste de la placa norteamericana como resultado de la subducción de las placas Rivera y Cocos a lo largo de la Trinchera Mesoamericana. (Ferrari, 2000; Gómez-Tuena *et al.*, 2005). Ha sido relacionado principalmente a la subducción de la placa de Cocos con la corteza continental de México (Placa Norteamericana), que al nivel de la astenósfera sufre fusión parcial y origina los magmas de la faja (Demant, 1978; Gómez-Tuena *et al.*, 2005) (Figura 3.1)



Figura 3:1 Mapa que muestra la ubicación del Cinturón Volcánico Mexicano, la estrella amarilla muestra la región de Araró y sus alrededores (Modificado de Gómez-Tuena, 2005).

El CVM tiene un arreglo tectónico zigzagueante provocado por la presencia de un sistema de fragmentación ortogonal con dirección noroeste y noreste (Morán Zenteno, 1984). En particular en la región centro-occidental del CVM se encuentran uno de los campos volcánicos más sobresalientes de esta faja, el campo volcánico Michoacán-Guanajuato, que cuenta con más de 1,000 aparatos volcánicos en una región que comprende estos dos estados

de la República Mexicana (Figura 4.2). El campo contiene volcanes de tamaño pequeño a mediano y carece de grandes volcanes compuestos. Ambos grupos coexisten en tiempo y espacio. Las lavas asociadas a conos cineríticos poseen un amplio rango composicional de 47 a 67% en contenido de SiO₂, siendo mayormente calcialcalinas y ocasionalmente alcalinas (Ban & Granados, 1994).

La actividad tectónica presente en el occidente y centro del CVM es extensional y está representada por estructuras mayores tales como los rift y su origen data desde Neógeno. En la parte occidental del CVM (Gómez-Tuena, 2005) existen tres grabens importantes por sus dimensiones; Tepic-Zocoalco, Colima y Chapala, estas tres fosas geológicas que representan una actividad extensional en este sector del CVM, probablemente influenciada por estructuras geológicas previas (Morán Zenteno, 1984). El graben de Chapala que representa un aulacógeno de un sistema de rift con dirección E-W, su morfología es similar a los grabens activos del occidente del CVM (Ban, & Granados, 1994). La apertura del rift de Chapala se inició a fines del Mioceno tardío a lo largo de los lineamientos N 90° E, presentando movimientos laterales, izquierdos y normales. La mayoría de estos lineamientos han permanecido inactivos desde el Pleistoceno dando como resultado el lago de Chapala, ubicado entre el estado Jalisco y Michoacán, cuyos márgenes más extensos son paralelos a la zona principal de fracturas en el que se ha acumulado un enorme espesor de basaltos. El lago de Cuitzeo, que se localiza en Michoacán tiene la misma orientación que el de Chapala por lo que nos puede dar una continuación en la tendencia de los sistemas de fallas E-W en la región de Araró (Figura 4.2). Es notorio el cambio en la litología con respecto a los valles de Acámbaro y Salvatierra, esto se debe al desplazamiento causado por las fallas del margen septentrional del Graben de Cuitzeo, en donde se presentan sistemas de fallas con dirección E-W, el sector occidental está definido por el área comprendida entre Morelia y Araró; se caracteriza por fallas normales de orientación general E-W (Legorreta, 2002). Algunas de las fallas rebasan los 25 km de longitud y la altura promedio de los escarpes es menor que 100 m, además del sistema de fallas E-W, existe un sistema de fallas normales con orientación N75°E, el cual presenta escarpes pronunciados de 50 a 100 m de altura (Figura 3.2) (Legorreta, 2002). Además, con el campo de esfuerzo actual estas estructuras se desplazan en forma de fallas laterales derechas normales, que desplazan y controlan a la cuenca lacustre de Cuitzeo (Pérez *et al.*, 2010).

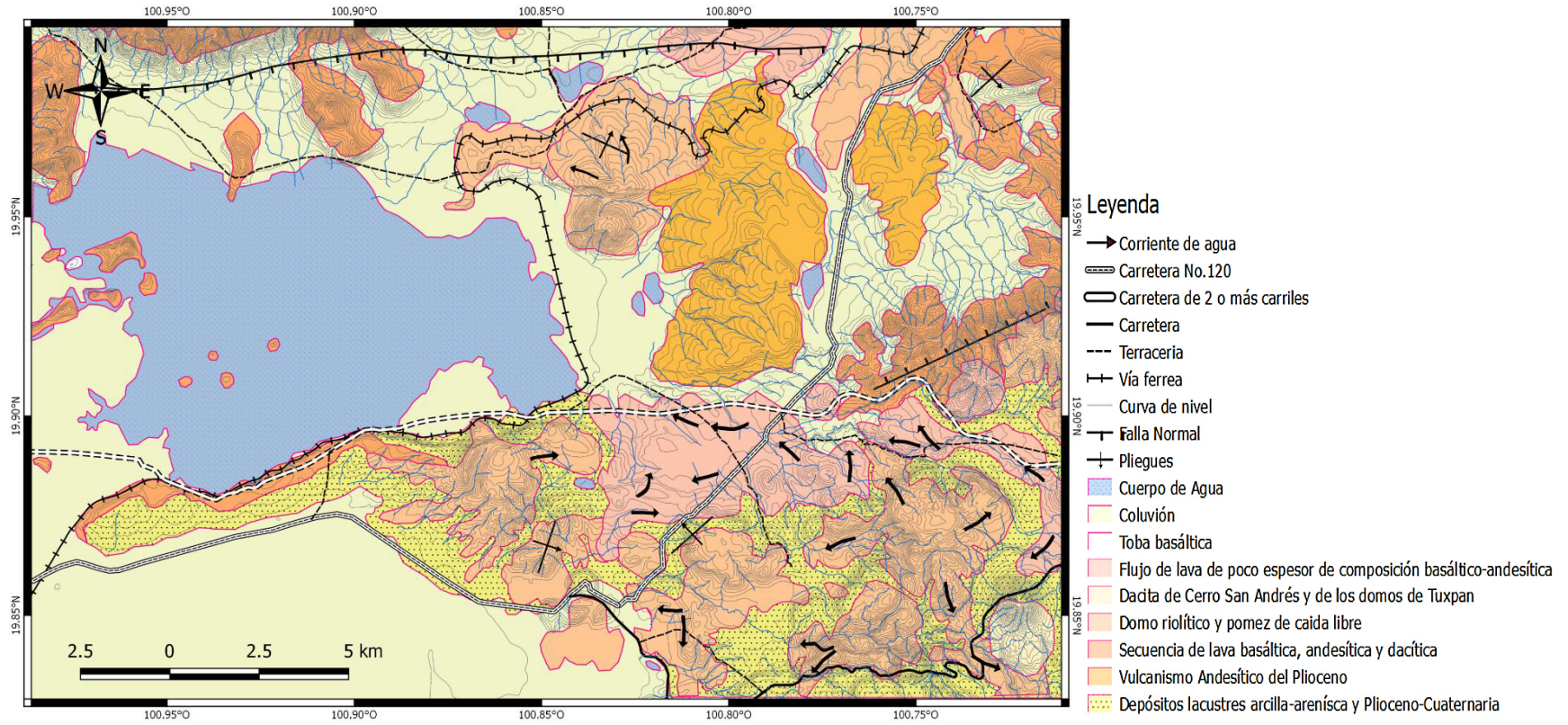


Figura 2:2 Mapa Geológico a detalle de la zona de Araró y alrededores (Modificado de INEGI., 2016).

La importancia del CVM reside en que reúne elementos necesarios que se consideran favorables para la ocurrencia de sistemas geotérmicos; por ejemplo: volcanismo reciente en ciertos sectores del cinturón con edades del Pleistoceno, que actúa como la fuente de calor de los sistemas, procesos tectónicos extensivos activos, unidades litológicas intrusivas como extrusivas que forman parte del reservorio según su grado de porosidad y/o permeabilidad; altos, que facilitan la acumulación y circulación de fluidos por medio de fallas y fracturas, en particular la zona occidental donde existen varios volcanes y domos de edades muy jóvenes dentro del CVM. Actualmente dentro del CVM se ubican campos geotérmicos en producción o explotación tales como: Los Humeros (Puebla) y Los Azufres (Michoacán), El Domo de San Pedro (Nayarit) y prospectos muy importantes como La Primavera (Jalisco) y Araró (Michoacán). La región geotérmica de Araró se extiende desde el poblado Zinapécuaro de Figueroa, en su parte sur y hasta la población de Araró en su parte norte, en las inmediaciones del Lago de Cuitzeo. En esta zona existe un par de pozos exploratorios geotérmicos por parte de CFE (Figura 3.2).

3.2 GEOLOGÍA LOCAL

La región geotérmica de Araró se encuentra en la parte oriental del sector central del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). La zona se localiza al interior de una depresión tectónica de dirección general E-W, conocida como graben de Cuitzeo-Maravatío, que parece ser parte de una fosa tectónica más grande que se extiende desde Chapala, Jalisco hasta Tepetongo, Estado de México (Hiriart, Le-Bert., 2011) (Figura 4.3). Las fallas más relevantes en la zona de Araró son la Falla Huingo y Falla Araró-Zimirao, se presentan con una dirección casi E-W, 10° y 15° , respectivamente. Estas fallas y los sistemas de fallamiento y fracturas asociadas actúan como conductos para el movimiento de los fluidos hidrotermales hacia la superficie con temperaturas de descarga superficial entre 31°C y 98°C (Casarrubias *et al.*, 1999), (Figura 3.3).

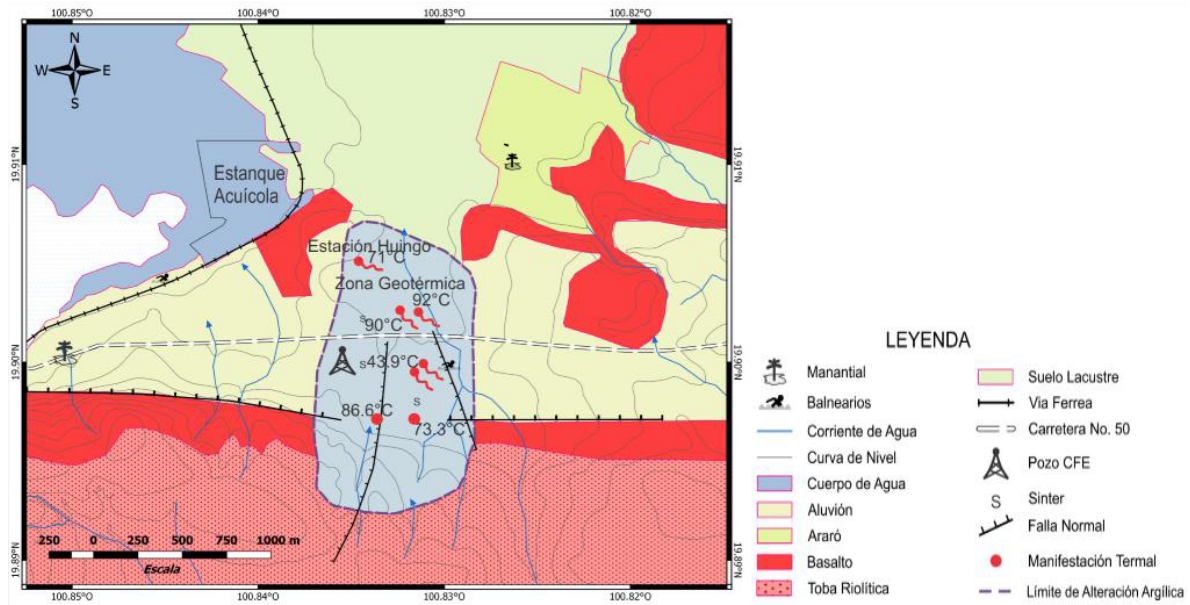


Figura 3:3 Mapa geol6gico de la regi6n de Arar6, Michoac6n. (Tomado y modificado de Garc6a Peralta, 2017).

De manera m6s local en el 6rea de estudio se pueden apreciar tres unidades litol6gicas y dep6sitos hidrotermales como: andesitas bas6lticas (Qpab), ignimbritas (Tmi) dep6sitos lacustres, dep6sitos aluviales (Qal) y sinter's (Figura 3.4) como resultado de las manifestaciones hidrotermales estas unidades est6n predisuestas de una manera muy caracter6stica dado las configuraciones estructurales de las fallas regionales.

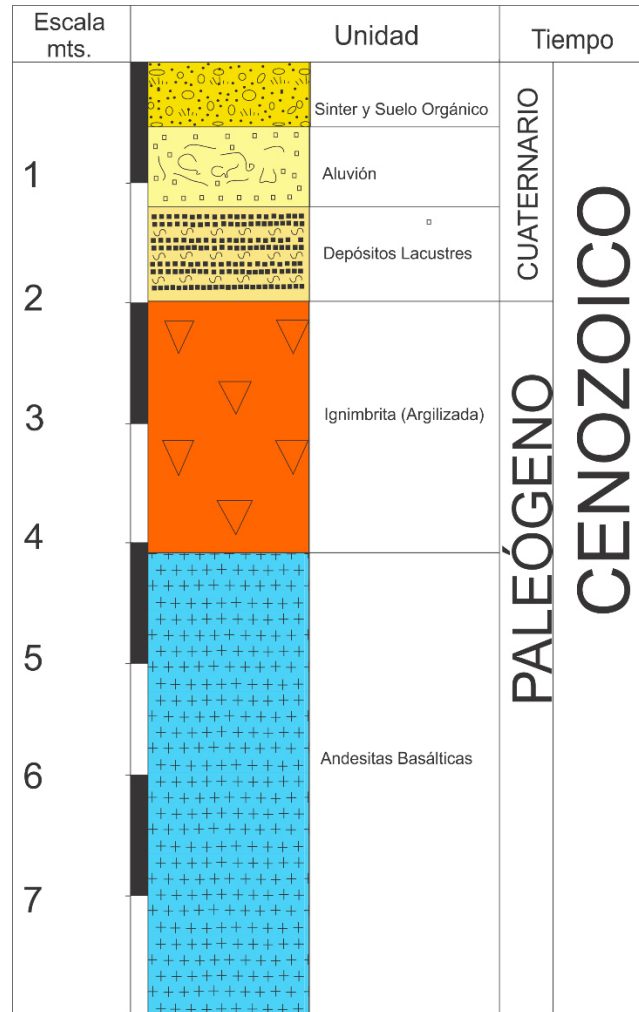


Figura 3:4 Columna estratigráfica local de la región de Zimirao, en base a los principales afloramientos (García Peralta, 2017).

3.2.1 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

En las zonas donde afloran las andesitas-basaltos, es posible realizar mediciones estructurales de la Falla Huingo; ya que esta unidad está estrechamente ligada a la extensión tanto de la Falla Huingo, como a las otras dos fallas hacia el sur, (Falla Araró- Zimirao, Falla El Caracol) como se aprecia en la Figura 3.5. Adicionalmente se llevó a cabo un análisis de los lineamientos superficiales en la zona de Huingo, denotando un patrón preferencial de lineamientos 81-90° E-W, seguida de un patrón 15-30° NEN-SWS (Figura 3.5).

En la zona las fallas más evidentes presentan una orientación E-W de la extensión del graben de Cuitzeo-Maravatío coincidiendo con las descritas en el trabajo de Casarrubias *et al* (1990). La existencia de fallas regionales beneficia la circulación de los fluidos termales

estas a su vez intersectan fallas locales como las de Huingo y Araró-Zimirao constituyendo los posibles conductos termales desde el reservorio hasta la superficie. El control dominante en la zona geotérmica de La Salud y Zimirao es el tectónico y estructural, regido por la estructura del graben de Cuitzeo en su porción este y por el sistema de fallas E-W con cruce de fallas NE-SW y una falla inferida NW 30° para La Salud, coincidente con otras manifestaciones termales alineadas en ese patrón (Huingo y Los Hervideres, Ávalos-Tapia, 2016). Por otra parte en la zona de San Agustín del Pulque, existe la falla normal San Agustín del Pulque, con una orientación preferente de E-W como en la zona de Araró.



Figura 3:5 Imagen satelital que muestra los lineamientos presentes (rosa) en la región de Araró y San Agustín del Pulque. (Tomado de Google Earth).

3.2.2 MANIFESTACIONES TERMALES

Las manifestaciones termales, alteraciones y depósitos hidrotermales del presente estudio se ubican al sur de Araró, Michoacán, al oriente del Lago de Cuitzeo y al occidente del lago, en San Agustín del Pulque (Figura 3.6).

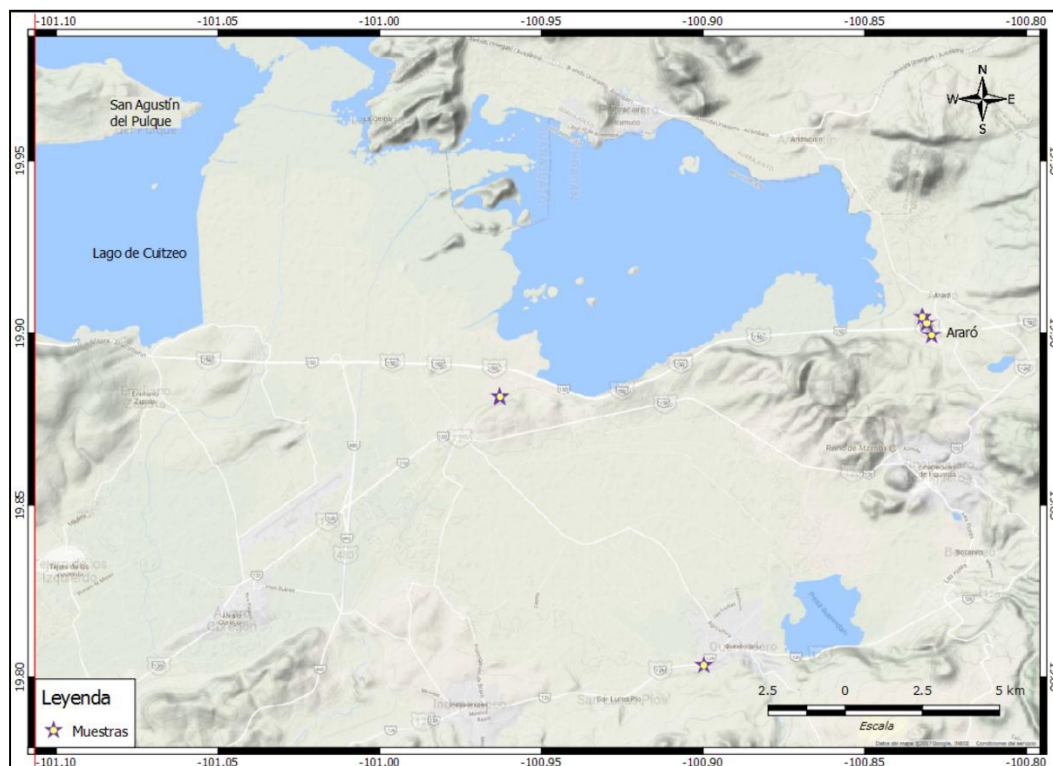


Figura 3:6 Imagen satelital que las manifestaciones (morado) en la región de Araró y San Agustín del Pulque.

a) La Salud

Ubicación: 308345 E | 2201774 N

Se ubica en la parte centro-sur de la región geotérmica de Araró, a unos 25 kilómetros al noreste del campo geotérmico de Los Azufres y al oriente del Lago de Cuitzeo. La zona denominada incluye tres descargas termales: una en La Salud y dos en Zimirao. La zona se encuentra al interior de una depresión tectónica de dirección general E-W, conocida como graben de Cuitzeo-Maravatío, que parece ser parte de una fosa tectónica más grande que se extiende desde Chapala, Jalisco hasta Tepetongo, Estado de México (Hiriart, G., 2011). Las fallas más relevantes en la zona de Araró son la Falla Huingo y Falla Araró-Zimirao, se presentan con una dirección casi E-W, 10° y 15° , respectivamente. (Figura 3.7). Cabe

mencionar que al sur de la zona de estudio afloran una serie de domos, lavas riolíticas y tobas riolíticas con intercalaciones de flujos piroclásticos con edades entre 0.9 y 1.6 millones de años (Morán Zenteno, 1984). En particular las rocas volcánicas que afloran en la zona son tres unidades: (a) ignimbrita (Tmi) del Mioceno medio, (b) andesitas basálticas (Qpab) del Pleistoceno temprano y (c) depósitos piroclásticos con alteraciones hidrotermales. Además de las rocas volcánicas existen depósitos lacustres y aluviales (Qal) que cubren a las rocas volcánicas hacia el oeste de la zona de estudio (Figura 3.7).



