

Estudio geológico estructural en la franja sur del Lago de Cuitzeo, Mich.

J. Guadalupe Gómez López, Víctor Santiago Rocha López, Uriel Arellano Contreras, Christian Ordaz Méndez y Esteban Jiménez Salgado

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Morelia, Mich., CP 58090. Correo: joseguadalupe.gomez@cfe.gob.mx

Resumen

El Lago de Cuitzeo es una cuenca endorreica de origen tectónico en la que se han depositado sedimentos lacustres arcillosos, localizada en la porción norte del estado de Michoacán y central de la provincia de la Faja Volcánica Mexicana (FVM). El área de estudio comprende una superficie aproximada de 16 km² con manifestaciones termales ubicadas en los poblados de San Agustín del Maíz y San Juan Tararaméo. El basamento litológico en la zona se considera que pertenece a un cuerpo subvolcánico de composición diorítica del Mioceno, sobreyacido por una secuencia estratificada de la secuencia Mil Cumbres consistente en basaltos y andesitas del Mioceno, rocas volcánicas bimodales del Mioceno Tardío y rocas máficas a intermedias, y por el vulcanismo ácido representado por ignimbritas del Plioceno y depósitos piroclásticos de caída correspondientes a la FVM. Es posible distinguir afloramientos de depósitos lacustres y fluvio-lacustres. Durante el estudio estructural se obtuvieron 823 datos de campo, medidos principalmente en andesitas y en menor proporción en riolitas, basaltos, ignimbritas, flujos piroclásticos y areniscas, que se agruparon en 49 estaciones estructurales en las que se identificaron cuatro sistemas estructurales: NE-SW, N-S, E-W y NW-SE. Desde el punto de vista geotérmico, el sistema estructural E-W (fallas La Palma y Chehuayo) es el más importante debido a que presenta actividad hidrotermal activa y paleotermalismo, es conductor de fluidos y se encuentra tectónicamente activo en la actualidad. Este sistema se correlaciona con el Sistema Morelia-Acambay. El segundo sistema estructural en importancia geotérmica es el NE-SW (fallas San Juan y San Agustín). El termalismo en la zona está representado por 35 manantiales con temperaturas de 24 a 95°C y pH de 5.5 a 8, cuyas temperaturas de fondo varían de 105 a 178°C, de acuerdo al geotermómetro de Na/K/Ca, llegando hasta 250°C según el geotermómetro de gases de H₂/Ar. Esto permite clasificar a la zona como de mediana entalpía.

1. INTRODUCCIÓN

Dentro de las actividades de exploración que realiza la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG), están las de identificar y valorar nuevas zonas susceptibles de ser explotadas para la generación de energía eléctrica.

En la zona sur del Lago de Cuitzeo, entre los poblados de San Agustín del Maíz y San Juan Tararaméo, en 2009 fue perforado un pozo por parte de particulares, el cual se descontroló a la profundidad de 150 m, arrojando agua a una altura aproximada de 30 m, con una temperatura de 85°C, lo que resultó de interés para la GPG. Por ello se programó un estudio geológico para confirmar la presencia de un acuífero termal de interés geotérmico. En 2010 la GPG llevó a cabo el presente estudio, con el objetivo de valorar el potencial geotérmico de la zona y aprovechar este recurso.

Este proyecto consistió en la caracterización geológico-estructural de la zona sur del Lago de Cuitzeo, abarcando las zonas termales de San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque y San Juan Tararaméo. Para ello se realizó un levantamiento geológico-estructural, que consistió en tomar datos en fracturas y

fallas en diferentes afloramientos de roca, así como también la caracterización litológica en los sitios de interés.

2. ANTECEDENTES

Desde la década de los sesenta la Comisión Federal de Electricidad (CFE) ha realizado en la zona del Lago de Cuitzeo estudios de tipo geológico, geofísico y geoquímico, con el objeto de encontrar recursos de alta temperatura para generar energía eléctrica, debido a que esta zona tiene la particularidad de contener manantiales calientes con un gasto de agua importante.

En 1965 Antonio Razo e Ignacio Puente realizaron un primer estudio geológico de carácter regional, que cubría las cartas de Morelia y Maravatío elaboradas por la Secretaría de la Defensa Nacional. De igual manera, el Instituto de Geología de la UNAM realizó otro levantamiento geológico regional a cargo de los investigadores A. Demant, R. Muvois y L. Silva.

En 1980, los Javier López Reyes y Emilio Bigura realizaron un estudio de exploración geofísica con la finalidad de definir las posibilidades geotérmicas de la región del Lago de Cuitzeo. Ellos delimitaron las zonas superficiales calientes, encontrando anomalías térmicas en los poblados de San Agustín del Maíz, San Juan Tarameo y San Agustín del Pulque y por medio de magnetometría definieron fallas de dirección N-S y E-W. Además mencionan que las anomalías de bajos resistivos se encuentran en cuatro zonas (zonas de manifestación de San Agustín de Maíz y San Juan Tarameo, así como al sur de estas poblaciones).

En 1983 Jesús Arredondo realiza un levantamiento gravimétrico de la zona con el objetivo de identificar estructuras geológicas de la región que no presentan expresión en superficie, y concluye que existe un alineamiento E-W interpretado estructuralmente como un bloque basculado hacia el sur y fallado al norte lo cual provocó la depresión del Lago de Cuitzeo. Las estructuras más recientes de orientación NE-SW debieron haber reactivado el sistema de fallas regional E-W dando lugar a las manifestaciones termales presentes en la zona.

En 1984 Enrique Tello y José Luis Quijano realizan el estudio de evaluación geoquímica de las zonas termales del Lago de Cuitzeo, analizando 20 muestras representativas del área e indicando que existen cuatro zonas de interés geotérmico. La de Araró resulta la más atractiva debido a que el geotermómetro K-Na-Ca arroja temperaturas de fondo del orden de 212°C, el tipo de agua es sódico-clorurado, el flujo de calor calculado es de 7.63 UFC, mientras que la composición química de los gases es la esperada en un ambiente geotérmico ya que el CO₂ es el gas más abundante. Le siguen las zonas de San Juan Tarameo y San Agustín del Maíz, debido a que las temperaturas calculadas con geotermómetros son menos favorables, y por último se encuentran las zonas de Coro, Estación Queréndaro, San Sebastián, Balneario Atzimba y Baños González, que reportan temperaturas de 52 a 88°C.

3. LOCALIZACIÓN Y ACCESO

El área de estudio se localiza en la porción norte del estado de Michoacán, en los límites con el estado de Guanajuato, a 24 km en línea recta de la ciudad de Morelia. Se ubica en los paralelos 19° 53' 15" de latitud norte y los meridianos 100° 50' 20" y 101° 19' 30" de longitud oeste, a una altura de 1820 msnm (Figura 1).

El acceso a partir de la Ciudad de Morelia se realiza por la autopista Morelia-Salamanca hasta el entronque con la autopista de México-Guadalajara, con un recorrido total de 24 km (Figura 2).

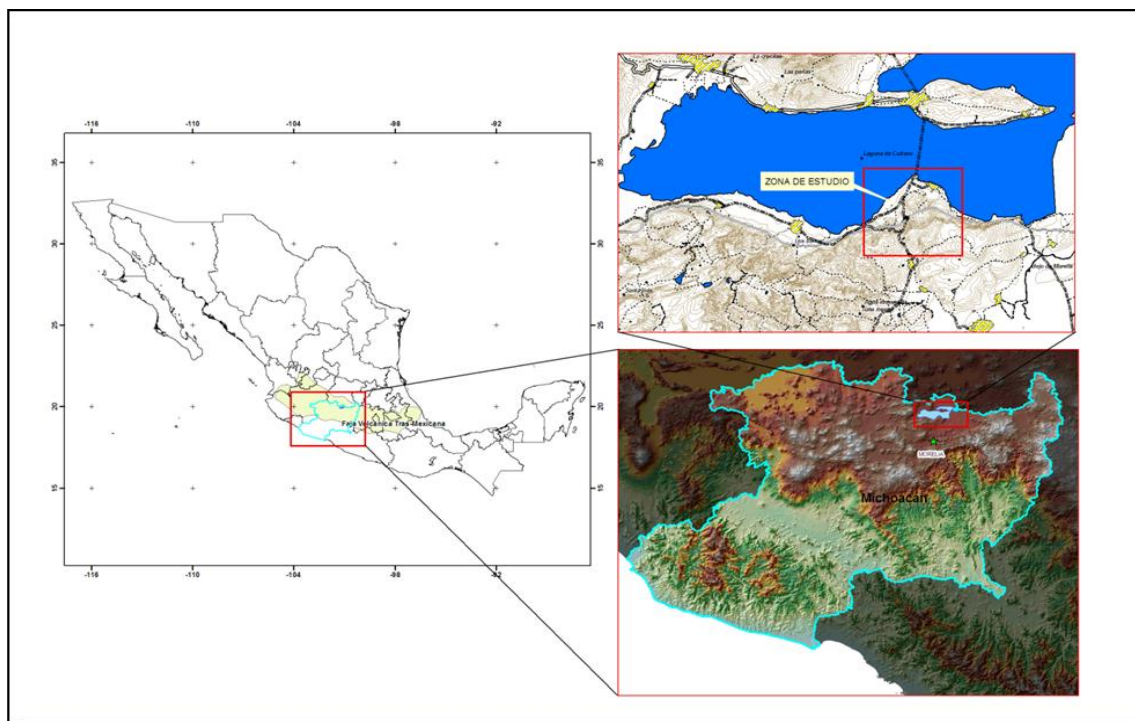


Figura 1. Localización del área de estudio.

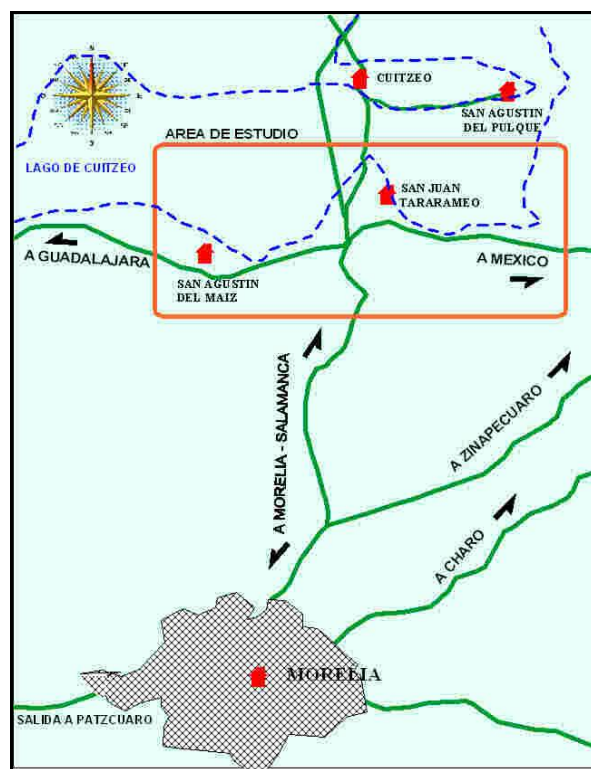


Figura 2. Acceso al área de estudio a partir de la ciudad de Morelia.

4. OBJETIVO

Explorar y caracterizar el entorno geológico-estructural de las manifestaciones termales de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo.

Objetivos particulares:

- a) Evaluación geológica-estructural, identificación de unidades y secuencia litológicas.
- b) Elaboración de un mapa geológico-estructural de la zona.
- c) Caracterizar, identificar y ubicar con GPS las estructuras geológicas y realizar una base de datos.
- d) Determinar la geometría de las estructuras de la zona de estudio y su relación con centros de emanación de las manifestaciones termales.
- e) Ubicar con GPS el termalismo activo en la zona de estudio e integrar su base de datos.
- f) Recolectar muestras de agua de los manantiales termales para análisis geoquímico.
- g) Elaborar un informe final.

5. DESARROLLO DEL TRABAJO

Los trabajos consistieron en la recopilación e integración documental, obtención de datos de campo, análisis e interpretación de los datos estructurales y por último la elaboración de un informe final.

a) Trabajo de gabinete previo a la visita de campo

Los trabajos de gabinete consistieron en consultar material bibliográfico existente elaborados por personal del Departamento de Exploración de la GPG.

b) Trabajo de campo

EL trabajo de campo se llevo a cabo por la Disciplina de Geología en el periodo comprendido del mes de abril a julio de 2010. Este consistió en el levantamiento geológico-estructural y la toma de datos estructurales en diferentes afloramientos de roca, identificación de la litología y la toma de muestras de agua de los manantiales termales para su análisis geoquímico.

c) Etapa de análisis de los datos de campo

Esta fase del trabajo se realizó en las oficinas de la Gerencia una vez terminado el período de campo. Consistió en la elaboración de la base de datos estructurales obtenidos en los recorridos de campo de la zona de estudio. Los datos se capturaron en el software Stereonett con la finalidad de visualizar la geometría de los datos de campo y posteriormente realizar una clasificación estadística de los diferentes sistemas estructurales.

Los datos obtenidos en campo se analizaron de acuerdo a su ubicación y se integraron en diferentes Estaciones Estructurales (EE), la ubicación de las estaciones se plasmo en un plano topográfico base.

6. GEOLOGÍA

En este capítulo se describen las diferentes unidades litológicas aflorantes dentro de la zona del Lago de Cuitzeo. Se trata de presentar un panorama general de las rocas que se observan en superficie y su descripción megascópica además de los rasgos morfológicos de interés que se observan en el campo.

6.1. GEOLOGÍA LOCAL

En la zona de estudio la columna litológica local está constituida por unidades volcánicas de composición variable y sedimentos fluvio-lacustres del Cuaternario (Figura 3).