Figura 3:7 Manantial gas-hidrotermal de Zimiraio con emanaciones de gas con olor fétido, la línea amarilla es el escarpe de falla con dirección NE-SW15°.

b) Manantiales Los Hervideros

Ubicación: 308345 E | 2201774 N

Manantial termal de líquido y gas y una poza de lodo a 15 m con temperaturas de 92° y 90°C respectivamente (Figura 3.8). Las emanaciones son energéticas y con una periodicidad cíclica de 45 segundos. Al igual que en el Balneario Huingo, se observa el desarrollo de terrazas difusas con costras de 1 a 4 cm. de espesor. El manantial está encajonado en rocas basalto-andesitas y cubierto por sedimentos denominados “salineras” (Figura 3.9), los cuales se desarrollan únicamente en la zona de alteración. Los depósitos asociados a estos manantiales son principalmente sedimentos mineralizados y pátinas.



Figura 3:8 Manantial termal en Los Hervideros con emanaciones de líquido y gas



Figura 3:9 Sedimentos denominados salineras desarrollados en el área de alteración.

c) Balneario Huingo

Ubicación: 308212 E | 2201977 N

Manantial termal de fluido difuso con temperatura de 78°C. Hacia el fondo del manantial se observan sedimentos y biofilmes de color verde y naranja, además del desarrollo incipiente de terrazas silicocarbonatadas con crecimientos botroidales hacia la superficie (Figura 3.10). Como precipitados hidrotermales se distinguen agregados de ópalo con restos de organismos (Figura 3.11A) y esferas silicocarbonatadas de color blanco, posiblemente estromatolitos (Figura 3.11B). En el área hay emanación de fluidos difusos, depositación de Sedimentos y biofitos verdes y naranja en el fondo del manantial y terrazas incipientes a la orilla en crecimientos botroidales hacia superficie, hay también presencia de ópalo con restos de organismos y “costras” blancas sílico-carbonatadas llamadas estromatolitos.



Figura 3:10 Desarrollo de terrazas con crecimiento hacia la superficie por actividad hidrotermal representadas dentro de la elipse color amarillo.

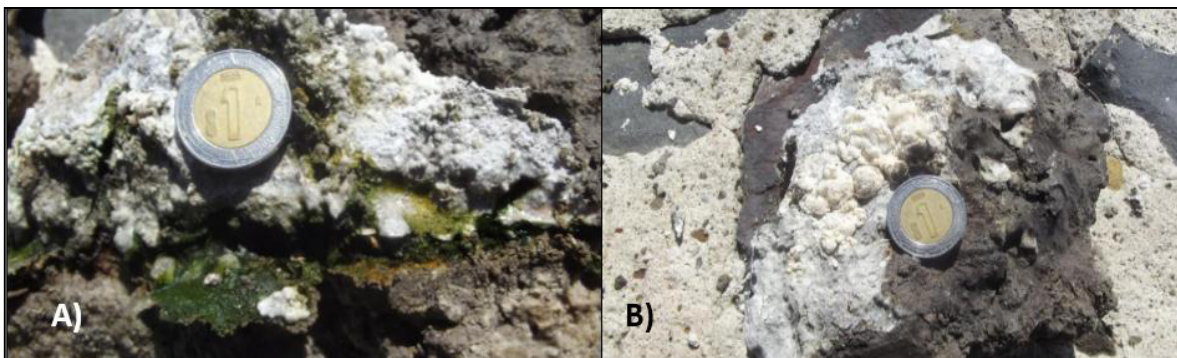


Figura 3:11 Depósitos hidrotermales desarrollados adyacentes al manantial termal de Huingo. A) La presencia de biofilmes en tonalidades verdes y naranjas está asociada a estos depósitos y B) En la imagen se aprecian las esferas silicocarbonatadas de color blanco.

d) San Agustín del Pulque

Ubicación: 282105E/2210358N

Ciénega hacia el Oeste del lago, en la comunidad de San Miguel de Pulque, en este manantial se presentan terrazas hacia el lago con una extensión aproximada de 18 metros, hacia la terraza se observan sedimentos y biofilmes de color gris con alto contenido de organismos como por ejemplo, estromatolitos, tallos de plantas, diatomeas (Figura 3.12), además del desarrollo incipiente de terrazas silicocarbonatadas hacia la superficie. Presenta una temperatura en las pozas de lodo de 64.4 °C aproximadamente.



Figura 3:12 Imagen que muestra sedimento de San Agustín de Pulque, se aprecian organismos, como tallos, diatomeas y algunas plantas.

4. METODOLOGÍA

En el proceso de la investigación del presente trabajo, se desarrollaron los siguientes métodos para alcanzar los objetivos: (1) Planteamiento del problema y establecimiento de los objetivos del trabajo, (2) Consulta y recopilación bibliográfica, (3) Trabajo de campo, (4) Trabajo de laboratorio, (5) Análisis y procesado de los resultados, (6) Discusión y conclusiones.

4.1 CAMPAÑA DE MUESTREO

En el estudio de la zona geotérmica de Araró se realizaron dos campañas de campo a los sitios con manifestaciones termales superficiales: manantiales activos, zonas con depósitos de sínter y regiones con alteración hidrotermal, en los alrededores de las localidades de Huingo y Los Hervideros, al sur del poblado de Araró y en la comunidad de San Miguel del Pulque, en el estado de Michoacán. En ambas salidas a campo se recolectaron muestras litológicas, de depósito, de alteración hidrotermal y de las manifestaciones termales. De las muestras recolectadas se seleccionaron las más representativas para petrografía y el posterior análisis mineralógico. Para los manantiales termales, se recolectaron muestras del sedimento del fondo y alrededor de los mismos. Las muestras correspondientes a los depósitos hidrotermales constan de costras y depósitos estromatolíticos (sínter) adyacentes a las manifestaciones, así como en suelos. Así mismo se recolectaron muestras de rocas volcánicas alteradas presentes en los alrededores de la región.

Para el análisis químico de muestras de fluidos geotérmicos son necesarias técnicas analíticas (Arnórsson *et al.*, 2006) como: cromatografía iónica (CI) multiparámetro (que mida pH, conductividad y temperatura), espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente, y un espectrómetro de masas para determinar la relación isotópica. Los sulfuros son comúnmente determinados por espectrofotometría de ultravioleta visible. Estos instrumentos analíticos y métodos son precisos, rápidos y tienen una baja interferencia inter-elemental, lo cual es vital cuando los análisis de muestras son multicomponente. Adicionalmente, en laboratorio se utilizaron materiales de referencia certificados para validar las metodologías analíticas y tener resultados confiables (ej., precisión, exactitud, límite de detección, etc.).

4.2 SITIOS DE MUESTREO

Los puntos de muestra se presentan a continuación:

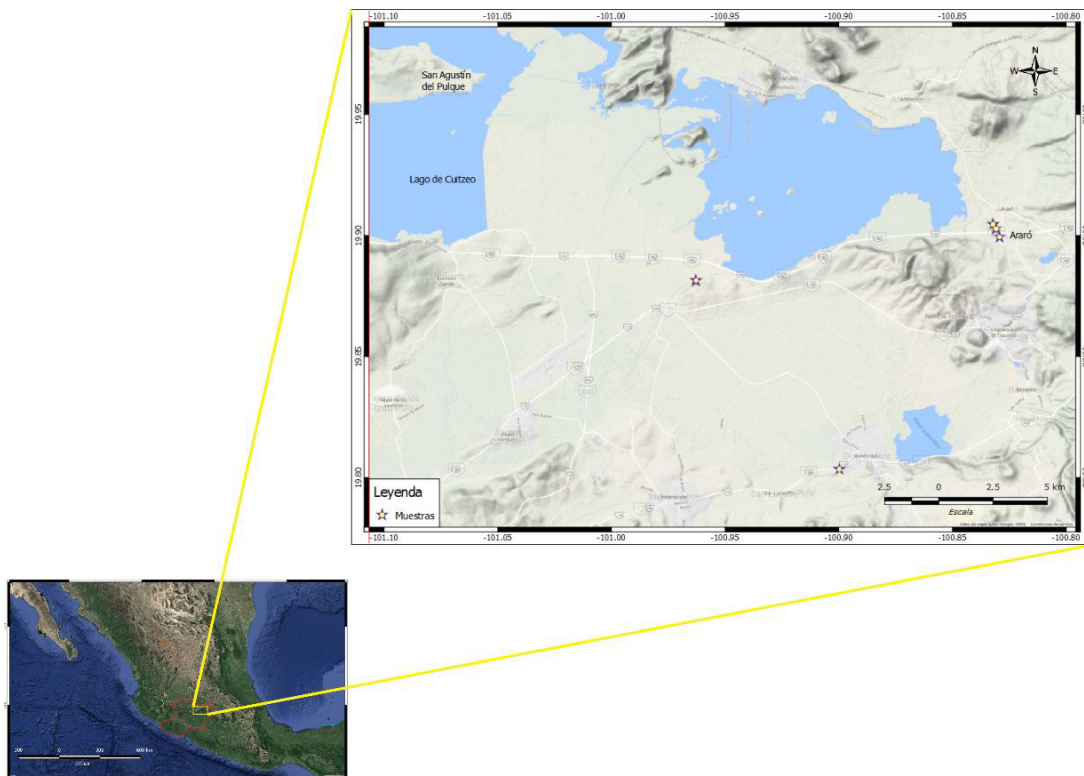


Figura 4:1 Presenta las localidades termales muestreadas (estrellas).

Las muestras de rocas se sometieron al análisis petrográfico, microsonda electrónica y SWIR y se analizarán en el Instituto de Geofísica de la UNAM, con la finalidad de conocer la mineralogía y la cuantificación de las fases minerales, así como para conocer las asociaciones minerales secundarias en las zonas de descarga. Se utilizará también el método de DRX (Difracción de rayos X) para conocer las fases minerales de las rocas y de la zona de descarga, dicho análisis se llevará a cabo en el Instituto de Geología de la UNAM. Finalmente se utilizará el ICP-OES (espectrometría de emisión atómica-plasma inductivamente acoplado) de la Unidad de Geoquímica de Fluidos Geotérmicos (UGFG) del Instituto de Geofísica de la UNAM para la medición de elementos mayores y traza de las rocas. En caso de que esta técnica no cuente con los límites de detección para los elementos traza, las muestras serán enviadas al laboratorio de ICP-MS. Para el análisis de aniones se empleará un cromatógrafo iónico y para la determinación de las relaciones isotópicas de isótopos estables en agua (δD y $\delta^{18}O$) se usó un equipo de la marca PICARRO. Las muestras

colectadas fueron tratadas en la UGFG, donde se analizaron seis muestras de manantiales termales.

La determinación cuantitativa de la composición química se realizó empleando curvas de calibración definiendo el rango de trabajo de acuerdo a coeficiente de regresión arriba de 0.99. Las lecturas se realizaron con blancos de reactivos para discriminar posibles fuentes de contaminación. Para el análisis de la relación isotópica, se emplearon materiales de referencia isotópica SMOW y GISP.

Para evaluar la calidad de los análisis químicos se determinó el balance iónico y se interpretaron las muestras que tengan un balance iónico que se encuentre entre -10 a 10%.

4.3 PETROGRAFÍA

Es la descripción y clasificación de las rocas y tipologías de alteraciones, evidenciando la interacción de fluido con la roca. La identificación mineral y texturas de las láminas se realizaron por medio de la microscopía óptica de luz reflejada y transmitida. La identificación y parametrización de las asociaciones minerales proporciona una información importante sobre algunos recursos de interés económico. En un caso especial podrían evidenciar la presencia de menas de minerales metálicos como el Au, Ag o bien en el caso de la geotermia caracterizar un sistema geotérmico. De las muestras analizadas se tomaron fotografías de puntos particulares de la lámina, como, los minerales presentes, texturas, etc. (ANEXO 1).

El análisis de microscopía óptica se realizó con un microscopio Zeiss modelo Axiolab ubicado en el Laboratorio de Petrografía y Minerografía del Departamento de Recursos Naturales del Instituto de Geofísica, UNAM. (Figura 4.2).



Figura 4:2 Microscopio Zeiss con analizador de imágenes utilizado para la descripción petrográfica de las muestras.

4.4 DIFRACCIÓN DE RAYOS X

La difracción de rayos X (DRX) es una técnica analítica versátil que se emplea para examinar sólidos cristalinos, por ejemplo: metales, cerámica, muestras geológicas, materiales electrónicos, entre otros dependiendo de la medición deseada. La ventaja de la aplicación de este método incurre en la capacidad de obtener datos cuantitativos como cualitativos. Generalmente este análisis es utilizado para determinar la estructura cristalina de un sólido, así como la identificación de sus fases (Swapna, 2011). La identificación de la fase mineral se basa en que cada red cristalina produce una difracción característica al ser irradiada mediante un haz de rayos X. Este hecho es la base para el uso de la difracción como método de análisis químico e identificación de las diferentes fases minerales (Melgarejo *et al.*, 2010). Para el presente trabajo, este método fue utilizado para llevar a cabo el análisis de siete muestras de depósitos hidrotermales, con el objetivo de caracterizar las fases minerales de sílice. El equipo utilizado para el análisis de DRX es un difractómetro Shimadzu XRD-6000 con un voltaje de 40 kV y una corriente de 30 mA, utilizando radiación CuK y un monocromador de grafito del Instituto de Geología de la UNAM (Figura 4.3) Previamente al análisis, las muestras se molieron, trituraron y homogeneizaron mediante un mortero de ágata, además se midieron utilizando un porta muestras de aluminio (fracciones no

orientadas). La medición se realizó en el intervalo angular 2θ de 5° a 70° en escaneo por pasos con un “step scan” de 0.003° (2 Theta) y un tiempo de integración de 40s por paso.

Para la identificación de los difractogramas por el método de polvo se utilizó el método de Hanawalt, aplicando el software High Score Plus con la base de datos PDF2.DAT del ICDD y manualmente por tablas y ficheros. Los difractogramas que presentaron fases de ópalo se procesaron adicionalmente por medio del Software Data Viewer, para identificar las variedades de ópalo en los sínter (grado de cristalinidad y ordenamiento). El procesado de los difractogramas se realizó en el Laboratorio de Difracción de Rayos X, del Departamento de Geoquímica en el Instituto de Geología, UNAM.



Figura 4:3 Difractómetro EMPYREAN equipado con filtro de Ni, tubo de cobre de foco fino y detector PIXcel3D, del Laboratorio de Difracción de Rayos X, del Departamento de Geoquímica, en el Instituto de Geología, UNAM.

4.5 MICROSCOPIO ELECTRÓNICO DE BARRIDO

El Microscopio Electrónico de Barrido (SEM por sus siglas en inglés: Scanning Electron Microscope) es el método más utilizado para la caracterización superficial morfológica de sólidos; este método es común para verificar los cambios morfológicos en la matriz de sílice durante la diagénesis en los depósitos de sínter (Lynne *et al.*, 2013). La técnica se basa en que utiliza un haz de electrones focalizado de alta energía el cual “barre” la superficie sólida de una muestra. La interacción entre los electrones y la muestra genera información acerca de la composición química, morfología externa, estructura cristalina y orientación del material que compone la muestra.

Electrones secundarios producen imágenes de SEM con una resolución especial de 50 a 100 nm (magnificación de 20 x 60,000) con información sobre la morfología del espécimen.

- “Back-scattered electrons” (electrones retrodispersados) proporcionan información relacionada a la estructura cristalina y a la orientación de los diferentes minerales en el material analizado.

- Rayos X son captados por el sistema “EDS” (Energy Dispersive Spectrometer por sus siglas en inglés) el cual permite mediante un análisis semi-cuantitativo, identificar los elementos presentes en la muestra.

El SEM utilizado para el análisis de los depósitos hidrotermales es de bajo vacío o de tipo ambiental. La ventaja de este equipo es su facilidad de operación y que no requiere una preparación de la muestra para su análisis, exceptuando retirar lo más posible la humedad en la muestra con secado al aire libre y 30 m en un horno a temperatura de 60°C. El MEB ambiental utilizado es un Hitachi TM-1000 localizado en el Laboratorio de Petrografía y Microtermometría de Inclusiones Fluidas del Instituto de Geofísica de la UNAM (Figura 4.4).



Figura 4:4 Imagen del MEB utilizado para los análisis mineralógicos.

4.6 ESPECTROMETRÍA DE INFRARROJO DE ONDA CORTA

La espectrometría de infrarrojo de onda corta (“SWIR” por sus siglas en inglés ShortWavelength Infrared) es un método relativamente nuevo que ha tenido un gran impacto en el campo de la exploración de recursos minerales y, particularmente en el de la geotermia, ya que ha generado nuevas perspectivas para las incipientes etapas de prospección. La ventaja en la aplicación de este método radica en que permite la obtención rápida de las alteraciones hidrotermales, ya sea sobre el terreno o sobre minerales de alteración hidrotermal. Las muestras no requieren alguna preparación previa para su análisis. Estos datos suponen una mejor comprensión de lo que se observa físicamente en campo (Thompson *et al.*, 1999; Yang *et al.*, 2001). El principio del SWIR se basa en el hecho de que los componentes químicos de los minerales tienen frecuencias de vibración específicas, que corresponden a los niveles de energía que poseen las moléculas al interactuar con una fuente energética. Estos niveles dependen de la energía potencial, geometría y masa de la molécula (Thompson *et al.*, 1999); la interacción de la energía de vibración, la absorbancia y reflectividad dan como resultado espectros de infrarrojo característicos de fases minerales que pueden ser comparados con bases de datos existentes (Clark *et al.*, 2007), esto permite la rápida identificación de minerales de alteración hidrotermal. Para los análisis del presente trabajo, se utilizó un espectrómetro portátil LabSpec Pro (Analytical Spectral Devices, Inc.) (Figura 4.5), del Laboratorio de Petrografía y Microtermometría del Instituto de Geofísica de la UNAM.