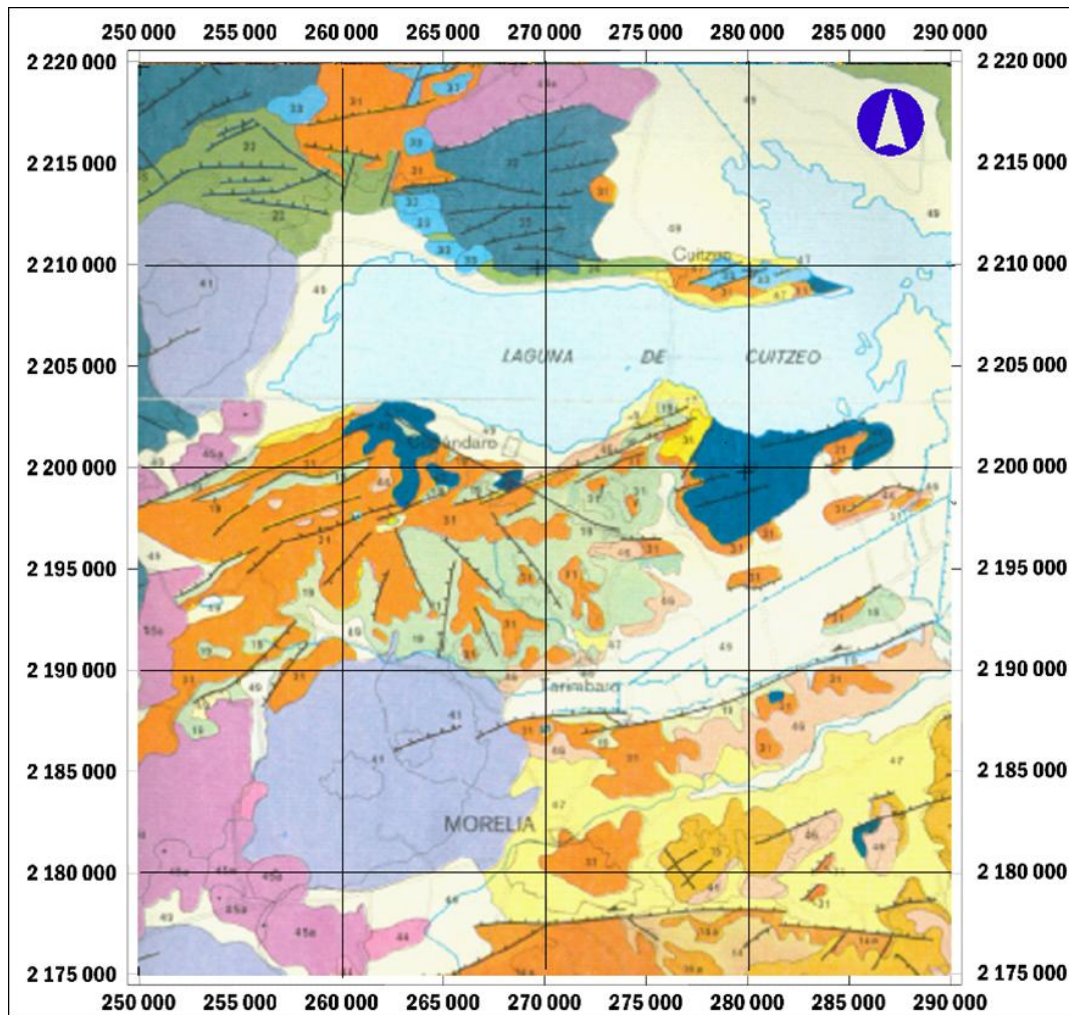


Figura 3. Litología local, (tomada de Geological Society of America Map and Chart Series).

- a) Secuencia volcánica estratificada Mil Cumbres (Tmba). Constituida de flujos de lavas basálticas y andesitas, compactas, con fracturamiento y alteración hidrotermal. Esta unidad se considera el basamento local.
- b) Flujos de andesitas y basaltos Tarímbaro (Tmab). Su edad es Mioceno Tardío.
- c) Ignimbritas Laguna de Cuitzeo (TpI). Su edad es Plioceno Tardío.
- d) Secuencia de flujos piroclásticos y domos riolíticos y dacíticos (Tfp). Se ubican en el Plioceno Tardío.
- e) Basaltos Laguna de Cuitzeo (Qb). Estos se ubican en el Cuaternario.
- f) Depósitos piroclásticos de caída (Qp). Su posición estratigráfica es variable dentro del Cuaternario.
- g) Depósitos fluvio-lacustres (Ql).
- h). Depósitos superficiales (Qsr). Limos y arcillas de color negro, donde se ubican las manifestaciones termales.

6.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El Lago de Cuitzeo está limitado por una serie de semi-grabens con dirección NE-SW y E-W basculados hacia el sur, que han desarrollado dos sistemas lacustres que han migrado en el tiempo y en el espacio.

El primer sistema lacustre se desarrolló durante el Mioceno Superior-Plioceno Inferior, originando un lago en la paleo-cuenca de Charo (Israde, 1995). El segundo sistema lacustre (Lago de Cuitzeo) se desarrolló en el Cuaternario.

Los fechamientos obtenidos en el basamento andesítico y en los flujos piroclásticos de la cima de los depósitos lacustres al sur del lago actual sugieren que el antiguo Lago de Cuitzeo se desarrolló entre hace 7 millones de años (Neogeno) y 2 millones de años.

La prosecución de la actividad volcánica y tectónica (extensión y sucesivo basculamiento) permite que se desarrolle un lago más al norte (Lago de Cuitzeo) hasta su posición actual en tiempos posiblemente del Pleistoceno Inferior basándose en los depósitos lacustres y la coexistencia con basaltos fechados entre 0.75-0.87 millones de años (Pascuaré et al., 1991).

De acuerdo a los datos geológicos medidos en el área de estudio y desde el punto de vista estructural, la margen sur del Lago de Cuitzeo corresponde a una depresión tectónica formada por semi-grabens con dirección NE-SW y E-W. Las estructuras presentan un estilo de deformación de bloques rotacionales con un basculamiento que oscila de 19 a 25° al SW y escarpes de falla al norte.

Se recolectaron 823 datos geológicos, mismos que están integrados en 49 estaciones estructurales, con su respectiva ubicación en coordenadas UTM (Tabla 1).

Tabla 1. Resultantes de sistemas estructurales

ESTACIÓN ESTRUCT.	SISTEMAS ESTRUCTURALES				OBSERVACIONES
	NE-SW	E-W	N-S	NW-SE	
EE012910	N62°E Δ 63°SE	N78°W Δ 36°SE	N30°E Δ 27°NW	-----	Datos tomados en andesita y flujos piroclásticos (Toba)
EE022910	N52°E Δ 67°NW	N81°W Δ 63°NW Falla pitch 7°E	N08°E Δ 73°NW Falla pitch 6-24°S N08°E Δ 76°SE Falla pitch 28°N Par conjugado	-----	Datos tomados en basalto,
EE032910	N65°E77° Δ SE	N87°W Δ 79°NE N75°E Δ 87°SE	NE15°E Δ 68°SE Falla pitch 60°SE	N51°W Δ 76°NE	
EE042910	N31°E Δ 73°SE Falla pitch 90° N25°E Δ 46°SE	-----	-----	-----	Datos medidos en una Riolita alterada
EE052910	-----	-----	N11°E Δ 59°NW Falla	-----	Riolita, plano de falla rellena por calcita y arcillas.
EE062910	-----	-----	N22°E Δ 67°SE	-----	Riolita, fractura de 2 mm aprox. de espesor, precipitación de calcita
EE072910	-----	N70°E Δ 69°SE	N26°W Δ 69°NE Falla L.D.	N67°W Δ 85°NE Falla pitch 40°SE	Datos medidos en una ignimbrita con basculamiento 37°SW
EE082910	-----	-----	-----	N60°W Δ 80°NE	Fractura abierta hasta 20 cm aproximadamente.

EE090410	N60°E \perp 82°NW	N72°E \perp 82°NW	-----	N45°W \perp 75°NE	Datos tomados en una toba riolítica y en ignimbrita.
EE100410	N48°E \perp 62°SE	N88°W \perp 73°NE	N25°E \perp 25°NW	-----	Datos medidos en una ignimbrita
EE110410	N47°E \perp 80°NW	-----	-----	-----	Datos medidos en una ignimbrita
EE120410	N56°E \perp 64° SE Falla principal	N77°E \perp 74°NW	N19°E \perp 75° SE Plano de falla	N29°W \perp 83°NE	Datos medidos en andesita
EE130410	N47°E \perp 73°SE	-----	-----	-----	Datos medidos en Riolita
EE140410	N51°E \perp 63°NW Falla pitch 30°NE	N82°E \perp 84°NW	-----	-----	
EE150510	N47°E \perp 67°NW	-----	N19°E \perp 59°NW Falla pitch 27°S N03°W \perp 82°NE Falla pitch 42°N	-----	Datos tomados en Riolita, Basculamiento 19°SE
EE160510	N43°E \perp 53°NW N34°E \perp 76°SE Par conjugado	-----	-----	N37°W \perp 73°SW	Basculamiento 25°SW
EE170510	N51°E \perp 79°NW N48°E \perp 78°SE Par conjugado	N72°E \perp 83°NW	N08°W \perp 84°NE	N47°W \perp 68°NE	Datos tomados en ignimbrita
EE180510	N47°E \perp 72°SE N51°E \perp 73°NW Par conjugado	-----	-----	-----	Falla con desplazamiento 60 cm. Falla con desplazamiento 90 cm. Falla con desplazamiento 16 cm.
EE190510	-----	N77°E \perp 56°SE	-----	-----	
EE200510	N44°E \perp 76°NW N35°E \perp 60°SE	N76°E \perp 68°SE Plano de falla N87°W \perp 57°SW Brecha de falla	N06°E \perp 74°NW N13°E \perp 77SE Par conjugado	N56°W \perp 87°NE	Datos medidos en ignimbrita
EE210510	N52°E \perp 69°NW	N76°E \perp 61°NW	N01°E \perp 70°NW	N47°W \perp 70°SW N60°W \perp 69°NE Par conjugado	Datos medidos en una toba
EE220510	N58°E \perp 59.5°SE N53°E \perp 84°NW Par conjugado	N85°W \perp 87°NE N83°E \perp 87°NW	N13°E \perp 82°NW	N34°W \perp 69°SW	Datos medidos en un Basalto
EE230510	N43°E \perp 77°SE N38°E \perp 87°NW Par conjugado	N83°W \perp 88° NE N74°W \perp 72° SW Par conjugado	N23° \perp E83°NW	N41°W \perp 67°NE	Datos medidos en andesita
EE240510	N41°E \perp 66°SE N33°E \perp 87°NW Par conjugado	-----	N21°E \perp 79°NW	-----	Datos medidos en una toba lítica, del sistema NE, presenta inflexión hacia el norte.
EE250510	N38°E \perp 85°NW	N70°W \perp 77°NE N82°E \perp 87°NW	N21°W \perp 88°SW	N52°W \perp 83°SW	Datos medidos en Ignimbrita
EE260510	N48°E \perp 80°SE Falla pitch 11°SW N61°E \perp 79°NW Par conjugado	-----	-----	N39°W \perp 84°SW	Datos medidos en Ignimbrita

EE270510	N59°E \perp 81°NW Falla pitch 7° SW N45°E \perp 81°SE Par conjugado	-----	N03°E \perp 70°SE N13°W \perp 68°SW Par conjugado	N47°W \perp 89°NE	Datos medidos en ignimbrita
EE280610	-----	N79°W \perp 78°NE	-----	-----	Datos medidos en andesita
EE290610	N50°E \perp 78°NW	-----	N29°E \perp 66°NW N14°W \perp 64°NE	-----	Brecha andesítica con paleotermalismo, precipitación de sílice, espesor aprox. 20 m
EE300610		N82°E \perp 56°NW Falla pitch 10° E	N00°E \perp 50°SE	-----	Datos medidos en andesita
EE310610	N42°E \perp 68°NW Falla pitch 45°N	N80°W \perp 60°NE Falla pitch vertical	N16°E \perp 83°NW Falla pitch 12°N N03°E \perp 70°SE Par conjugado	N28°W \perp 76°SW	Datos medidos en andesita
EE320610	N38°E \perp 77°NW N61°E \perp 79°NW		N01°E \perp 66°SE	N66°W \perp 70°NE Falla pitch 7° E N33°W \perp 82°NE Par conjugado	Datos medidos en andesita lajeada
EE330610	N34°E \perp 75°NW Falla inversa pitch 15°NE	N71°W \perp 83°NE	-----	-----	Datos tomados en andesitas, zona de ascenso de fluidos.
EE340610	-----	-----	N23°E \perp 83°NW	-----	Datos medidos en andesitas
EE350610	N50°E \perp 66°NW Falla pitch 65° NE	N84°E \perp 71°NW Falla pitch 0°E N90°E \perp 75°NE	N07°E \perp 81°SE Plunch 75° NE 35°	-----	Datos medidos en andesitas
EE360610	-----	-----	N08°E \perp 79°NW Falla inversa	-----	Dato tomado en arenisca
EE370610	-----	-----	N22°E \perp 66°NW	-----	Datos medidos en sedimentos lacustres
EE380610	N34°E \perp 72°NW	-----	N03°E \perp 63°NW	-----	Contacto sedimentos lacustres con colada de lava andesítica-basáltica
EE390610	N43°E \perp 76°NW	-----	N10°E \perp 76°NW Falla pitch 0°-25° N	-----	
EE400610	N43°E \perp 69°NW	-----	-----	-----	Datos medidos en andesitas
EE410610	N55°E \perp 76°NW	-----	-----	-----	Datos medidos en Ignimbrita
EE420710	N52°E \perp 61°NW N60°E \perp 80°SE	-----	N13°E \perp 82°SE N24°W \perp 82°NE	-----	Datos medidos en una andesita basáltica.
EE430710		N83°W \perp 60°NE Falla pitch 49°NW N72°E \perp 68°NW Falla pitch 47°NW	N10°W \perp 81°NE	-----	Datos medidos en riolita
EE440710	N40°E \perp 82°NW	-----	-----	-----	Datos medidos en Ignimbrita
EE450710	-----	-----	-----	N45°W \perp 60°NE Falla pitch 34°SE	Datos medidos en riolita
EE460710	N45°E \perp 68°SE	N76°W \perp 77°SW N76°W \perp 88°NE	N05°W \perp 82°NE N13°E \perp 82°SE	N34°W \perp 80°SW N62°W \perp 79°NE	Datos medidos en Andesitas

EE470710	N45°E \pm 73°NW	-----	N07°W \pm 70°NE	N38°W \pm 60°NE Falla pitch 76°NW	Datos medidos en Andesitas
EE480710	-----	N84°W \pm 83°SW	N18°E \pm 73°NW	N60°W \pm 81°SW	Datos medidos en Ignimbrita
EE490710	N64°E \pm 82°NW	N78°E \pm 82°NW			Datos medidos en Arenisca
TOTAL	40.60%	27.30%	17.40%	14.70%	823 datos

Estos fueron tomados en los recorridos campo realizados en zonas aledañas a los poblados de San Agustín del Maíz y de San Juan Tarameo.

De acuerdo a los datos estructurales fue posible establecer que el área de estudio se encuentra perturbada por cuatro sistemas de fallas que tienen alineamientos NE-SW, E-W, N-S y NW-SE, los cuales se describen a continuación partiendo del más viejo a más reciente.

6.2.1. Sistema de fallas NE-SW

La formación de este sistema de fallas se inició al norte del Anticlinal de Tzitzio con direcciones conjugadas NE-SW, provocando estructuras de tipo horst y graben. Durante esta etapa los movimientos tectónicos permitieron el ascenso de grandes volúmenes de magma andesítico, que formaron grupos de domos y conos lávicos, que al parecer marcan el inicio de la actividad volcánica del Cinturón Volcánico Transmexicano (CVT), el cual también está afectado por el mismo tipo de fallas.

Las fallas con esta orientación están asociadas a las alineaciones de conos de cineríticos (Connor, 1990).

Estas fallas pueden datarse a partir de ~15 Ma como fallas de desgarre lateral izquierdo, reactivado como fallas normales en el Plioceno Temprano (Israde-Alcántara y Garduño Monroy, 1999).