La absorción de radiación infrarroja por moléculas está asociada a cambio en el estado de vibraciones y/o rotaciones. Los modos de vibración de una molécula incluyen deformaciones tipo tracción (elongación), compresión y bandeo la finalidad de las aplicaciones de espectroscopia IR es la determinación de los grupos funcionales que contiene un determinado mineral, a partir de los espectros de absorción, transmisión, reflexión en la región espectral determinada.



Figura 4:5 Imagen del espectrómetro portátil LabSpecPro utilizado para realizar los análisis de SWIR.

4.7 CROMATOGRAFÍA IÓNICA

Para el análisis de muestras de este trabajo se utilizó el cromatógrafo Iónico Marco Thermo Scientific modelo: Dionex ICS 5000+ DC, de la Unidad de análisis químicos de fluidos geotérmicos de la UNAM, a cargo de la Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada (Figura 4.6). La técnica de cromatografía iónica se aplica para separar los componentes de una mezcla de acuerdo a la afinidad química del analito por la fase móvil (solución acarreador) y fase estacionaria (columna cromatográfica).

Para evaluar la calidad de los resultados químicos se evaluó el balance iónico, el cual representa las sumas de las concentraciones equivalentes de los cationes y aniones. Indica que la solución debe tener iguales concentraciones de iones mayoritarios en solución. En la bibliografía se acepta un análisis químico si el balance iónico tiene un valor entre -10 y 10% y por tanto puede interpretarse con confiabilidad.



Figura 4:6 Cromatógrafo Iónico, Dionex ICS 5000+ DC.

4.8 ESPECTRÓMETRO LÁSER CRDS PARA ISOTÓPOS ESTABLES

Los isótopos son átomos de un mismo elemento químico, por lo que tienen igual número de protones (número atómico). Sin embargo, el número de neutrones es distinto, por lo que la masa atómica, igual a la suma de protones y neutrones, es diferente. Por ejemplo, el hidrógeno tiene tres isótopos, los cuales se representan con el símbolo químico respectivo (H) y un índice superior izquierdo que indica la masa: ^1H , ^2H y ^3H . Algunos de los isótopos de los elementos ligeros, es decir con números atómicos pequeños, son estables, por lo que siempre permanecen con la configuración atómica que les es propia. Tal es el caso del ^1H y del ^2H ; este último conocido también como deuterio (D). Otros, como el ^3H , conocido también como tritio (T), son inestables. Esto significa que su configuración atómica no puede permanecer y decaen o se transforman en otra configuración distinta. Al hacerlo, emiten radiación, que puede ser de tres tipos diferentes: partículas alfa (dos protones y dos neutrones), beta (un electrón o un positrón) o gama (un fotón) (Tabla 2).

Tabla 2. Muestra los isotopos estables.

Nombre	Símbolo	Número atómico	Masa atómica	Abundancia Natural %
Hidrógeno	H	1	1	99,985
Deuterio	D	1	2	0.015
Carbono 12	12c	6	12	98,89
Carbono 13	13c	6	13	1,11
Oxígeno 16	16o	8	16	99,76
Oxígeno 17	17o	8	17	0,04
Oxígeno 18	18o	8	18	0,20
Azufre 32	32s	16	32	95,0
Azufre 33	33s	16	33	0,76
Azufre 34	34s	16	34	4,22
Azufre 36	36s	16	36	0,02

El analizador de agua isotópico tiene tres componentes: un gas acarreador (N_2) que transporta la muestra dentro del instrumento para medir la relación isotópica la concentración y el contenido isotópico de agua en forma de vapor, un evaporador líquido que convierte las muestras de agua líquida en vapor y un inyector automático que introduce las muestras de agua líquida en el evaporador. Para calibrar el instrumento, se midieron los materiales de referencia certificados (MRC) de agua para que los datos pudieran ser escalados (Los MRC empleados fueron VSMOW y GIPS).

El agua geotérmica se origina principalmente del agua meteórica que se infiltra. Pero de acuerdo al contexto geológico-tectónico, el agua puede tener una firma isotópica de origen 'magmático'. Según Giggenbach (1988), el agua magmática tiene una composición isotópica característica, según corresponda a un ambiente de magmas de tipo básico (centros de dispersión oceánica y de apertura continental) o de magmas andesíticos (centros de subducción). En el primer caso, los valores $\delta D\%$ varían de -5 a -35 y los valores $\delta^{18}O\%$ de +8 a +11. En el segundo caso el rango de $\delta D\%$ va de -60 a -85 y el de $\delta^{18}O\%$ de +5 a +8). Las aguas geotérmicas tienen un enriquecimiento en $\delta^{18}O$ con respecto al agua meteórica (Giggenbach).

Para la determinación isotópica del agua se utilizó el equipo de PICARRO, de la Unidad Geoquímica de Fluidos Geotérmicos de la UNAM, a cargo de la Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada (Figura 4.7).



Figura 4:7 CRDS (Analizador de isótopos estables), Laboratorio de UGFG del instituto de Geofísica de la UNAM.

4.9 TÉCNICA ESPECTROSCOPIA DE EMISIÓN ATÓMICA

La técnica de espectroscopía de emisión atómica de plasma acoplado por inducción (ICP-OES) se basa en la radiación emitida cuando un átomo o ion excitado por absorción de energía de una fuente caliente, se relaja a su estado fundamental. La cantidad de energía emitida dependerá de la cantidad de átomos presentes del metal correspondiente. El primer paso, por tanto, es la atomización de la muestra. Para excitar los átomos se utiliza plasma de argón a 10000 K, constituido por una mezcla gaseosa conductora de argón, electrones y cationes de la muestra a analizar. Para determinar la concentración, esencialmente, se necesita un nebulizador para conseguir un aerosol de partículas y un atomizador que mediante calentamiento (plasma o llama) produce átomos o iones independientes. El equipo consta básicamente con un sistema de excitación térmico (la propia fuente de atomización) y un detector. Para determinar la concentración de los metales se realizan en primer lugar las curvas de calibración correspondientes a cada metal en el intervalo de concentración comprendido entre 0 y 10 mg/l-1. Para cada metal se realizan cuatro puntos de calibración. Las disoluciones se preparan a partir de disoluciones patrón certificadas para análisis de emisión atómica de 1000 mg/l-1 en medio ácido nítrico (Figura 4.8) (Peter, 1992).



Figura 4:8 Componentes del ICP-OES.

Para el análisis de muestras de este trabajo se utilizó el ICP-OES de la Unidad Geoquímica de Fluidos Geotérmicos de la UNAM, a cargo de la Dra. Ruth Esther Villanueva Estrada (Figura 4.9).

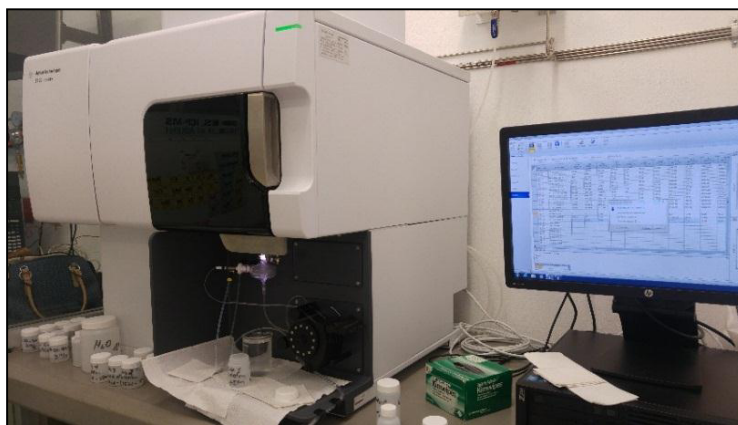


Figura 4:9 ICP-OES (Analizador de elementos traza) del laboratorio UGFG, de la UNAM.

5. RESULTADOS

5.1 MANIFESTACIONES LA REGIÓN DE ARARÓ Y SAN AGUSTÍN DEL PULQUE.

El área de estudio, cuenta con cuatro sistemas termales que se extienden de Norte a Sur, estos son: a) Huingo, b) Los Hervideros, c) La Salud y d) Zimirao, mientras que al Oeste de Araró y del Lago del Cuitzeo se encuentra una zona de Ciénegas, en el poblado de San Agustín del Pulque, con una alineación predominante NW 30°, influenciados por el fallamiento regional E-W (Figura 5.1).

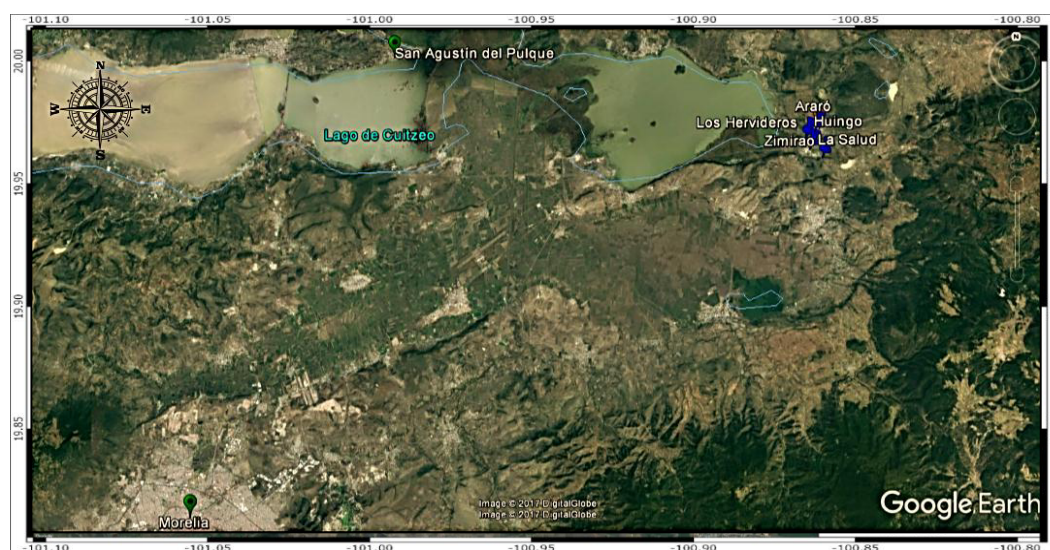


Figura 5: Ubicación de manifestaciones termales con el patrón alineamiento que tienen, fallas presentes y el límite de la alteración hidrotermal en la zona geotérmica de Araró.

Se describirán en el presente trabajo: (a) poza de lodo ubicado en un escarpe de falla con dirección NE-SW15° (Figura 5.1), el cual presenta una temperatura de 84.6°C, con emanaciones continuas de vapor y desprendimiento de un olor fétido, evidenciando contenido de azufre (Figura 5.2).



Figura 5:2 Poza de lodo de Zimira con emanaciones de gas con olor fétido.

El sedimento al fondo de la manifestación presenta coloraciones grises claras, a marrones y tonos amarillos (ver ANEXO 1), en contrastante con el suelo adyacente a la manifestación en color gris oscuro. La muestra colectada en este sitio se etiquetó como SS-5. Mediante observaciones y análisis de SEM, EDS y DRX se determinó la presencia de minerales de sílice (ópalo y cuarzo), yeso, cinabrio, titanomagnetita y minerales de arcilla (grupo de la esmectica) (Figura 5.3).

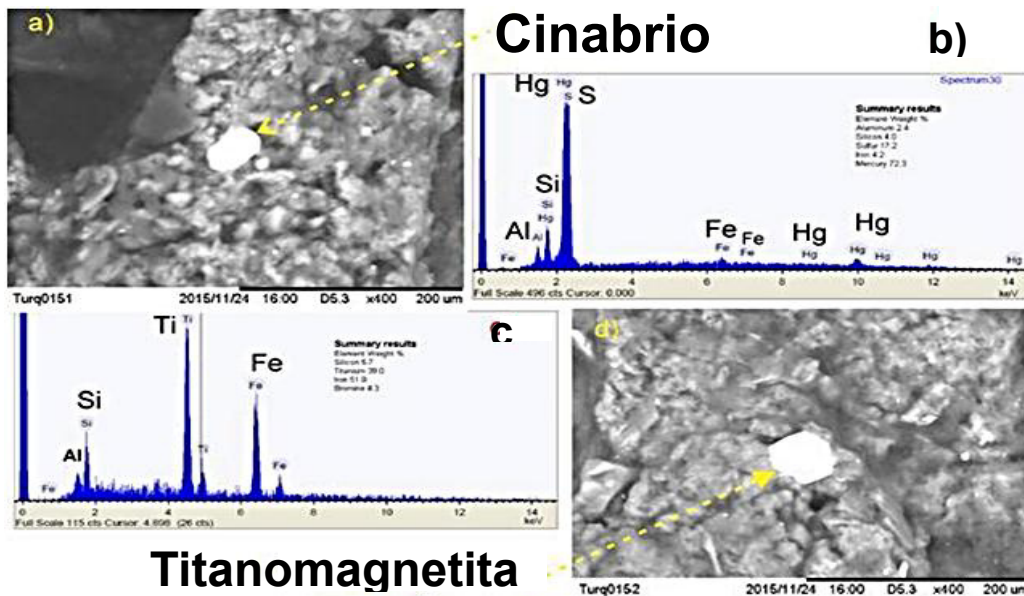


Figura 5:3 Minerales depositados en el sedimento del manantial termal. Imágenes de SEM y análisis EDS (muestra SS-5). a) Cinabrio dispuesto entre las partículas de silicatos del sedimento. b) Espectro EDS evidenciando la presencia del mineral de mercurio cinabrio c) Espectro EDS del mineral titanomagnetita d) Titanomagnetita hexagonal, procedente de la roca encajonante.

b) La segunda manifestación en la zona de Zimirao a partir del manantial gas-hidrotermal (poza de lodo) se encuentra con dirección NE a una distancia de 70 m sobre la falla regional NW (Figura 5.1). Se describe como una con una temperatura promedio de 73°C. Esta manifestación está estrechamente relacionada con el fallamiento regional E-O por el cual se filtra hacia la superficie el gas, principalmente. Alrededor de la fumarola se aprecian depósitos minerales en forma de costras y agregados arriñonados (Figura 5.4 A). Los depósitos se observaron y analizaron por SEM, EDS y DRX encontrando la asociación de minerales de sílice (ópalo, principalmente) y barita (Figura 5.4). Localmente en este suelo se extraen artesanalmente sales para su comercialización en la región. Este suelo se compone de granos de arena fina, limo y arcillas, con escasa materia orgánica, siendo un depósito lacustre de la extensión del Lago de Cuitzeo en tiempos remotos.



Figura 5:4 Depósitos asociados a la fumarola. A) Imagen de costras de ópalo formadas en la pared de la barda al pie de la fumarola B) Imagen de la fumarola.

Entre y sobre las partículas detríticas y monominerales del suelo se encuentran cristales y patinas de minerales de alteración y depósito hidrotermal. A partir de los estudios de SEM, DRX y SWIR se identificaron las fases minerales de la actividad termal. La asociación mineral del suelo son: ópalo, yeso, cuarzo ulexita ($(\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5(\text{H}_2\text{O}))$), esmectita, illita, casiterita, barita, titanomagnetitas y cinabrio (Figura 5.5).

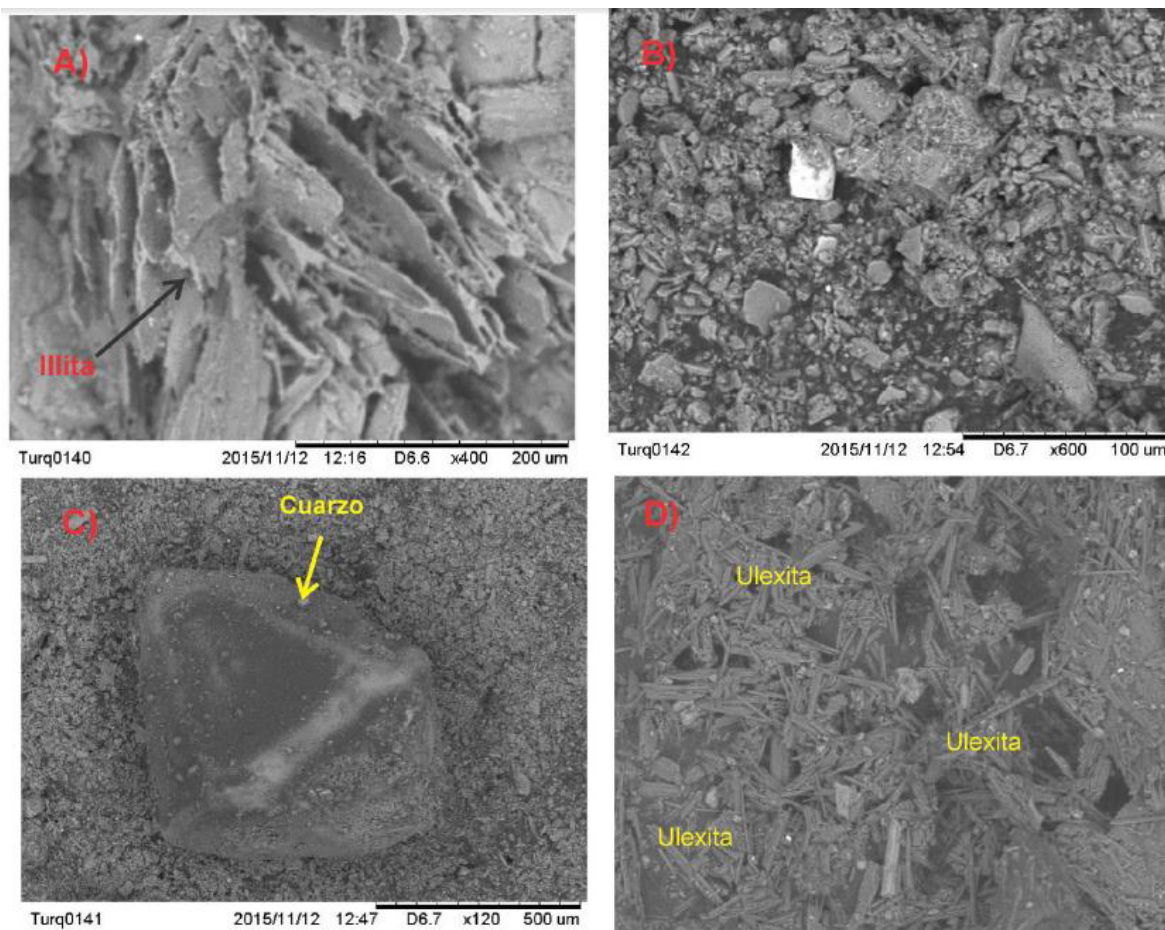


Figura 5:5 Imágenes del análisis de alteraciones de suelo. A) Imagen de tablillas del mineral de Illita. B) Imagen general de las partículas sólidas que componen el suelo en su mayoría de sílice. C) Imagen de un cuarzo bipiramidal como componente del suelo. D) Imagen del mineral de ulexita con una morfología similar a la de tablillas de diferentes tamaños.

a) Balneario Huingo

El manantial Huingo se manifiesta como una emanación de fluidos difusa desde un sustrato de sedimentos (Figura 5.6). La descarga tiene una temperatura de 78°C, con un valor de pH medido de 7.3. El manantial ha sido canalizado mediante una estructura de concreto con el fin de recolectar las aguas termales y utilizarlas con fines recreativos/curativos. Los sedimentos mineralizados del manantial termal Huingo se componen de una granulometría fina de partículas compuestas de silicatos y precipitados minerales de origen hidrotermal. Estos precipitados minerales se componen de la asociación de illita, esmectita, ópalo, barita (Figura 5.7A), pirita y arsenopirita (Figura 5.7). Además, se observan restos de plantas y diatomeas (Figuras 5.8).