En el área de estudio este sistema ocupa el primer lugar en forma estadística en cuanto a la presencia de datos estructurales con 334 datos que representan el 40.6%. Se observó que los planos de falla tienen una orientación NE-SW y los elementos cinemáticos (estrías) indican dos generaciones de movimiento, el primero de 0 a 15° con movimiento lateral izquierdo y el segundo de 45° a 90° con movimiento normal y oblicuo. Con lo anterior y la ubicación de las estaciones estructurales con GPS se determinó la presencia de dos fallas a las que se les asignó el nombre de San Agustín y San Juan, las cuales se describen a continuación y se muestran en la Figura 4.

a) Falla San Agustín. Esta estructura tiene un rumbo y echado promedio N47°E \pm 80°NW, con inflexión de N33°E a N61°E y un echado que varía de 68° a 86° al NW. En la estación estructural 18 (EE), se observó que presenta un desplazamiento de 90 cm asociado a una falla normal. En algunos segmentos esporádicos se caracteriza por presentar aberturas que van de 10 a 20 cm, con zonas de paleotermalismo consistentes en zonas de alteración hidrotermal: precipitación de calcita, sílice y epidota y arcillas, lo cual indica que a través de ella hubo ascenso de fluidos y que en la actualidad se encuentra sellada al menos superficialmente por dichos minerales.

b) Falla San Juan. Esta estructura tiene un rumbo y echado promedio N46°E \pm 70°NW, con inflexión de N34°E a N52°E y un echado que varía de 61° a 82° al NW, presenta paleotermalismo, precipitación

de óxidos, calcita, sílice y epidota, lo cual indica que a través de ella hubo ascenso de fluidos y que en la actualidad se encuentra sellada al menos superficialmente por dichos minerales.

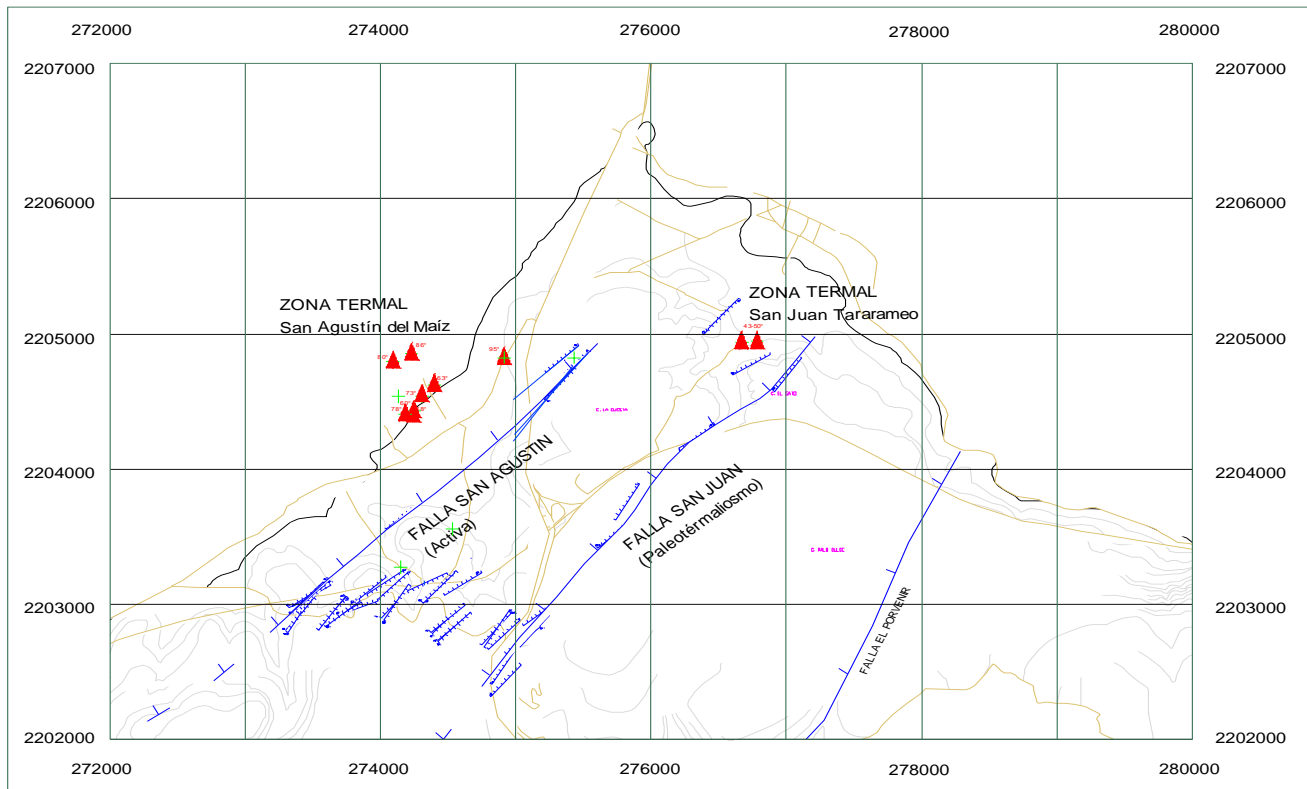


Figura 4. Sistema estructural NE-SW.

6.2.2. Sistema de fallas E-W

Este sistema de fallas está asociado a la formación de las depresiones tectónicas de Chápala, Zacapu, Cuitzeo, Maravatío y Acambay que se desarrollaron durante el Mioceno Tardío (7-9 Ma), las cuales fueron posteriormente rellenadas por sedimentos fluvio-lacustres.

Localmente este sistema ocupa el segundo lugar en cuanto a la presencia de fracturas y fallas con 225 datos que representan el 27.3%. Las fallas son de tipo lateral derecha con elementos cinemáticos de 0 a 10° y normal oblicua con elementos cinemáticos de 47° a 90° , producidas por campos de esfuerzos compresivos y distensivos.

Con lo anterior y la ubicación de las estaciones estructurales con GPS se determinó la presencia de dos fallas que se nombraron La Palma y Chehuayo (Figura 9), ambas pertenecientes al sistema activo de Acambay.

De acuerdo a la alineación que presentan las manifestaciones hidrotermales se determinó que este sistema es actualmente el conductor de los fluidos hidrotermales y por ende el de mayor importancia geotérmica.

a) Falla La Palma. Esta estructura tiene un rumbo y echado promedio $N88^\circ E \pm 61^\circ NW$, con inflexión de $N72^\circ E$ a $N83^\circ E$ y un echado que varía de 56° a 68° al NW. Presenta precipitación de calcita, sílice y epidota, tiene relación con la actividad hidrotermal actual por lo que se considera activa y conductora

de fluidos en la actualidad, así como asociación con manifestaciones termales. Se considera que esta estructura conecta las zonas de manifestaciones termales de San Agustín del Maíz y San Juan Tarameo (Figura 5).

b).Falla Chehuayo. Esta estructura tiene un rumbo y echado promedio $N88^{\circ}E \pm 78^{\circ}NW$, con inflexión de $N77^{\circ}E$ a E-W y un echado que varía de 71° a 87° al NW, presenta precipitación de calcita y en la estación estructural (12) zona inestable. Aunque no presenta manifestaciones hidrotermales, también pertenece al sistema activo.

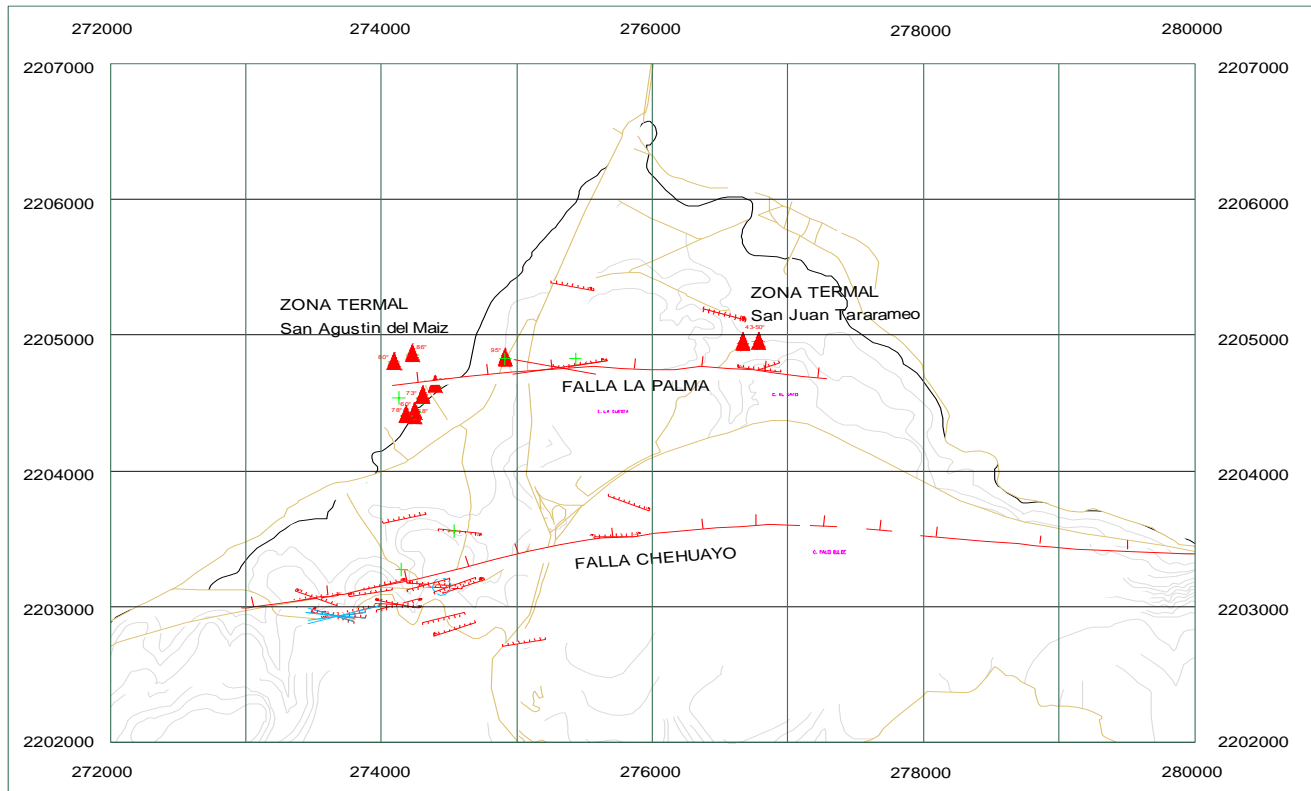


Figura 5. Sistema estructural E-W.

6.2.3. Sistema de fallas N-S

El origen de este sistema estructural no está bien definido, pero se cree que movimientos compresivos de dirección E-W ocurridos en el Mioceno originaron plegamientos N-S y planos de debilidad todos relacionados con la Orogenia Laramide.

Durante el Plioceno ocurre una etapa distensiva (post-orogénica) que desgarró al complejo volcánico terciario.

Este sistema ocupa el tercer lugar en cuestión de estadística estructural con 143 datos que representan el 17.4%.

Dentro de este sistema estructural, en la zona de estudio se determinó la presencia de la falla Los Limones que tiene rumbo y echado promedio $N12^{\circ}E \pm 74^{\circ}NW$, con inflexión de $N8^{\circ}E$ a $N16^{\circ}E$ y un echado que varía de 59° a 82° al NW (ver Figura 6).

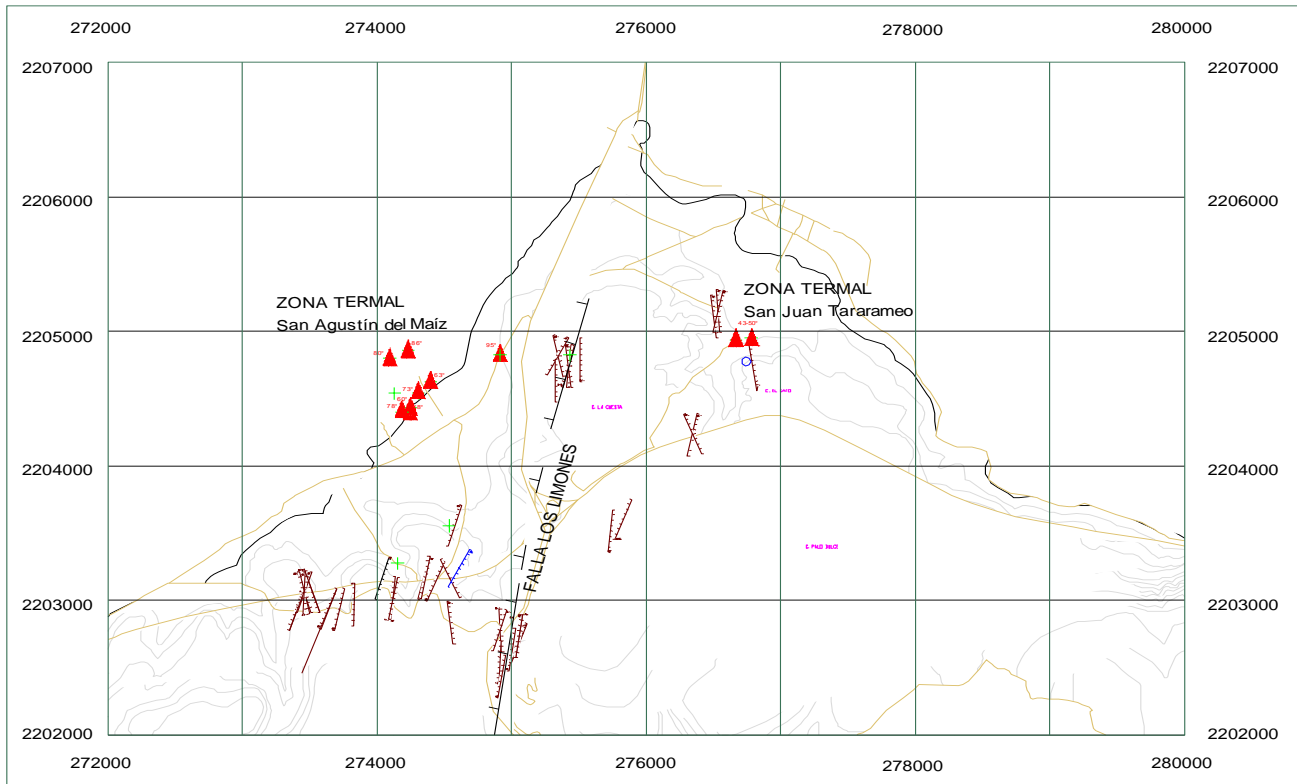


Figura 6. Sistema estructural N-S.

6.2.4. Sistema de fallas NW-SE

Este sistema es el más antiguo. Se ha visto que cerca de Morelia, Mich., una falla de orientación NW-SE corta a andesitas del Mioceno de la Sierra de Mil Cumbres. Estas rocas de 12 Ma de antigüedad están cubiertas por ignimbritas originadas en la Caldera de Atécuaro (Suter, 2001; Garduño et al., 1999b).

En la porción oriente del área se encuentra la falla regional conocida como Tzitzio-Valle de Santiago, de tipo extensional y tendencia NW-SE a NNE-SSW, que pertenece al sistema de Cuencas y Sierras (Figura 7).