Figura 5:6 Balneario de Huingo. Emanación de fluidos desde un sustrato de sedimentos.

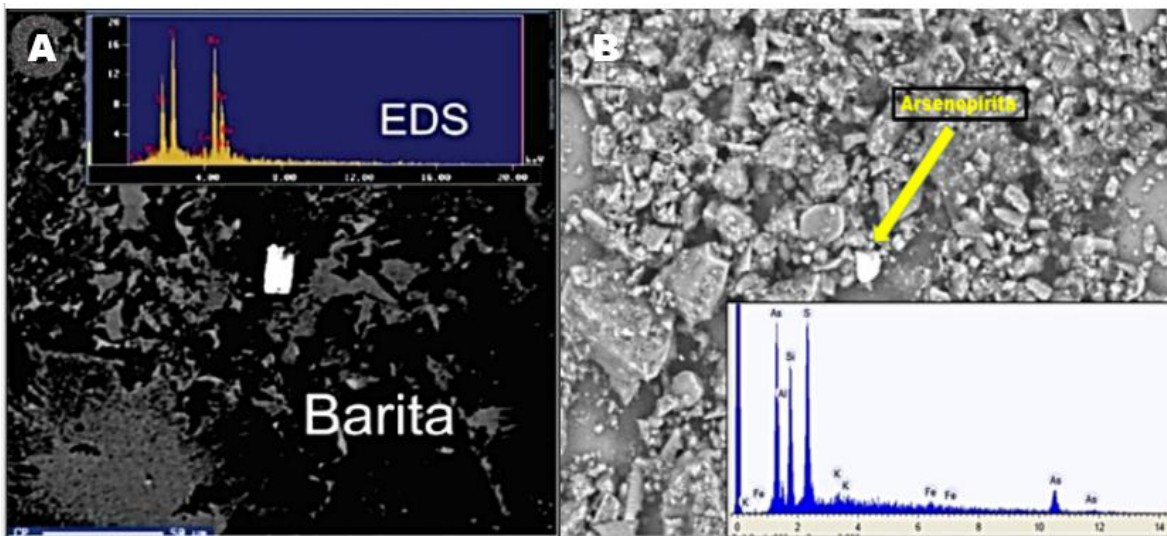


Figura 5:7 A) Barita detectada en sedimentos mineralizados del Balneario Huingo y B) Mineral de arsenopirita (centro) observado mediante MEB en sedimento del Balneario Huingo; incluye espectro EDS donde predominan los elementos arsénico, aluminio, potasio y hierro además del silicio.

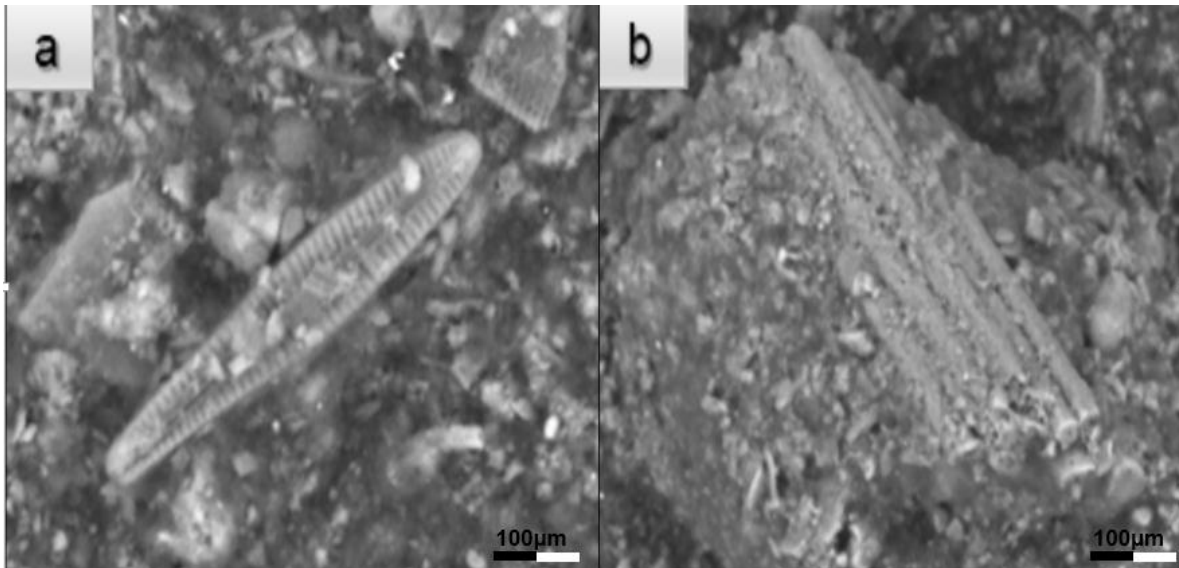


Figura 5:8 Organismos presentes en sedimento mineralizado del área de Huingo; muestra BH1-10 a) Diatomea con buena preservación, b) parte de planta incrustada en matriz de ópalo. Imágenes obtenidas mediante MEB.

Los depósitos estromatolíticos son del tipo silíceo, con ocasionales bandas coloformales de carbonatos, estas estructuras se encuentran distales de la zona de descarga principal y crecen a partir del sustrato rocoso o de las paredes de canales de descarga del agua termal hacia los baños de Huingo (Figura 5.9).



Figura 5:9 Estructura de depósito tipo sinter. Desarrollado por la precipitación en superficie de soluciones hidrotermales ricas en sílice

Los depósitos de sínter presentan texturas similares al ser observados bajo el microscopio, debido a que los factores que propiciaron su desarrollo son afines. La textura de tipo coliforme predomina en las 4 muestras de sínter analizadas. Se observan filamentos tubulares posiblemente cianobacterias (Figura 5.10).

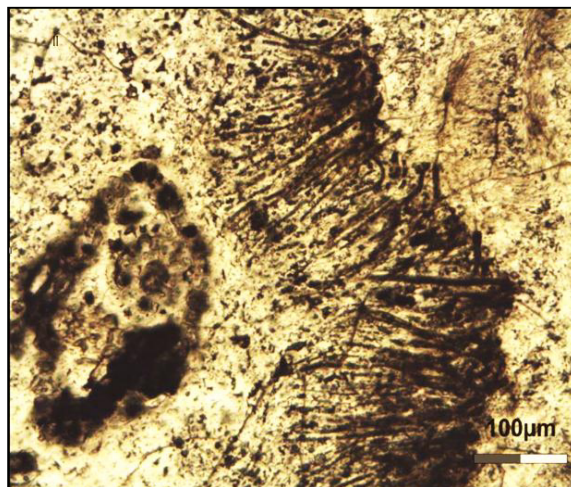


Figura 5:10 Estructuras fibrosas en muestra de sínter, posiblemente cianobacterias. Muestra SH, objetivo: 10x, NII.

En las muestras de sínter obtenidas en la zona de Balnearios Huingo, no se observan huecos dentro de la matriz; estos representan las burbujas de gas silicificadas que han quedado impresas y en base a ellos se pueden inferir ciertas características del desarrollo de los sínter (Lynne & Campbell, 2003; Lynne *et al*, 2013). Restos de plantas y diatomeas, tanto en grupos numerosos como especímenes solitarios también son observados (Figura 5.11).

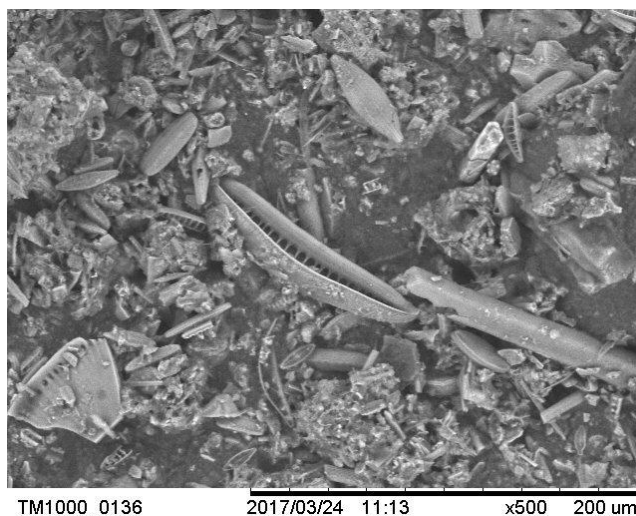


Figura 5:11 Diatomeas presentes en muestra SH (Sinter Huingo). La mineralogía presente es mayormente ópalo con escasos minerales y abundantes restos de organismos.

Como minerales y líticos se distinguen arcillas, óxidos de hierro, monominerales de cuarzo, carbonatos, plagioclasas y fragmentos de roca basáltica (Figura 5.12). La composición de la mayoría de las muestras de sínter es principalmente ópalo amorfo del tipo A, ópalo CT, tridimita y cantidades accesorias de minerales de arcilla. La composición mineralógica fue determinada mediante análisis de DRX y SWIR; además, mediante MEB se comprobó la predominancia de ópalo A por la morfología en que este mineral se desarrolla (Figura 5.13 Anexo 1).

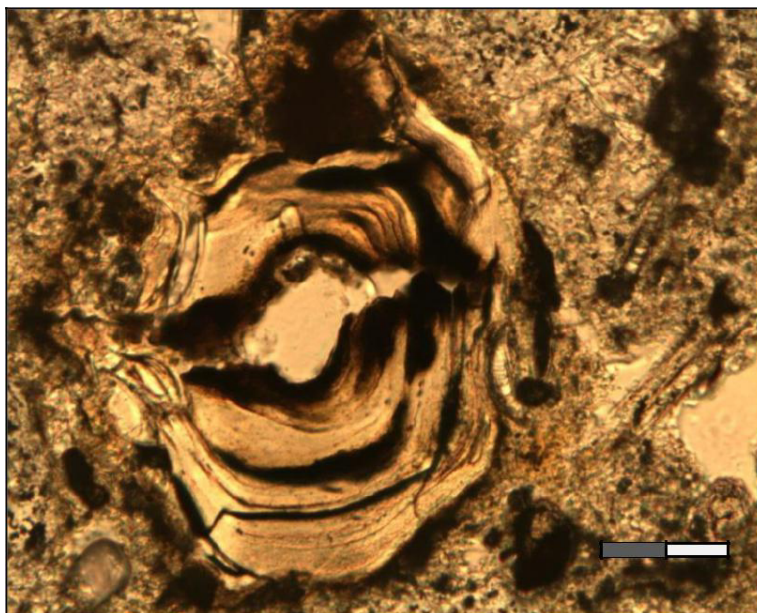


Figura 5:12 Carbonato concéntrico y diatomea (sector derecho) en matriz de ópalo con textura coloforme. Muestra MAR-6, objetivo 20x, NII.

Asociado a estos desarrollos estromatolíticos se encuentran tapetes microbianos de colores verde y ocre, de textura musgosa y gelatinosa, su mayor desarrollo se evidencia en los canales de descarga hacia el balneario.

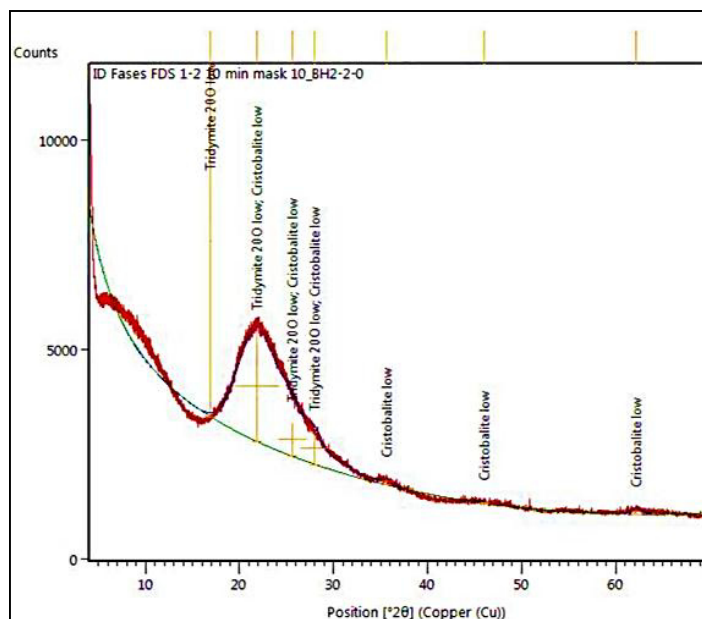


Figura 5:13 Difractograma de la muestra BH2-2 en un sector con tonalidad oscuro. Destacan el ópalo y tridimita como minerales abundantes.

b) Manantiales Los Hervideros

Los sedimentos mineralizados se componen de la asociación de illita, esmectita, ópalo, pirita y arsenopirita identificados mediante DRX, EDS y SWIR (Figura. 5.14).

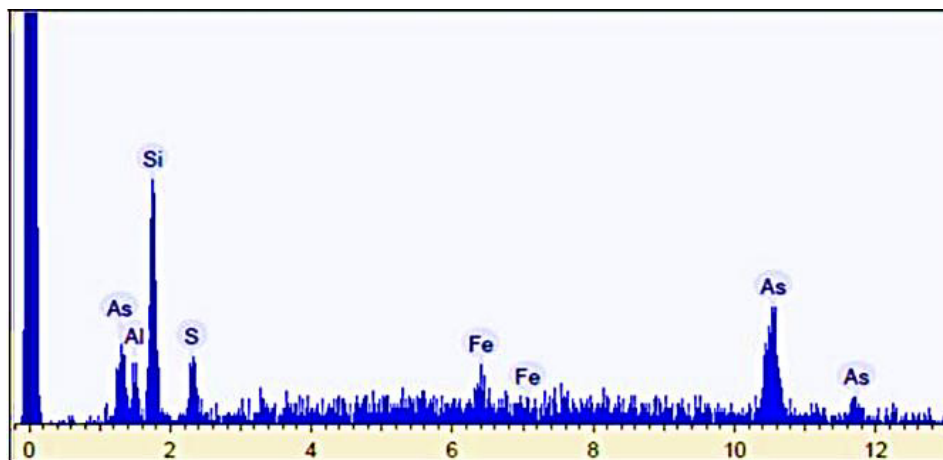


Figura 5:14 Espectro de EDS obtenido mediante MEB en un mineral altamente reflectante en muestra BH2-1, correspondiente a sedimento del área de Los Hervideros. Se identifica este mineral como arsenopirita.

c) San Agustín del Pulque

Los sedimentos de lodo en las pozas lodosas de esta área, se encontraron aplicando análisis de SEM, en la muestra EQ11, con su espectro de SWIR, se presentan organismos tabulares (ramitas), bolitas (sílice), diatomeas, tiene feldespatos alterados (Figura 5.15 Y 5.16), ya estuvo más tiempo recibiendo el fluido o descarga hidrotermal, también denota la posibilidad que la extensión del lago sea de grandes magnitudes, posiblemente llegando hasta la estación Queréndaro. Además de un clasto brillante de hierro (Figura 15.17), espectro EDS de Pirita, probablemente Titanomagnetita, pero no es de relevancia, ya que este clasto es heredado de la roca encajonante (Figura 15.18).

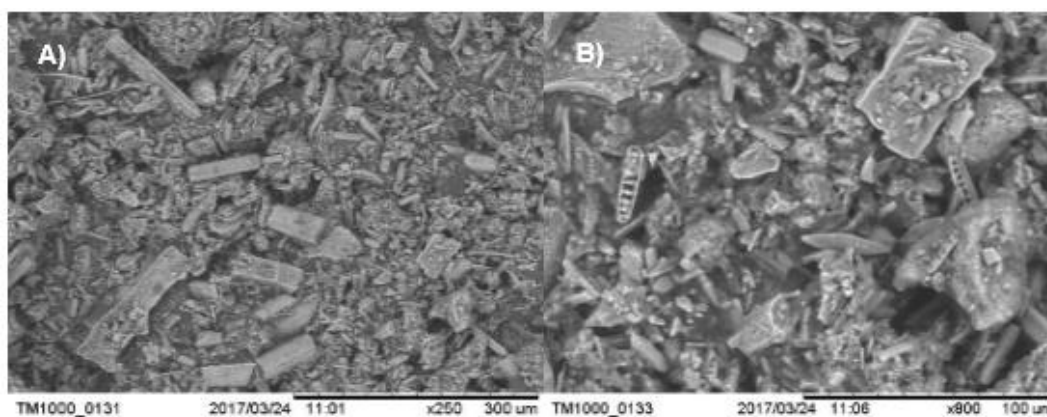


Figura 5:15 Muestra EQ11, San Agustín del Pulque, A) Organismos tabulares, posibles troncos o ramas y B) Presencia de diatomeas y algunos feldespatos alterados.

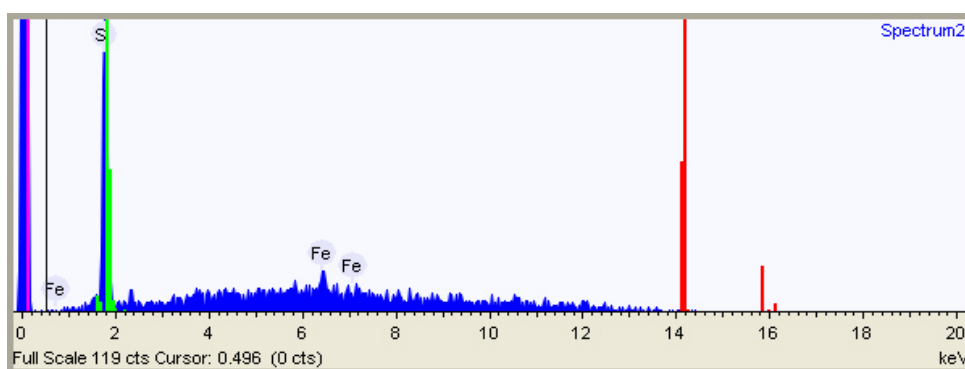


Figura 5:16 EDS de la muestra el Fe, probablemente Titanomagnetita en la muestra EQ11.