En el área de estudio este sistema se observó en ignimbritas, riolitas y andesitas, pero se encuentra presente en mayor proporción perturbando a las andesitas y es ahí donde fue posible observar que presenta paleotermalismo, está sellado por precipitación de minerales hidrotermales como calcita, sílice y epidota y también presenta indicadores cinemáticos (estrías) señalando que los primeros movimientos son de tipo lateral derecho y más tarde normales.

De forma estadística este sistema ocupa el cuarto lugar en cuanto a la presencia de datos estructurales con 121 datos que representan el 14.7% y está formado por fallas conjugadas. La falla sintética presenta un rumbo y echado promedio $N50^{\circ}W \pm 75^{\circ}NE$ y la antitética de $N41^{\circ}W \pm 77^{\circ}SW$. Localmente se localiza en tres sectores (Figura 8). Con lo anterior se define que este sistema de falla se ha reactivado, pero que en la actualidad solamente en el sector de San Juan Tarameo se asocia a fluidos hidrotermales y por ende presenta escasa importancia geotérmica.

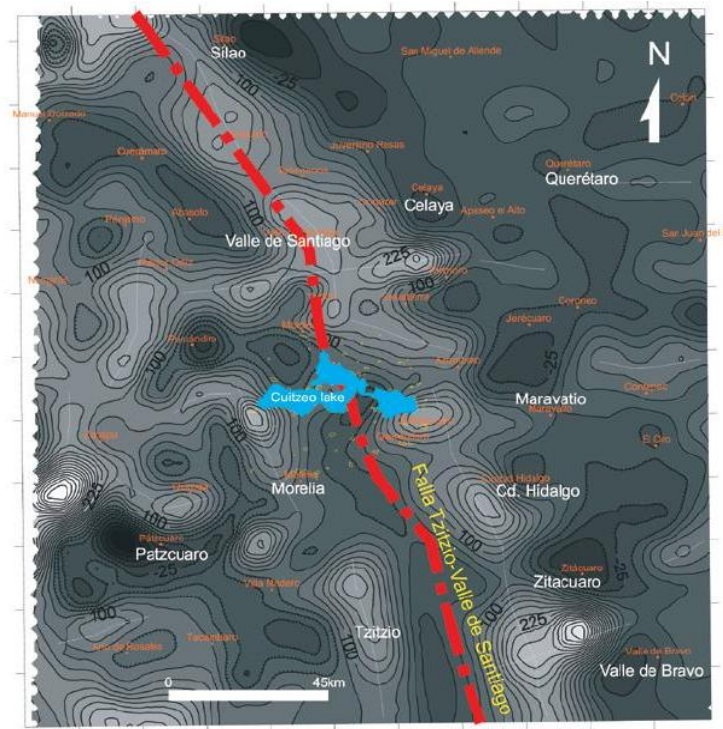


Figura 7. Falla regional NW-SE, definida por anomalía magnética (SGM).

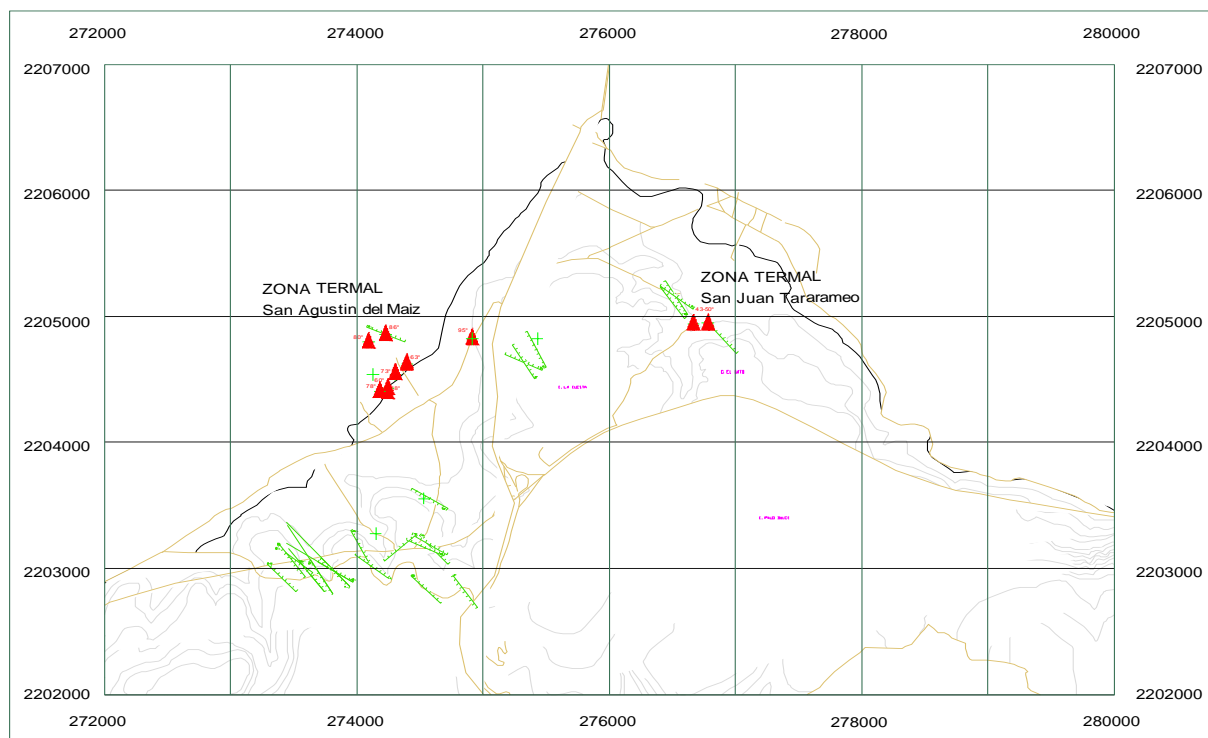


Figura 8. Sistema estructural NW-SE.

7. TERMALISMO

Uno de los objetivos particulares de este trabajo fue censar y ubicar con GPS el termalismo activo, identificar la litología de los centros de emanación, tipo de manifestación, estructuras asociadas que controlan las manifestaciones, zonas de alteración hidrotermal, e integrar una base de datos (Tabla 2). El muestreo y análisis e interpretación de muestras de las manifestaciones termales fue responsabilidad del personal de la Disciplina de Geoquímica.