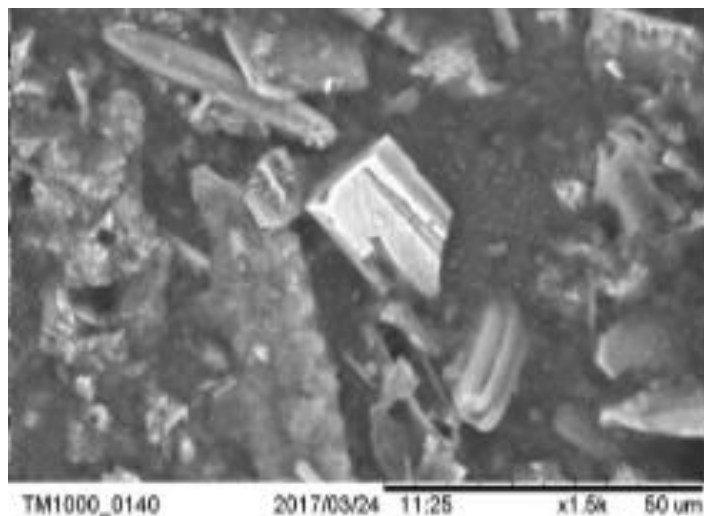


Figura 5:17 Fotografía de muestra EQ11 tomada en el SEM de muestra EQ11, Clasto brillante de Pirita heredado de la roca encajonante.

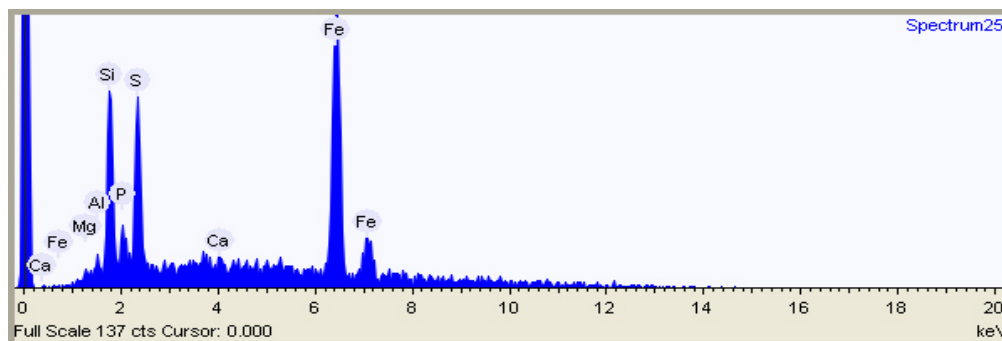


Figura 5:18 EDS de muestra EQ11 de las diatomeas, donde se aprecia la predominancia del sílice.

Algunas muestras de mano de San Agustín del Pulque de la parte norte de las Ciénegas, se les hizo análisis de SWIR. Los resultados obtenidos son para la muestra MLP-11 en los círculos blancos se obtuvo que predomina el espectro de la calcedonia y en la parte de color gris, que es la matriz, se obtuvo que resulta ópalo, esto debido al sílice que presenta. (Figura 5.19) por otra parte en la muestra MPL-12, debido también a la presencia del sílice se obtuvo mediante este análisis que está en una fase de cuarzo (figura 5.20), en la cual hay una línea roja que indica el espectrograma del mineral y que se encuentra en la biblioteca. El programa hace una comparación de los picos principales con la muestra para identificar el mineral

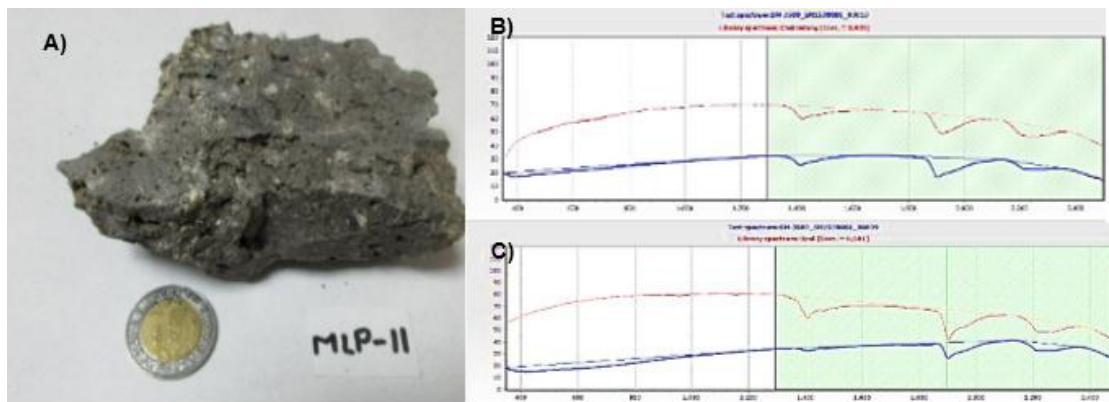


Figura 5:19 A) Muestra de mano MLP-11, B) Análisis de SWIR, donde se aprecia la línea roja que arroja el dato de calcedonia, C) Análisis de SWIR, donde se aprecia el espectro del ópalo el cual es la línea roja.

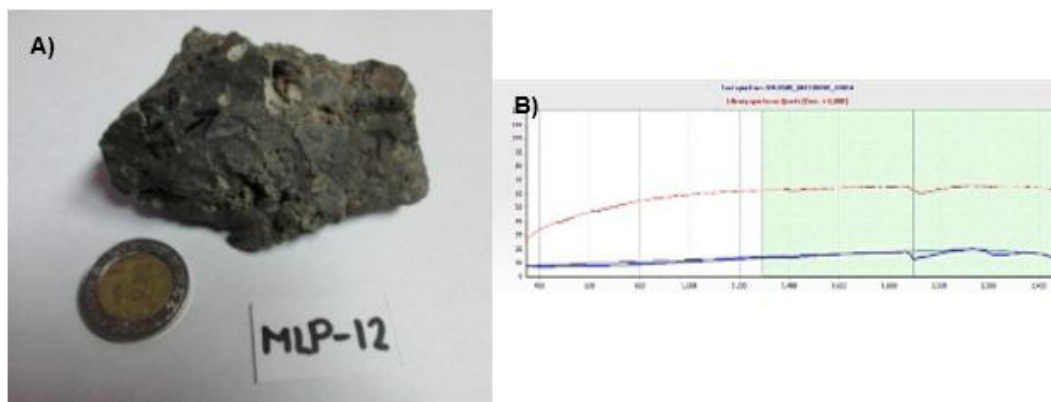


Figura 5:20 A) Muestra de mano MLP-12, B) Análisis del SWIR, donde la línea roja muestra el espectro arrojado de cuarzo.

5.2 ALTERACIONES HIDROTERMALES

La alteración hidrotermal se manifiesta de manera discreta, restringida a los alrededores de los manantiales termales. Es posible distinguir esta alteración en las vacuolas y fracturas de andesitas asociadas al plano de la Falla Huingo en sus diversos afloramientos, así como en las zonas donde se tiene la descarga de aguas termales.

En la lámina MAR-11 que corresponde a una andesita lajeada recolectada sobre el escarpe de la Falla Huingo se determinó una alteración no pervasiva. Se observan minerales de sílice del tipo opalino en vetas y vacuolas, óxidos de hierro y ocasionales minerales de arcilla en vetillas reemplazando ligeramente a las plagioclasas (Figura 5.21).

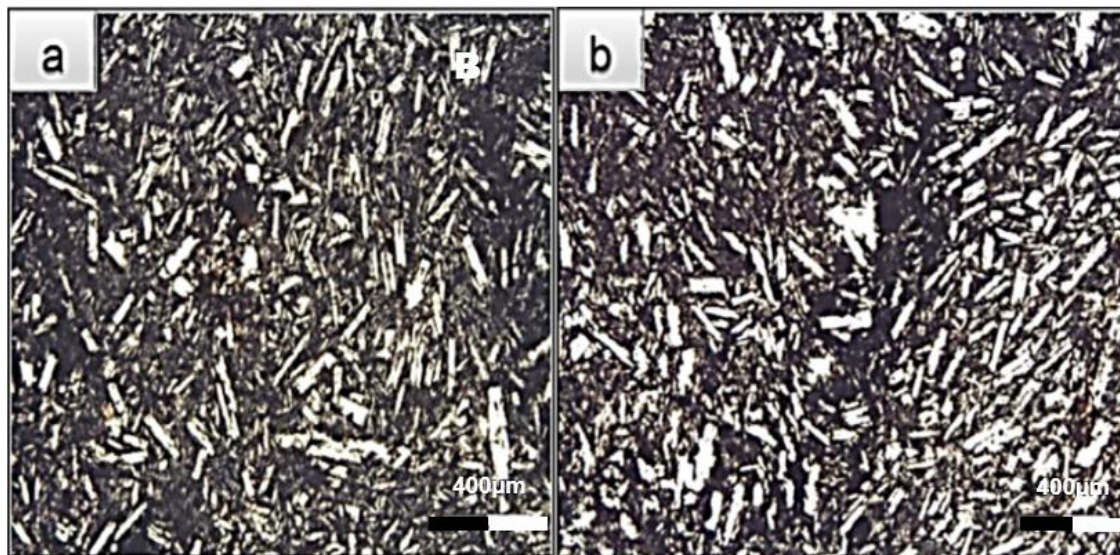


Figura 5:21 Muestra MAR-11. Alteración hidrotermal presente en rocas andesita-basalto asociadas a la Falla Huingo (a y b). Nótese la orientación preferencial de los cristales. 2.5X, NII.

La alteración se compone de una asociación mineral de ópalo, minerales de arcilla del tipo montmorillonita e illita, y zeolitas determinados mediante análisis de SWIR (Figura 5.22).

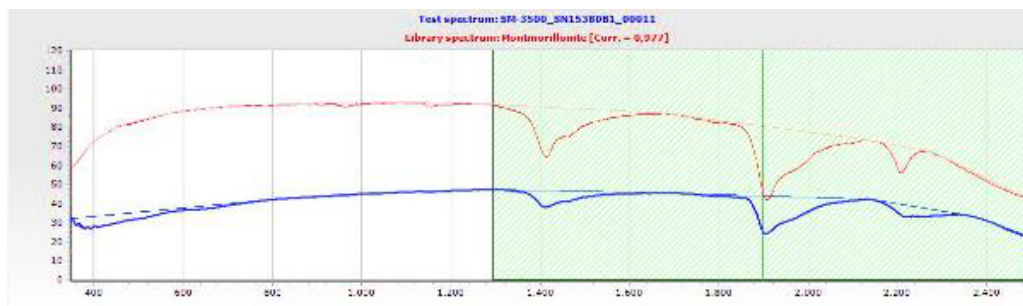


Figura 5:22 Muestra de mano mar-11, espectro de SWIR, donde se aprecia la línea roja que corresponde a montmorillonita.

La suite mineralógica descrita anteriormente incluye a las alteraciones de tipo argílica, silicificación y zeolitización; sin embargo, los rangos de temperatura de crecimiento mineral son el indicador principal para determinar el tipo de alteración (Cox & Browne, 1998).

ANÁLISIS QUÍMICOS DE LOS FLUIDOS TERMALES.

La geoquímica del fluido mediante los aniones, cationes e isótopos estables denota que el tipo de agua es sódico-clorurada, bicarbonatada.

De acuerdo con los resultados del pozo exploratorio Z-3, podría esperarse un yacimiento geotérmico entre 220 y 250°C a profundidades superiores a los 2000 m. Se trataría de un yacimiento de líquido dominante, con salinidad total del orden de 4000 ppm y descarga rápida con escasa pérdida de calor, que parece haber presentado varios episodios de auto-sellamiento (por el depósito de minerales hidrotermales) e hidro-fracturamiento naturales (Hiriart Le-Bert, 2011). De acuerdo a los resultados obtenidos de las diversas técnicas se puede afirmar con seguridad que la zona geotérmica de La Salud y Zimirao son aptas para realizar métodos de exploración más directos para el aprovechamiento de energía eléctrica.

En la Tabla 3, se muestran los parámetros fisicoquímicos de los manantiales de la zona de Araró.

Tabla 3 Parámetros fisicoquímicos

Parámetros fisicoquímicos			
	Temp. (°C)	pH	Conductividad (mS/cm)
EQ-01	67.8	7.41	2.49
EQ-02	78.0	7.38	2.54
BH-01	71.6	6.96	3.84
BH-02	90.0	8.12	4.02
MSZ	57.2	7.41	3.65
MSSH	47.8	7.72	1.343
			L.Q.

Puede decirse que manantiales geotérmicos evaluados son líquido dominante, en la que hay una contribución de fluido desde una fuente más caliente y más profunda con un líquido saturado.

Tabla 4 Estimación de la temperatura, de reservorio empelando geotermómetro, catiónicos y de sílice.

Sample Name	Amorphous Silica	Alpha Cristobalite	Beta Cristobalite	Chalcedony conductive	Quartz conductive	Quartz adiabatic	Na-K-Ca	Na-K-Ca Mg corr	Na/K Fournier 1979	Na/K Truesdell 1976	Na/K Giggenbach 1988	Na/K Tonani 1980	Na/K Nieva & Nieva 1987	Na/K Arnorsson 1983	K/Mg Giggenbach 1986	B.I
EQ-01	23	94	45	119	145	139	153	153	173	134	191	163	161	144	201	-2
BH-01	65	140	90	170	190	176	158	158	173	134	191	163	161	144	131	-82
BH-02	69	144	94	174	194	179	189	189	200	166	216	199	187	174	249	-8
MSZ	57	131	81	159	181	168	184	184	194	160	211	192	182	168	173	-15
MSSH	16	85	36	109	136	131	168	168	173	134	191	163	163	144	201	0.3

Concentraciones (mg/L) de iones mayores y menores

HCO₃⁻ 239 212 186 186 239 239 ND

Cl⁻ 173 180 667 791 651 201 0.04

SO₄²⁻ 401 435 23 186 227 51 0.06

Li⁺ 1.17 1.19 6.10 6.16 6.28 0.42 0.1

Na⁺ 367 378 367 703 640 367 0.03

K⁺ 21 21 21 57 49 21 0.04

Mg²⁺ <0.01 <0.01 0.4 <0.01 0.2 <0.01 0.01

Ca²⁺ 53 54 53 16 16 53 1.1

SiO₂ 114 ND 229 241 201 97 0.2

B.I. 6 5 -6 7 -6 27.8

Tabla 5 Isótopos estables y temperaturas de las muestras de campo

No.	Clave SACM	$\delta^2\text{H}_{\text{VSMOW}}$ (‰)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{VSMOW}}$ (‰)	δ - excess(‰)
37	EQ01	-69.0	-9.21	
38	EQ02	-63.3	-7.70	
39	BH01	-64.0	-7.90	
40	BH02	-59.8	-4.90	
41	MQP	-63.1	-5.71	
42	MSSH	-60.3	-4.72	
43	MSZ	-66.7	-9.30	
	Caleta	-71.5	-10.30	10.9
	La Mira	-54.6	-7.90	8.6
	Tlazazalza	-67.9	-9.30	6.5
	La Constitución	-61.4	-8.40	
	Quiroga	-64.4	-9.10	
		-85.0	-12	
		-45.0	-7.00	0.0
		-88.4	-12.00	0.0
		-48.9	-7.00	

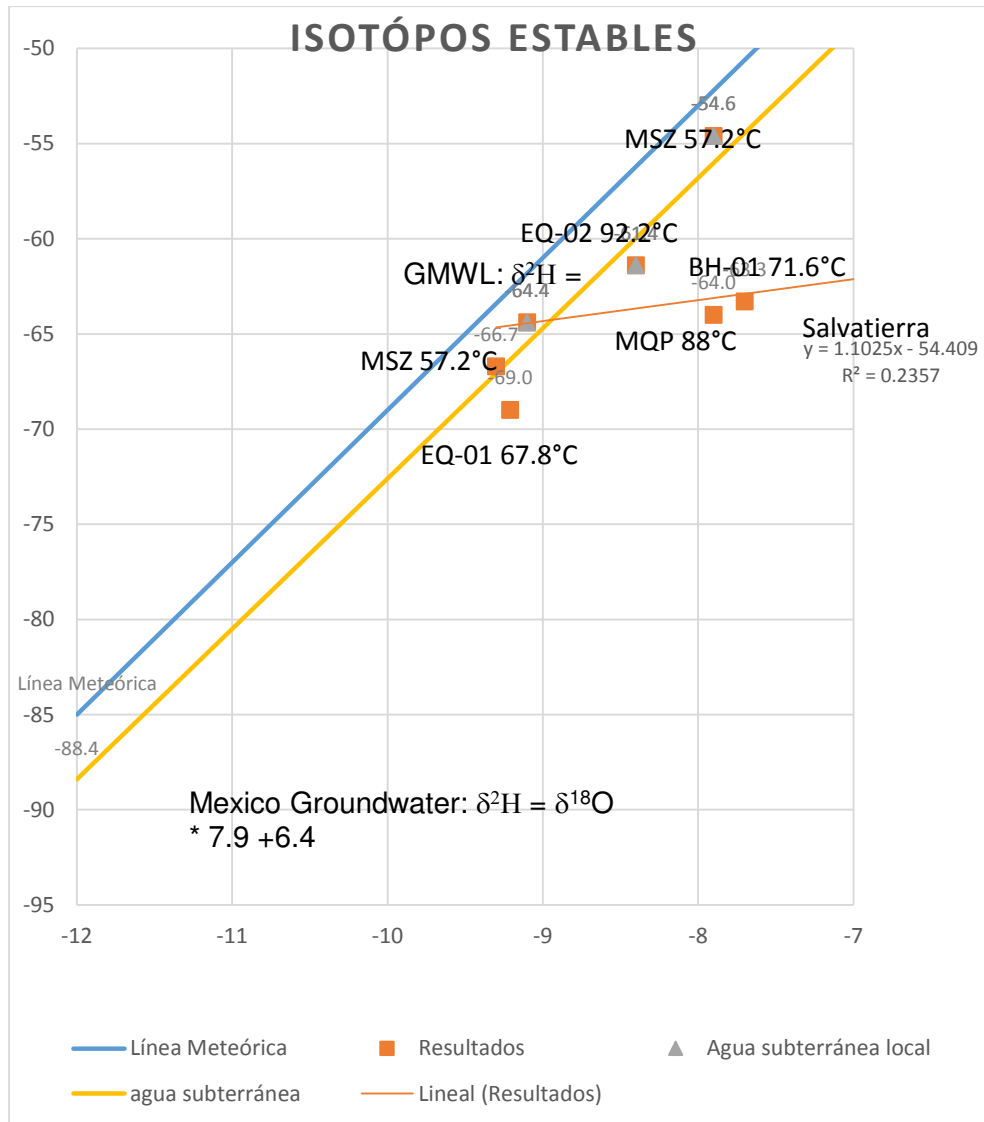


Figura 5:23 Grafico que muestra la distribución de las muestras con isótopos estables de D y 18°. Agua subterránea del estado de Michoacán reportada por Vasegnarr.