No.	PUNTO DE MUESTREO	Tipo de Manifestación	T °C	PH	X	Y	Emanación de gas		OBSERVACIONES
							si	no	
1	C-1 San Agustín del Maiz	M	68	6.0	274243	2202373	si		Suelo de composicion pantanosa
2	C-2 San Agustín del Maiz	M	38	6.0	274235	2202401		no	
3	C-3 San Agustín del Maiz	M	60	6.5	274252	2202428		no	
4	C-4 San Agustín del Maiz	M	76	6.0	274251	2202448		no	
5	C-5 San Agustín del Maiz	M	70	6.0	274202	2202415	si		
6	C-6 San Agustín del Maiz	M	78	6.5	274197	2202414	si		
7	C-7 San Agustín del Maiz	M	78	7.5	274183	2202403	si		
8	C-8 San Agustín del Maiz	M	50	6.0	274211	2202390	si		
9	C-9 San Agustín del Maiz	M	50	5.5	274190	2202435	si		
10	C-10 San Agustín del Maiz	M	93	6.5	274184	2202434	si		Volcan de Lodo
11	C-11 San Agustín del Maiz	M	80	8.0	222477	2274182	si		Agua Turbia
12	C-12 San Agustín del Maiz	M	62	6.0	274178	2202475	si		Con poco Burbujeo se Puede tomar Muestra de Gas
13	C-13 San Agustín del Maiz	M	75	7.0	274160	2202483	si		Con Burbujeo se Puede tomar Muestra de Gas
14	C-14 San Agustín del Maiz	M	52	7.5	274222	2202532	si		Muestra de Agua color café
15	C-15 San Agustín del Maiz	M	75	7.5	274303	2202446	si		Loza de cemento
16	P-16 Artesiano San Agustín del Maiz	M	25	6.0	274150	2201274		no	Nivel Estatico 2 m de prof.
17	Copandaro	P	36	8.9	267994	2199945			
18	Santa Rita	P	39	8.9	263397	2202264			
19	San Sebastián de abajo	P	50	8.4	258397	2201485			
20	San Sebastián la pitaya	P	50	8.4	258796	2201049			
21	San Sebastián 1	M	52	8.4	258262	2201765		no	Manantial contaminado
22	San Sebastián 2	M	40	8.4	258300	2201682		no	Manantial contaminado
23	El Salitre	P	35	8.3	257500	2201665			Presenta una presión de cabezal de 6,5 Kg/cm2,
24	Baños Chucandiro	M	42	8.5	254686	2200395	si	no	Estanque de agua
25	LAVADEROS DE SAN AGUSTIN DEL PULQUE 1	M		7.5	282109	2210420		no	Pozo de uso comun, sale agua caliente
26	CIEGUITA DE SAN AGUSTIN DEL PULQUE	M		7.5	281449	2210427		no	Se observan volcanes de lodo
27	MANANTIAL AGUA CALIENTE	M		8.0	276669	2202940		no	
28	EL POZO DE SAN JUAN TARARAMEO	P		8.0	276572	2202920			
29	CUITZEO MANANTIAL 7	M		7.0	274234	2202858		no	
30	LAVADEROS DE SAN AGUSTIN DEL PULQUE 2	P		8.0	282109	2210420			
31	LLANO 1	M		8.0	274307	2202538		no	Hay deposito de Sinter
32	LLANO 2	M		8.0	274093	2202798		no	Hay deposito de Sinter
33	POZO LAVADEROS	P		7.0	273259	2201652			
34	BALNEARIO LOS ESTANQUES	P		8.0	274400	2202623			
35	POZO EL SALITRE	P		8.3	257500	2201665			
36	POZO BALNEARIO "Geiser"	P	85	8.0	274874	2002849			Pozo se arranco a los 180 °C (temp geotermometrica)
SIMBOLOGIA M= Manantial P= Pozo									

Tabla 2. Características de las manifestaciones termales.

La geotermometría Na-K-Ca en las muestras de fase líquida indica temperaturas de 105°C a 178°C y para la fase gaseosa los geotermómetros CO₂/Ar y H₂/Ar estiman temperaturas de fondo de 200 a 250°C.

En la margen sur de la ribera del Lago de Cuitzeo existe también un termalismo importante (Figura 9), clasificado como de baja entalpía, que podría utilizarse para instalar plantas de ciclo binario o bien en diferentes aplicaciones industriales.

Las manifestaciones termales son manantiales de agua caliente, fumarolas, volcanes de lodo y pozos artesianos.

La Fotografía 1 muestra una manifestación termal de un manantial de agua caliente, con temperatura de 82°C y depósitos de geiserita o sinter. La Fotografía 2 muestra que la manifestación termal al construirse un pozo de agua que resultó artesiano y que posteriormente se acondicionó para uso doméstico.

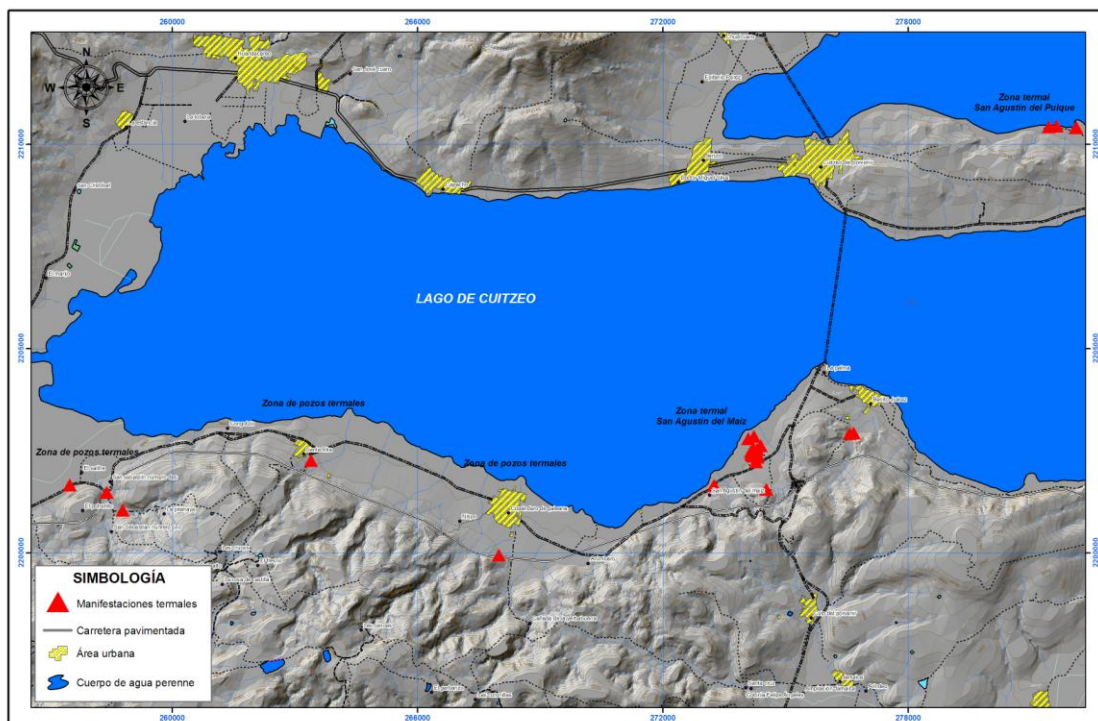


Figura 9. Distribución de los manantiales termales censados en la ribera del Lago de Cuitzeo.



Fotografía 1. Manifestación termal con depósito de geiserita o sínter.



Fotografía 2. Pozo artesiano en San Agustín del Maíz.

La fotografía 3, muestra que un pozo descontrolado, al que localmente empieza a conocerse como el Géiser, perforado originalmente con la finalidad de obtener agua para el balneario.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



Fotografía 3. Pozo descontrolado en el balneario de San Agustín del Maíz.

- El estudio de campo permitió generar una base con 823 datos de estructuras primarias (fracturas y fallas).
- Estructuralmente se logró definir la presencia de cuatro sistemas estructurales de dirección NE-SW, E-W, NW-SE y N-S, que están representados por las fallas San Agustín, San Juan, La Palma, Chehuayo y Los Limones.
- Por orden de frecuencia de datos estructurales el más abundante es el de orientación NE-SW, seguido de los sistemas E-W, N-S y NW-SE.
- El Lago de Cuitzeo, de orientación general E-W, es de origen tectónico y consiste en un basculamiento rotado al SW con escarpes de falla al norte.
- Las manifestaciones termales presentan lineamientos con dirección E-W y NE-SW.
- Hay varias manifestaciones termales en la ribera sur del Lago de Cuitzeo que consisten en manantiales y pozos.
- Durante el estudio se censaron y ubicaron 35 manifestaciones termales, consistentes en manantiales y pozos. Las temperaturas máximas medidas en los manantiales son de 38 a 93°C y en los pozos de 35 a 50°C, con una máxima en el pozo descontrolado de 85°C (El Géiser).