Tabla 6. Elementos traza

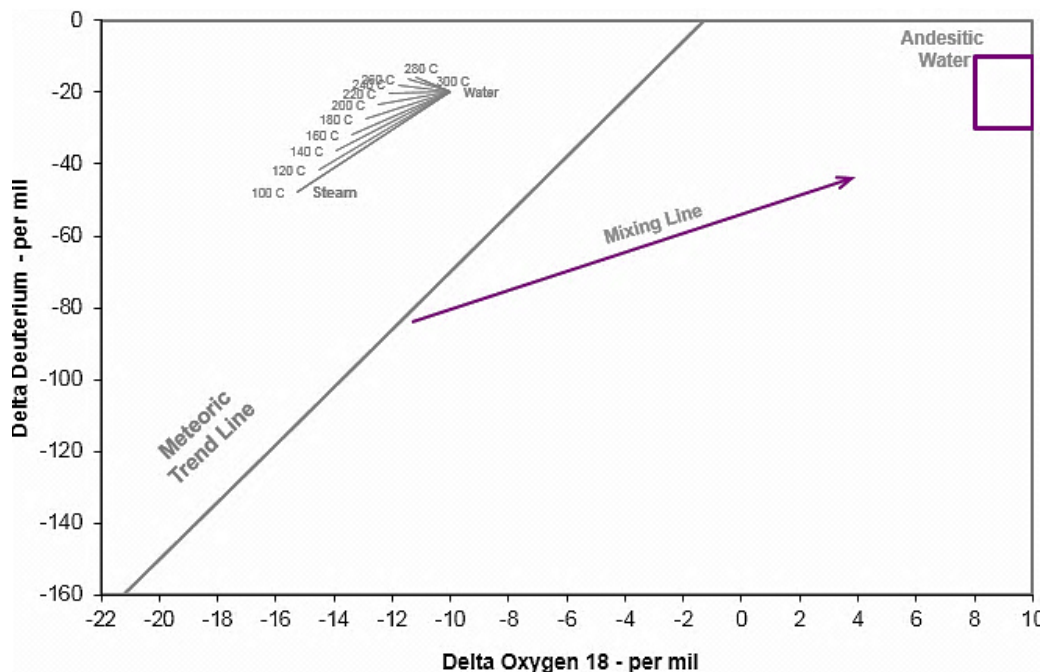


Figura 5:24 Relación de la línea de agua con la del agua meteórica.

Mssh el balance iónico está mal no sabes si es el análisis o el tipo de preservación de la muesyra.

Diagrama Cl-SO₄-HCO₃

Es una variación del diagrama de Piper, se utiliza un triángulo donde se grafican los iones Cl, HCO₃ y SO₄. Es menos preciso que el diagrama de Piper pero es más fácil de usar y la información proporcionada es muy buena, tiene la ventaja de no prejuzgar los constituyentes y las líneas de mezcla en el diagrama permanecen siempre como líneas rectas. La posición de los datos en el diagrama se obtiene sumando la concentración de los tres componentes involucrados (mg/kg) y posteriormente encontrando el % de cada uno de los componentes individuales.

$$S = Cl + HCO_3 + SO_4$$

A través de los resultados obtenidos en el diagrama de la figura 25 se observa que la distribución dentro del gráfico evidencia que los campos geotérmicos en estudio poseen aguas maduras en equilibrio total.

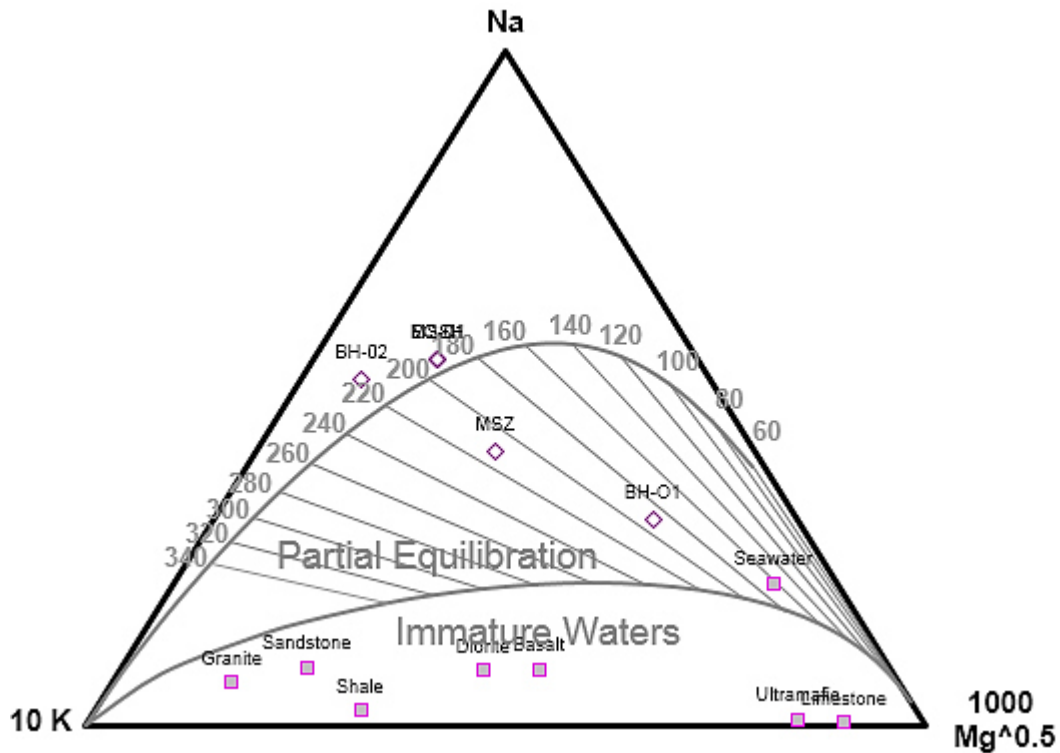


Figura 5:25 Diagrama de Na-K-Mg para los cinco campos geotérmicos en estudio. (Elaboración propia).

Diagrama Triangular Cl-SO4-HCO3

A través de los resultados obtenidos en el diagrama de la figura 26 se observa que la distribución en el diagrama triangular de la composición química e encuentra cerca del vértice de cloro indicando que las aguas son Silicas.

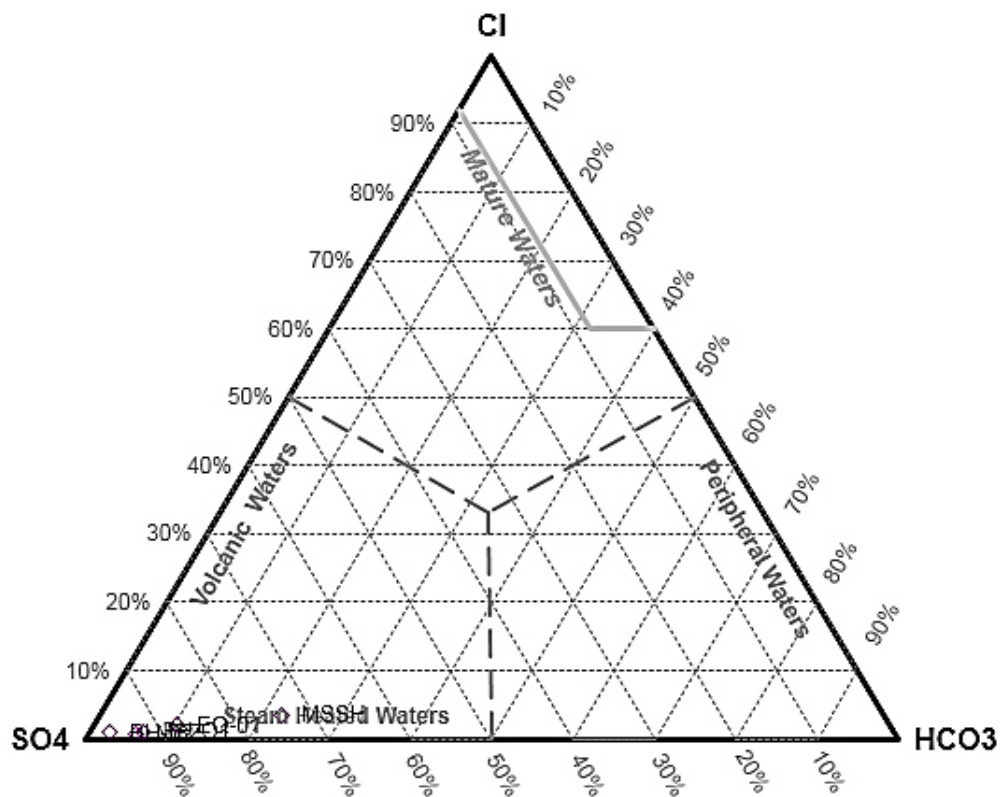


Figura 5:26 Diagrama de Giggenbach para Campos Geotérmicos en Estudio. (Elaboración propia).

Diagrama de Piper

Los resultados representados en la figura 27 demuestran que según el contenido catiónico de las aguas de los manantiales geotérmicos tiene características salinas típicas de los campos geotérmicos de manera análoga, el contenido aniónico muestra que los cloruros proporcionan indicios de salinidad en las aguas, de esta manera, se deduce que la composición de las aguas geotérmicas de los manantiales en estudio presentan altas concentraciones de sales evidenciado gráficamente en el campo romboidal del diagrama clasificándose las aguas como cloruro sódicas.

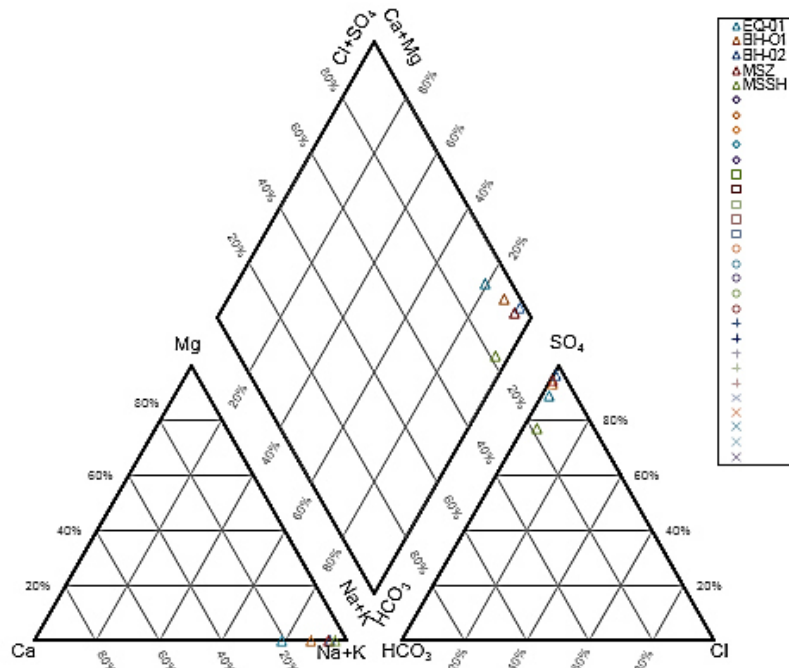


Figura 5:27 Diagrama de Piper-Hill-Langelier para los cinco campos geotérmicos en estudio. (Elaboración propia).

6. DISCUSIÓN

Las zonas con anomalías termales de Zimirao, La Salud, Los Hervideros, Huingo y San Agustín del Pulque se encuentran en el Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), formando parte de un contexto geológico extensivo, alrededor del Lago de Cuitzeo, dentro del graben de Cuitzeo-Maravatío, El graben se cree es una extensión del graben de Chapala por la continuación en la tendencia de sistemas de fallas con orientación E-W (Morán *et al.*, 1994). En particular en su sector occidental y centro-occidental del CVM se presenta un fenómeno de extensión intra-arco (Garduño-Monroy, 1987, Ferrari *et al.*, 2012). En este contexto se ubican campos geotérmicos en explotación (e.g. Los Azufres, Michoacán y Domo de San Pedro, Nayarit) y varios prospectos con potencial geotérmico (La Primavera, Jalisco, Hiriart Le-Bert, 2006, Volcán Ceboruco, Nayarit, Sieron & Siebe, 2008, San Bartolomé de los Baños y Rancho Nuevo, Guanajuato Villanueva-Estrada *et al.*, 2004). Los contextos extensivos y las estructuras de graben representan nichos para la presencia de sistemas geotérmicos (Lagant 2010, Cloetingh *et al.*, 2010), por la propia extensión que favorece a la porosidad y permeabilidad facilitando así que el sistema geotérmico sea propicio para explotar (Hiriart Le-Bert, 2009) y el gradiente geotérmico que se presenta en este tipo de estructuras extensivas es superior al promedio cortical, aproximadamente (Kusznir & Park, 1987, Blackwell *et al.*, 2000 & Prol-Ledesma, 2002), elementos indispensables para la formación de un sistema geotérmico.

6.1 ALTERACIONES HIDROTERMALES

En la zona se ha reportado la presencia de ignimbrita (Pmi), andesitas basálticas (Qpab) y depósitos piroclásticos con alteración hidrotermal en la región (Morán *et al.*, 1994). Se delimitaron mejor las unidades siendo la estratigrafía local compuesta por andesitas basálticas (Qpab) del Paleógeno, Ignimbrita (argilizada) del Paleógeno, suelo lacustre y aluvión del Cuaternario, más depósitos silíceos debido a la actividad termal (sinters).

De acuerdo con los resultados del pozo exploratorio Z-3, podría esperarse un yacimiento geotérmico entre 220 y 250°C a profundidades superiores a los 2000 m. Se trataría de un yacimiento de líquido dominante, con salinidad total del orden de 4000 ppm y descarga rápida con escasa pérdida de calor, que parece haber presentado varios episodios de

auto-sellamiento (por el depósito de minerales hidrotermales) e hidro-fracturamiento naturales (Hiriart Le-Bert, 2011). De acuerdo a los resultados obtenidos de las diversas técnicas se puede afirmar con seguridad que la zona geotérmica de La Salud y Zimirao son aptas para realizar métodos de exploración más directos para el aprovechamiento de energía eléctrica.

Se hacen presentes diferentes tipos de asociaciones minerales a partir de la actividad termal tales como ópalo A, ópalo CT, esmectita, esmectita/illita, cuarzo, yeso, laumontita, tridimita, ulexita, pirita, arsenopirita, cinabrio, estibinita, casiterita, ramsdellita, apatito y barita, estos están depositados en forma de sinters, costras, pátinas, alteraciones sobre la rocas y alteración sobre el suelo, alrededor de manifestaciones activas e inactivas.

Los minerales anteriormente descritos están en interacción con otros propios de la roca reemplazándolos parcialmente y en relleno de espacios abiertos, la fase que se encuentra en mayoría es el ópalo el cual está en relación con casi todas las fases minerales de esta zona (Tabla 4)

Tabla 4. Las fases minerales que se encuentran en la zona termal son:

UNIDAD	ASOCIACIÓN MINERAL
Basalto	Ópalo A, ulexita, pirita, apatito y esmectita
Ignimbrita	Ópalo y esmectita/illita
Sinter	Cinabrio, barita, cuarzo, ópalo, yeso, esmectita, casiterita, ulexita y plagioclasas, titanomagnetita heredados de la roca madre
Sedimento	Ópalo, esmectita, laumontita, cuarzo, yeso, tridimita, pirita, arsenopirita, estibinita, barita, ramsdellita y titanomagnetitas heredadas de la roca madre

En los análisis petrográficos y el SEM, se identifica la alteración en el suelo y en las rocas ignimbríticas como de tipo argílica. La asociación mineral de esta alteración identificada es: esmectita, esmectita/illita, cuarzo, al ser un proceso por hidrólisis Prol-Ledesma *et al.*, 2014, La hidrólisis indica un una reacción donde interviene el agua, lo que muestra que la alteración argílica evidencia fluidos de pH cercanos al neutro y con temperaturas inferiores a los 100 °C, estas condiciones del fluido son similares a lo observado en las descargas termales (<9 °C y pH alrededor de 6-8) la alteración argílica nos indica pH neutro entre rangos de cuatro y cinco del fluido hidrotermal, entre rangos de temperatura de 100°C no coincidentes con la temperatura de descarga de las manifestaciones actuales. La alteración de argílica observada es similar en otros campos como en), campo Geotérmico de Puchuldiza, Chile, (Montenegro *et al.*, 2009), flanco noroccidental del volcán de Nevado del

Ruiz (Forero., 2000), campo geotérmico de Berlin (xxx), concesión geotérmica Licancura en Chile. Este tipo de alteración y fluidos termales con <200 °C y pH alrededor del neutro son comunes en sistemas geotérmicos asociados a extensión (por ejemplo, Fiji, Indonesia, Nueva Zelanda, entre otros) (White *et al.*, 1995), siendo la distribución espacial de la alteración controlada por fallas en grabens. Las alteraciones hidrotermales de la zona de estudio (argílica y silicificación) se asemejan a otras reportadas en la literatura, las cuales ocurren generalmente en niveles subsuperficiales dentro de zonas permeables de sistemas geotérmicos; para el caso de Araró, posiblemente influenciadas por un lineamiento NW (Thompson & Thompson, 1996).

Los depósitos presentes son sinters silíceos de tipo multiepisódico con brechamiento hacia la base y depósito pos-brecha con laminaciones hacia la cima con precipitación de sulfuros en una matriz silícea con variedades texturales. Las texturas de los sinter son variadas con bandeamientos hasta textura masiva. El componente principal de los sinters es ópalo, seguido en cantidades accesorias de minerales de esmectita/illita, laumontita, cuarzo, yeso, tridimita, pirita, arsenopirita, estibinita, barita, ramsdellita y titanomagnetitas heredadas de las rocas adyacentes. La presencia de sulfuros y sulfatos en sinteres evidencia cambios en las condiciones redox durante la depositación, así mismo una elevada actividad de azufre en el sistema. La depositación de ópalo en descargas termales evidencia temperaturas de reservorio alrededor de los 200°C a profundidad (e.g. Prol-Ledesma *et al.*, 2014) y ello se debe a una sobresaturación de sílice por el enfriamiento del fluido hidrotermal (Canet *et al.*, 2005). La precipitación de sulfuros en superficie evidencia un proceso de mineralización continuo y prologado, tal como ocurre en los depósitos silícios del Plioceno del campo geotérmico de Puhupuhi al norte de Nueva Zelanda. La presencia de algunos sulfuros tales como cinabrio, estibinita y minerales de As pueden ser guía para la exploración geotérmica e incluso de yacimientos epitermales de metales preciosos (Weissberg, 1974; White & Hedenquist, 1995).

La silicificación, es la segunda alteración de mayor distribución, focalizada en las zonas de descarga, se denota por la inundación de sílice sobre la superficie por más de 1 km² de forma irregular formando estructuras en formas de vetillas, terrazas, lengüetas con laminaciones, y costras con laminaciones de espesores muy pequeños (mm) en donde las asociaciones minerales depositadas es de ópalo (en su mayoría), cuarzo, esmectita y

laumontita. , presente en rellenos de espacios abiertos y reemplazando la matriz de la roca. La silicificación se compone de la asociación de cuarzo y fases amorfas de sílice, del tipo ópalo. (b) Argilización, pobremente desarrollada y ubicada hacia planos de fractura alrededor de las descargas, representado principalmente por esmectita, illita-esmectita e illita y sílice. La alteración hidrotermal y el proceso de evaporación en las orillas del lago, generan costras o patinas y ocasionales rellenos en cavidades y fisuras de las andesitas con ulexita $\text{NaCaB}_5\text{O}_6(\text{OH})_6 \cdot 5(\text{H}_2\text{O})$. La presencia de este mineral se ha documentado en depósitos lacustres en cuencas tectónicas con alta tasa de evaporación, con presencia de manantiales termales en el oeste de Anatolia, Turquía (Helvacı & Ortiz, 1998).

De los análisis realizados con la sonda EDS y DRX se identificaron fases minerales dentro de las manifestaciones, minerales como cinabrio (HgS), pirita, estibinita, barita y minerales de As no identificados en una matriz de ópalo, denotando bajas temperaturas de formación (p.e. Fournier & Rowe, 1966), la barita es un indicador de la oxidación en el fluido termal y ópalo tipo A debido a la disminución de temperatura del fluido saturado de sílice.

Con la caracterización obtenida mediante los análisis de DRX Y SWIR realizados a las muestras de sinter se identificaron fases minerales como laumontita y esmectita/illita los cuales se utilizaron como estimaciones de temperatura superficial en las manifestaciones suponiendo valores menores a los 100°C, debido a su asociación con ópalo. Esta asociación mineral se ha observado en la zona geotérmica de Yellowstone National Park, Park Co., Wyoming, USA, Wairakei, Nueva Zelanda, y Onikobe, Japón con correlación de temperaturas alrededor de los 100°C (Browne, 1978).

La muestra MQP de la zona Querendaró, presenta una laminación preferencial en dirección E-W. Existe una capa de sedimentos lacustres bajo la zona hidrotermal de Zimirao extendiéndose en su región oeste. El manantial de la Salud es una filtración del suelo con emanaciones de fluido y gas concentrándose en una región que abastece de fluido termal al balneario del mismo nombre. La descarga termal es a través de un suelo volcánico donde de manera adyacente hay depósitos silíceos. Localmente la ubicación de La Salud coincide con una alineación con otras manifestaciones más al norte de la zona de estudio (p.e Huingo). Este lineamiento tiene una orientación de NW 30°. La temperatura de descarga y las mediciones de pH en las manifestaciones termales (dos manantiales líquido-gas y pozas de

lodo) las cuales van de ligeramente alcalino al neutro, son comparables con datos reportados previamente en la literatura (p.e. 6.8 en Balneario Huingo y 8.23 para Araró-Los Hervideros; Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín, 2005).

La muestra MPL (de la zona San Agustín de Pulque) no muestra laminación. Esta muestra se ubica en la localidad de San Agustín del Pulque, es una zona de Ciénegas al oeste del lago de Cuitzeo, en donde la mayoría de las muestras en base a los análisis petrográficos denotan la presencia de diatomeas y sílice, en los análisis de SEM, se identifica la alteración de suelo de tipo argílica, La asociación mineral de esta alteración identificada es: esmectita, esmectita/illita, cuarzo.

Las asociaciones minerales presentes (illita, esmectita, ópalo, barita y piritita) y la alteración argílica, es congruente con las condiciones de fluido de descarga (temperatura menor a 100 °C y pH alrededor del neutro), tal como ocurre en otros campos geotérmicos, por ejemplo: Ohaki, Nueva Zelanda (Browne & Ellis, 1970; Thompson & Thompson, 1996); Te Mihi, Nueva Zelanda (Yang et al., 2000). La predominancia de ópalo como fase de sílice amorfa en los depósitos de sínter respecto a otras fases cristalinas de sílice (p.e. cristobalita y/o tridimita) y pH alrededor del neutro; manifiesta la existencia de un reservorio geotérmico con temperaturas superiores a los 150°C (Fournier & Rowe, 1966; White, 1995; Nicholson, 1993) e incluso considerando cercano a los 200 °C (Prol-Ledezma *et al.*, 2004).

6.2 ESTRUCTURAS RELACIONADAS AL SISTEMA GEOTÉRMICO

Las estructuras de manantiales fósiles registradas en el área de alteración muestran una orientación preferencial de 22° NE-SW; dirección contraria en la que se desarrollan los manantiales termales activos. Estos contrastes en la dirección de desarrollo de los manantiales tanto fósiles como activos, ya que la ocurrencia de los estos es coincidente, dentro de las familias de fallas en la zonas las manifestaciones estas relacionadas al sistema NE-SW, lo que nos dice que el evento distensivo genero las condiciones para su ocurrencia y que el control de descarga obedece a los patrones preexistentes para la descarga podrían estar asociados a los dos períodos de deformación principal que tuvieron lugar el sector central del CVM; el más antiguo que originó los lineamientos NE-SW, y los lineamientos E-W que responden a la etapa de deformación más reciente.

Araró presenta un desarrollo de alteración restringido de forma alargada, esta distribución alude a un lineamiento NW-SE que favorece la descarga y mineralización. Los manantiales de Huingo, Los Hervideros y La Salud, al sur del área del estudio, presentan una alineación de NW 30°, presumiendo la presencia de una falla que favorece la circulación de fluidos termales a la superficie. Este lineamiento se intersecta con la Falla Huingo, constituyendo un posible conducto termal desde el reservorio.

Una fuente termal posible es debida al proceso de adelgazamiento cortical debida a la extensión en el CVM, específicamente en su sector oeste y centro, se ha observado que estructuras distensivas pueden inducir a gradientes geotérmicos anómalos (e.g. y poner un valor CITA) e incluso el desarrollo de intrusivos.

En general, las fallas segmentadas son más favorables para los sistemas geotérmicos que las grandes fallas con grandes desplazamientos. El régimen de estiramiento local y su orientación es relativo a la geometría de la falla tiene un impacto en el control de los conductos permeables, con fallas orientadas perpendicularmente a la dirección el esfuerzo de compresión es mínimo y ahí más probabilidades de ser permeables. Las fallas que se presentan son normales con dirección N-S, mientras que la configuración del graben de Cuitzeo corresponde a una orientación E-W, presumiblemente puede ser que la región de Huingo sea una zona de relevo o zona de transferencia, que favorece la porosidad y permeabilidad. La región comprende un Play de tipo convectivo de dominio extensional el cual se debe al fallamiento de la zona, el cual corresponde a un sistema con orientación E-W como las dos grandes fallas que se presentan, falla Araró-Zimirao y falla Huingo.

6.3 RESULTADOS DE LA GEOQUÍMICA

A través de los resultados obtenidos en el diagrama de la figura 25 se observa que la distribución dentro del gráfico evidencia que las manifestaciones termales en estudio poseen aguas maduras totalmente equilibradas.

Los resultados obtenidos en el diagrama de Piper muestran que las aguas tienen características de ser salinas pudiéndose clasificar como cloruro sódicas.

A través de los resultados obtenidos en el diagrama de la figura 26 se observa que la distribución en el diagrama triangular de la composición química de la mayoría de los

manantiales termales en estudio se encuentra cerca del vértice de Silice indicando que las aguas son silicicas.

6.4 PLAY GEOTERMICO

Los altos gradientes que se presentan facilitan el calentamiento del agua meteórica que circula por fallas profundas o formaciones permeables (Figura 2.11). Los ejemplos de regiones que alberga geotermia de tipo extensional incluyen la gran cuenca *pull-apart* de Turquía Occidental. La distribución de calor en un sistema geotérmico se controla por la circulación de fluidos a lo largo de fallas y capas sedimentarias inclinadas, lo que se le conoce como el alto de un graben. Este tipo de Play no magmático está controlado por zonas de fallas. El control hidrológico de los sistemas se debe al flujo de las aguas subterráneas regional (e.j. Tóth, 1999). Es exclusivo de este tipo de Plays con dominio extensional, donde el agua meteórica se infiltra por fallas superficiales, circula a través de ellas hasta fallas profundas donde se calienta y sucesivamente eleva su temperatura a través de otros sistemas de fallas. El escape en las fallas controla este tipo de Plays, circula el agua a través de combinación de formaciones permeables, por lo general la recarga y descarga es por medio de zonas de falla.

El tipo de Play sugerido para la zona geotérmica de Araró es de convectivo con dominio extensional, se relaciona con la actividad en el cual, el calor asciende a la superficie por un proceso de extensión y adelgazamiento de la corteza, debido a fallas regionales y profundas por las cual el fluido asciende a la superficie.

7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES

En la zona de Araró existen manifestaciones termales de tipo manantial con emanaciones difusas de gas y fluido con una temperatura de descarga de 70-92 °C y una descarga con actividad ocasional en la Salud, Zimirao, Los Hervideros, Huingo y San Agustín del Pulque. En Zimirao existen manifestación de tipo gas-hidrotermal y fumarolas con temperaturas de descarga de 73-92°C.

Las temperaturas más altas de descarga son de 92 °C en lo zona geotérmica de La Salud y Zimirao y están delimitadas por fallas E-W, con anomalías termales en suelo que se extienden en un radio de 70 metros a partir de cada manifestación.

En la zona geotérmica de La Salud y Zimirao las alteraciones hidrotermales se presentan en un radio aproximado de 400 m a partir de las principales manifestaciones activas. La Zona de San Agustín al menos decir que la alteración se restringe a las pozas sin desarrollo lateral evidente en superficie.

Los tipos de alteraciones presentes en el sistema son 2 de tipo silicificación y argílica con asociaciones minerales como ópalo A y CT, cuarzo, tridimita, esmectita, laumontita, yeso, ulexita, illita, piritita, arsenopiritita, estibinita, barita y ramsdellita.

Las manifestaciones estudiadas en el presente proyecto se encuentran en 2 grupos principales de eventos de deformación: NW-SE (antiguo) y E-W (más joven), con valores de temperatura entre 60-90° C y pH cercano al neutro (7.38 y 8.12) en los manantiales termales de la zona de Araró.

Los depósitos hidrotermales superficiales en la zona de estudio están representados por sinter silíceos, distribuidos en la región de Zimirao y en La Salud, compuestos de sílice de tipo opalino con bandas coloformes, con restos de plantas y diatomeas. Estos depósitos sugieren temperaturas de reservorio geotérmico alrededor de los 200 °C.

De acuerdo a los resultados obtenidos de las diversas técnicas geológicas mineralógicas y geoquímicas, se puede afirmar con seguridad que la zona geotérmica de La Salud y Zimirao son aptas para realizar métodos de exploración más directos para el aprovechamiento de energía eléctrica.

Los depósitos con alto contenido de diatomeas silicificadas en la zona de geotérmica de La Salud y Zimirao confirman que en tiempo pasado el yacimiento estuvo cubierto por una extensión de agua proveniente del Lago de Cuitzeo el principal factor para la generación de los sinters y alteraciones.

En un etapa de exploración inicial-intermedia, se ha comprobado que el empleo de análisis de depósitos y alteraciones en una región con evidencias de actividad geotérmica sirve como método inicial de exploración, así mismo, las predicciones realizadas mediante esta metodología coinciden con lo que se ha obtenido mediante la perforación del pozo exploratorio Z-3.

El tipo de Play geotérmico en la región de Araró es convectivo con dominio extensional, el calor asciende a la superficie por el proceso de extensión y adelgazamiento de la corteza.

Se identificaron 5 unidades litológicas adyacentes a las manifestaciones termales: andesitas basálticas (Paleógeno), Ignimbrita (Paleógeno), depósitos lacustres y aluvión-sinter (Cuaternario). Las Alteraciones dominantes: argílica intermedia, avanzada y silicificación.

La geoquímica del fluido mediante los aniones, cationes e isótopos estables denota que el tipo de agua es sódico-clorurada, bicarbonatada.

7.2 RECOMENDACIONES

- Realizar una campaña de campo más exhaustiva con el fin de obtener más y mejores datos estructurales para poder realizar un modelo del sistema geotérmico de la zona con el fin disminuir los riesgos en la exploración geotérmica y realizar estratégicamente los pozos exploratorios con menor incertidumbre de error.
- Realizar un estudio geoquímico en las aguas de los manantiales, emisiones de fumarolas, descargas de gases y aguas frías superficiales (ríos, lagos, pozos, etc) para un tener mayor conocimiento de las condiciones del sistema hidrotermal.
- Realizar estudios con técnicas geofísicas para poder definir las dimensiones y la estructura del yacimiento como la profundidad a la que se encuentra, área que ocupa y principales estructuras que estén relacionadas con la permeabilidad y zonas de alto flujo.
- Realizar un pozo exploratorio o adquirir datos de gradiente en el pozo ya existente.

- Realizar una campaña informativa sobre el aprovechamiento de la geotermia no solo como fuente de energía eléctrica o fines recreativos en los habitantes de Zimirao y Araró con el fin de hacer conciencia y buen aprovechamiento de este recurso natural.
- A pesar de las investigaciones llevadas a cabo en la zona, aún no se ha determinado con exactitud la fuente termal del sistema geotérmico de Araró. Todavía quedan algunas interrogantes sobre la actividad termal en la zona de estudio. Se han identificado domos de escoria de edad muy reciente en la región adyacente de Zinapécuaro, al sur de Araró. ¿Podría ser una cámara magmática la fuente tanto de los domos como del sistema geotermal de Araró? ¿El sistema de Araró responde a la tectónica extensional del Graben de Cuitzeo y la fuente es el calor que asciende por las Fallas Huingo-Zimirao como resultado de adelgazamiento cortical? La aplicación de técnicas geoquímicas como isotopía, geotermometría y análisis de gases permitiría dilucidar el origen de la fuente termal.
- El sector ubicado en dirección S-SE de los Balnearios de Huingo y Los Hervideros, se propone como zona de interés para continuar con la exploración. No se puede establecer con precisión el área para realizar pozos exploratorios ya que es necesario aplicar más metodologías de exploración como lo serían los métodos geofísicos de sísmica, magnetometría y/o resistividad eléctrica; sin embargo, con el consecuente análisis en un futuro se podrá determinar.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSO, P., PROL-LEDESMA, R., CANET, C., MELGAREJO, J., & FALLICK, A., 2005, Isotopic evidence for biogenic precipitation as a principal mineralization process in coastal gashydrothermal vents, Punta Mita, México. *Chemical geology*, 224, 113-121.
- ARNÓRSSON, S., BJARNASON, J.Ö., GIROUD, N., GUNARSSON, I., STEFÁNSSON A., 2006, Sampling and analysis of geothermal fluids. *Geofluids* 6; pp. 203-216.
- AVALOS, T. D., 2016, Reconocimiento de las asociaciones minerales de alteración y depósitos hidrotermales relacionados con la actividad de los manantiales termales Araró, Michoacán. Tesis Licenciatura, Facultad de Ciencias de la tierra, UANL. México, D.F, México: UNAM.
- AXELSSON, G. & GUNNLAUGSSON, E., 2000, Background: Geothermal utilization, management and monitoring, En: Long term monitoring of high and low enthalpy fields under exploitation, WGC 2000 short courses, Japan, 3-10.
- BLACKWELL, D. D., GOLAN, B., & BENOIT, D., 2000. Thermal regime in the Dixie Valley geothermal system. *Geothermal Resources Council Transactions*, 24, 223-228.
- BAN, T. H. M., & GRANADOS, H. D., 1994, Contrasting volcanism in the Michoacán-Guanajuato Volcanic field, Central Mexico: Shield volcanoes vs. cinder cones. 33, 1, 125-138. *Geophysical International*.
- BROWNE, P., 1977, Hydrothermal alteration in active geothermal fields. Nueva Zelanda: N.Z. Geol. Surv., reporte inédito M58. Browne, P. R., & Ellis, A. J. (1970). The Ohaki-Broadlands hydrothermal area, New Zeland; mineralogy and related geochemistry. *American Journal of Science* 269 (2), 97-131 p.
- BROWNE, P. R., & ELLIS, A. J., 1970, The Ohaki-Broadlands hydrothermal area, New Zeland; mineralogy and related geochemistry. *American Journal of Science* 269 (2), 97-131.
- BUFFON, G.L., 1778, *Historia natural*. París, Imprimerie Royale, 651 p.
- BULLARD, E. C., 1965, Historical Introduction to terrestrial heat low, En: LEE, W.H.K., ed., *Terrestrial Heat Flow*, Amer Geophys Un., Geophys. Mon. Ser., 8, 1-6.
- CLARK, R. L., SWAYZE, G. A., WISE, R., LIVO, K. E., HOEFEN, T., & KOKALY, R. F., 2007, USGS Digital Spectral Library splib06a. U.S. Geological Survey.
- CLOETINGH, S. A. P. L., VAN WEES, J. D., ZIEGLER, P. A., LENKEY, L., BEEKMAN, F., TESAURO, M., ... & BONTÉ, D., 2010. Lithosphere tectonics and thermo-mechanical properties: an integrated modelling approach for Enhanced Geothermal Systems exploration in Europe. *Earth-Science Reviews*, 102(3), 159-206.
- CANET, C., ARANA, L., GONZÁLEZ-PARTIDA, E., PI, T., PROL-LEDESMA, R. M., FRANCO, S. I., & LÓPEZ-HERNÁNDEZ, A., 2010, A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Acoculco Caldera, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geochemical Exploration*, 1-10.
- CANET, C., HERNÁNDEZ-CRUZ, B., JIMÉNEZ-FRANCO, A., PI, T., PELÁEZ, B., VILLANUEVA-ESTRADA, R. E., & SALINAS, S., 2015, Combinig ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of

- hydrothermal alteration for the Acoculco geothermal zone, Eastern Mexico. *Geothermics*, 53, 154-165.
- CANET, C., PROL-LEDESMA, R., TORRES-ALVARADO, I., GILG, H., VILLANUEVA-ESTRADA, R., & LOZANO-SANTA CRUZ, R., 2005**, Silica carbonate stromatolites related to coastal hydrothermal venting in Bahía Concepción, Baja California Sur, México. *Sedimentary Geology*, 174, 97-113.
- CANUL, D., & ROCHA, L., 1983**, Estudio geológico con fines geotérmicos en la región norte del Estado de Michoacán: Reporte 7/83. Morelia: Departamento de Exploración, Comisión Federal de Electricidad.
- CASARRUBIAS, U., IZUNZA, G., & CONTRERAS, V., 1990**, Estudio geológico de detalle en la zona geotérmica de Araró-Zimirao, Michoacán. CFE Internal Report No 01-90. Unpublished.
- Campos-Enriquez, J. &.-F. (1992). Gravity study of Los Humeros caldera complex, Mexico and associated geothermal system. 1(49), 69-60. *Journal of volcanology and geothermal research*.
- CASTILLO, D., & DE LA CRUZ, V., 1992**, Reconocimiento estructural y volcanológico en la zona termal del Domo San Pedro Lagunillas, Nayarit, México. *Geofísica Internacional*. 31(4).
- CHEILLETZ, A., LEVRESSE, G., GASQUET, D., AZIZI SAMIR, M., ZYADI, R., & ARCHIBALD, D., 2002**, The giant silver Imiter deposit: Neoproterozoic epithermal mineralisation in the Anti-Atlas, Morocco. *Mineralium Deposita*, 37, 772-781.
- COMBS, J. & MUFFLER, L.P.J., 1973**, Exploration for geothermal resources. In: Kruger, P. and Otte, C., eds., *Geothermal Energy*, Stanford University Press, Stanford, pp.95—128.
- COX, M. E., & BROWNE, P., 1998**, Hydrothermal alteration mineralogy as an indicator of hydrology at the Ngawha geothermal field, New Zealand. *Geothermics*, 27 (3), 259-270.
- DEMANT, A., 1978**, Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 2(2),172-187.
- DEPARTAMENTO DE EXPLORACIÓN., 1989**, Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica de Araró, Mich. Morelia: CFE Reporte Interno No. 10-89.
- DICKINSON, M. H., & FANELLI, M., 2003**, *Geothermal Energy*. Pisa: Jhon Wiley & Sons.
- DONG, G., & ZHOU, T., 1996**, Zoning in the Carboniferous-lower Permian Cracow epithermal vein system, central Queensland, Australia. *Mineralium Deposita*, 31, 210-224.
- ELLIS, A., & MAHON, W., 1977**, *Chemistry and Geothermal Systems*. Academic Press.
- FERRARI, L., 2000**, Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Trans-mexicana durante la última década. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, LIII, 84-92.
- FERRARI, L., 2004**, Slab detachment control on mafic volcanic pulse and mantle heterogeneity in central Mexico. *Geology*, 32, 77-80.
- FOURNIER, R., & ROWE, J., 1966**, Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet steam wells. *American Journal of Science*, 264 (9), 685-697.
- GARDUÑO-MONROY, V., 1987**, Estudio geológico regional para conocer las características de las rocas del basamento relativo del campo geotérmico de Los Azufres. Morelia: CFE Reporte interno No. 19/85.
- GIGGENBACH, W., 1988**, Geothermal solute equilibria. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 52, 2749-2765.

- GIGGENBACH, W., 1992, Isotopic shifts in waters from geothermal and volcanic systems along convergent plate boundaries and their origin. *Earth and Planetary Science Letters*, 495-510.
- GÓMEZ-TUENA, A., OROZCO-ESQUIVEL, M., & FERRARI, L., 2005, Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Trans-Mexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen Conmemorativo del Centenario, LVII (3), 227-283.
- GUDMUNDSSON, J.S., 1988, The elements of direct uses, *Geothermics*, 17, 119-136.
- GUPTA, H., & ROY, S., 2007, *Geothermal Energy: An Alternative Resource for the 21st Century*. Amsterdam: Elsevier.
- GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L., MAYA-GONZÁLEZ, R., & QUIJANO-LEÓN, J., 2010, Current status of Geothermics in Mexico. *World Geothermal Congress* (págs. 25-29). Bali, Indonesia: WGC.
- GUTIERREZ-NEGRÍN, L., MAYA-GONZÁLEZ, R., & QUIJANO-LEÓN, J., 2015, Present Situation and Perspectives in Geothermal in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress* (págs. 19-25). Melbourne: WGC.
- HIRIART-LE BERT, G., 2011, Evaluación de la Energía Geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, 167.
- HIRIART LE BERT, G., 2016, Evaluación de la Energía Geotérmica en México
- HOCHSTEIN, M. P., 1990, Classification and assesment in geothermal resources. (M. Dickinson, & M. Fanelli, Edits.) *Small Geothermal Resources: a Guide to Development and Utilization*, 31-57.
- INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION, 2001, Report of the IGA, to the UN
- INTERNATIONAL GEOTHERMAL ASSOCIATION, 2014, Best Practices guide for geothermal exploration. IGA & IFC, 196 p. Commission, on Sustainable Development, Session 9 (CDS-9), New York, April.
- KUSZNIR, N. J., & PARK, R. G., 1987, The extensional strength of the continental lithosphere: its dependence on geothermal gradient, and crustal composition and thickness. *Geological Society, London, Special Publications*, 28(1), 35-52.
- LEGORRETA, O. Q., 2002, Análisis estructural de fallas potencialmente activas. *Boletín de la sociedad Geológica Mexicana*, 55(1), 1-11.
- LINDAL, B., 1973, Industrial and other applications of geothermal energy. In: Armstead, H.C.H., ed., *Geothermal Energy*, UNESCO, Paris, 135—148.
- LUBIMOVA, E.A., 1968, Thermal, history of the Earth's Crust and Upper Mantle, *Amer. Geophys. Un., Geophys. Mon. Ser.*, 13:63-77.
- LUMB, J. T., 1981, Prospecting for geothermal resources, pp. 77—108.
- LYNNE, B., CAMPBELL, K., & BROWNE, P., 2005, Diagenesis of 1900-year-old siliceous sinter (opal-A to quartz) at Opal Mound, Roosevelt Hot Springs, Utah, USA. *Sedimentary Geology*, 179 (3), 249-278.
- MANGO, H., ZANTOP, H., & ORESKES, N., 1991, A fluid inclusion and isotope study of the Rayas Ag-Au-Pb-Cu-Zn mine, Guanajuato, Mexico. *Economic Geology*, 86, 1554-1561.
- MELGAREJO, J. C., PROENZA, J. A., GALÍ, S., & LLOVET, X., 2010, Técnicas de caracterización mineral y su aplicación en exploración y explotación minera. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62 (1), 1-23.
- MARINI L. AND CHIODINI G., 1994, The role of carbon dioxide in the carbonate-evaporite geothermal systems of Tuscany and Latium (Italy). *Acta Vulcanologica* 5, 95-104.

- MERCADO, D., NIEVA, R.M., BARRAGÁN, R., YHIP, 1982, Interpretación Geoquímica Preliminar de Zonas de Alteración Hidrotermal de la República de Nicaragua, Informe para OLADE IIE/3662/ FE-G25/C, 250 pp,
- MUFFLER, P. & CATALDI, R., 1978, Methods for regional assessment of geothermal resources, *Geothermics*, 7:53-89.
- MORÁN ZENTENO, D. J., 1984, Geología de la República Mexicana: México, 1984. Instituto Nacional de Estadística Geografía E Informática.
- NICHOLSON, K., 1993, *Geothermal Fluids*, Springer Verlag, Berlin, XVIII, 264 pp.
- OSTROUMOV, M., 2009, Mineralogía analítica avanzada Universidad Michoacana de la Universidad de Hidalgo, 109-160.
- PALACIOS, C., LAHSEN, A., & SYLVESTER, H., 1992, Low sulphur epithermal gold mineralization at Inca de Oro, northern Chile: mineralogy and fluid inclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 6, 183-189.
- PÉREZ ESQUIVIAS, H., MACÍAS VÁZQUEZ, J. L., GARDUÑO MONROY, V. H., ARCE SALDAÑA, J. L., GARCÍA TENORIO, F., CASTRO GOVEA, R., & VALDÉS, G., 2010, Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres. Michoacán. *Geotermia*. 23, 51-63.
- PROL-LEDESMA, R., CANET, C., ARMIENTA, M., & SOLÍS, G., 2002, Vent fluid origin in the Punta Mita coastal submarine hydrothermal system, Mexico. GSA Annual Meeting, (págs. 27-30). Denver.
- PROL-LEDESMA, R., CANET, C., MELGAREJO, J. T., RUBIO-RAMOS, M., CRUZ-OCAMPO, J., ORTEGA-OSORIO, A. & REYES, A., 2002B, Cinnabar deposition in submarine coastal hydrothermal vents, Pacific margin of central Mexico. *Economic Geology*, 97, 1331-1340.
- PROL-LEDESMA, R. M., & JUAREZ, M., 1986, Geothermal Map of Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 28, (3), 351-362.
- RODRÍGUEZ-DÍAZ, 2009, "Metalogenia del Área Mineralizada en Manganeso de Bahía Concepción, Baja California Sur". D.F, México, México.
- RODRÍGUEZ-DÍAZ, 2015, Seminario Alteraciones Hidrotermales en Sistemas Geotérmicos. D.F, México, México.
- SENER. 22 de julio de 2015, Secretaria de energía, Recuperado el 17 de noviembre de 2015, de http://sener.gob.mx/portal/default_intermedia.aspx?id=3252.
- SENER, 3 de junio de 2016, México y Unión Europea lanzan el primer proyecto de investigación conjunta en el área de Geotermia, Obtenido de <https://www.gob.mx/sener/prensa/mexico-y-la-union-europea-lanzan-el-primer-proyecto-de-investigacion-conjunta-en-el-area-de-geotermia?idiom=es>.
- STACY, F.D. & LOPER, D.E., 1988, Thermal history of the Earth: a corollary concerning non-linear mantle rheology, *Phys Earth Planet Inter*, 53:167-174.
- STEFANSSON, V., 2000, The renewability of geothermal energy. *Proc. World Geothermal Energy, Japan*.
- SUÁREZ, M. C., SAMANIEGO, F. & TELLO, M., 1997, An updated survey of Non-Condensable Gases Evolution at Los Azufres, Mexico, Geothermal Reservoir. *Proceedings, 22nd Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, pp. 5-9. Stanford University, California.

- SWAPNA, M., 2011, Applied Mineralogy, Applications in Industry and Enviroment. Nueva Delhi, India: Springer.
- THOMPSON, A. J., & THOMPSON, F. J., 1996, Atlas of Alteration: A Field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 120.
- THOMPSON, A., HAUFF, P., & ROBITAILLE, A., 1999, Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. Society of Economic Geologists Newsletter, 39, 16–27.
- TÓTH, J., 1999, Groundwater as a geologic agent: An overview of the causes. Processes and manifestations, Departament of the Earth and Atmospheric Sciences, University of Alberta, 7:1-14.
- TRUESDELL, A., 1991, Origins of acid fluids in geothermal reservoirs. Geothermal Research Council Transactions, 15, 289,296.
- VIGGIANO-GUERRA, J., & GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L., 2001, Characteristics of the Araró Mich., Mexico geothermal zone. Geothermal Resources Council Transactions, 369-373.
- VIGGIANO-GUERRA, J., & GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L., 2003, Régimen de flujo hidrotermal en la zona geotérmica de Araró, Michoacán. Ingeniería Hidráulica en México Vol. XVIII, No. 1, 39-53.
- VIGGIANO-GUERRA, J., & GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L., 2005, The Geothermal System of Araró, México, as an independent system of Los Azufres. Proceedings World Geothermal Congress (págs. 24-29). Antalya, Turkey: IGA.
- VILLANUEVA, R.E., 2007, Procesos geoquímicos en las manifestaciones hidrotermales ubicadas en zonas intermareales y submarinas de las costas de Bahía Concepción (Baja California Sur) y Punta Mita (Nayarit). Apéndice B, Métodos analíticos para la determinación de elementos químicos dsueltos, Tesis de maestría; pp. 88-101.
- VILLANUEVA-ESTRADA, R., PROL-LEDESMA, R., RODRÍGUEZ-DÍAZ, A., CANET, C., & TORRESALVARADO, I. G.-P., 2012, Geochemical processes in an active shallow submarine hydrothermal system, Bahía Concepción, México: mixing or boiling? International Geology Review, 54 (8), 907-919.
- WASSENAR, L.I., WILGENBURG VAN, S.L., LARSON, K. & HOBSON, K.A., 2009, A groundwater isoscape (δD , $\delta^{18}O$) for Mexico, Journal of Geochemical Exploration, 102, 123-136.
- WHITE, D., 1973, Thermal springs and epithermal ore deposits. En A. Bateman, Economic Geology 50th anniversary, 1905-19055 (pág. 9954). Urbana: The Economic Geology Publishing Company.
- WHITE, N. & HEDENQUIST., 1995, Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. Society of Economic Geologist Newsletter, 23, 9-13.
- WEISSBERG, B. G., 1974, Structural control of base metal mineralization at the Tui mine, Te Aroha, New Zeland. New Zealand Journal of geology and Geophysics, 13, (3), 610-630.
- YANG, K., HUNTINGTON, J., BROWNE, P., & MA, C., 2000, An infrared spectral reflectance sutdy of hydrothermal alteration minerals from the Te Mihi sector of the Wairakei geothermal system, New Zealand. Geothermics, 377-392.

ANEXOS

Anexo 1 Petrografía macroscópica

MLP-13



MLP-14



MLP-14



MLP-14



MLP-15



MLP-16



MLP-e

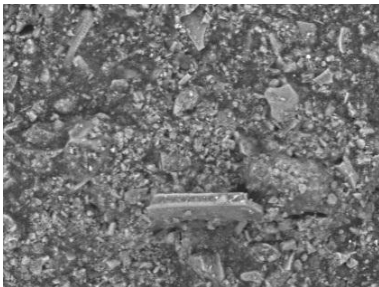


MLP-e



Anexo 2 Imagenes del Microscopio Electrónico de Barrido (SEM)

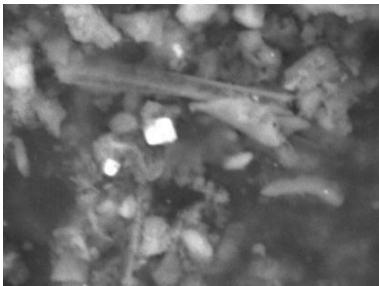
BH-1



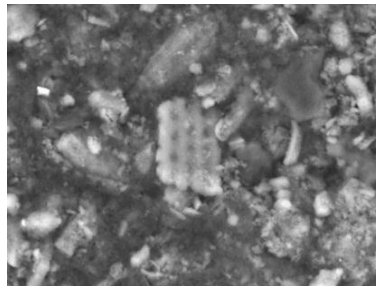
BH-2



BH-3



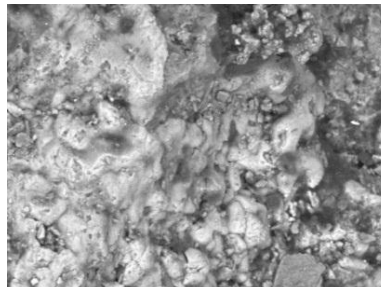
BH-4



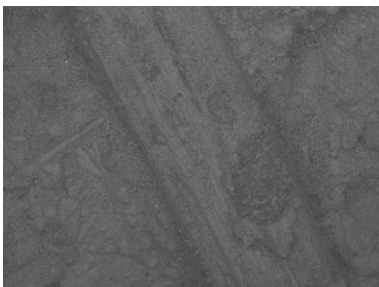
BH-5



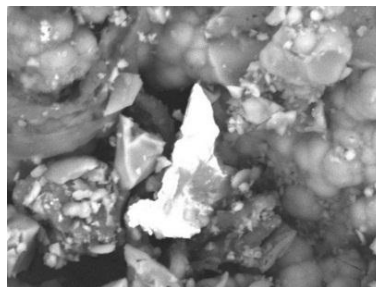
BH2-1



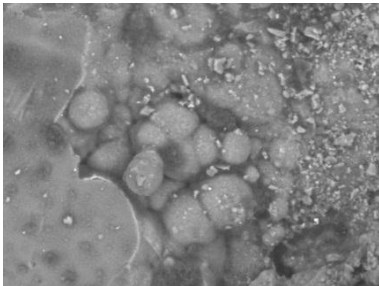
BH-13 PLATA



MAR-5

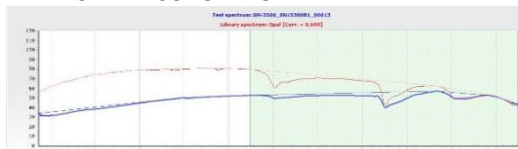


SH-1



Anexo 3. Análisis de infrarrojo de onda corta (SWIR)

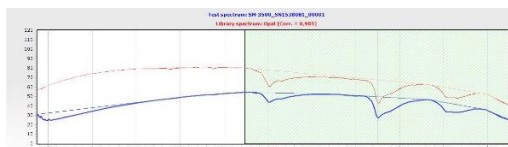
MPL-13 BLANCO: ÓPALO



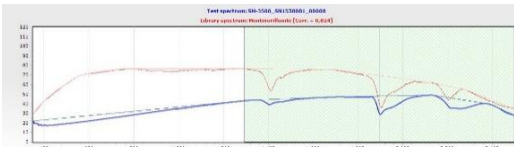
MPL-13 GRIS: ÓPALO



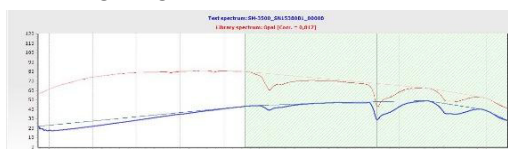
MPL-14 BEIGE: ÓPALO



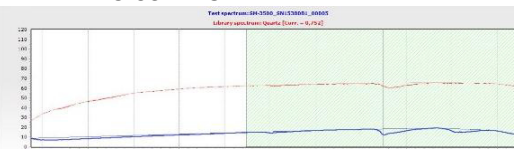
MPL-14 MONT.



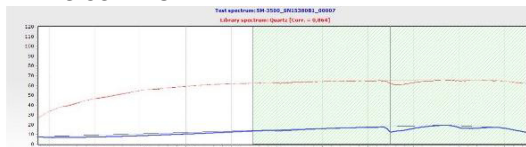
MPL-14 ÓPALO



MPL-15 CUARZO



MPL-e CUARZO



Anexo 4. Compelmentos de Metodología

El ICP-OES, En las últimas décadas, la cromatografía iónica se ha convertido en uno de los métodos más importantes para el análisis de trazas de aniones y cationes. Técnica absolutamente imprescindible en el análisis de aguas y medio ambiente. Se basa en el uso de resinas de intercambio iónico. Cuando una muestra iónica atraviesa estas columnas, los iones presentes se separan debido a las diferentes retenciones que sufren al interactuar con la fase fija de las columnas analíticas (Figura 3.6). Una vez separada, la muestra pasa a través de un detector (conductimétrico, amperométrico, UV) donde se registra la señal obtenida respecto al tiempo de retención. El resultado son unos cromatogramas donde la posición de los máximos nos indica el ion presente (carácter cualitativo) y su área nos indica que cantidad existente de dicho ion (carácter cuantitativo)