

## **Evaluación geológico-estructural del complejo volcánico Chichonal, Chis., como fuente alterna de energía**

*Uriel Arellano Contreras y Esteban Jiménez Salgado*

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Morelia, 58090, Mich. Correo: [uriel.arellano@cfe.gob.mx](mailto:uriel.arellano@cfe.gob.mx)

### **Resumen**

El proyecto geotérmico Chichonal se localiza al noroeste del estado de Chiapas. Está emplazado localmente en un basamento de cuatro unidades de origen sedimentario del Jurásico al Terciario. Se considera un sistema volcánico-hidrotermal de los más recientes a nivel mundial. Su origen está relacionado con la interacción de las placas tectónicas de Cocos y Norteamérica. Las dataciones más recientes por  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  de los productos volcánicos permiten definir seis unidades volcánicas: Somma, Domo SW, Domo Cambac, Domo Capulín, Domo NW y flujos piroclásticos del Holoceno, con edad de 276 mil años al Reciente. Su evaluación petrográfica y geoquímica determinan que los magmas máficos se producen, evolucionan y se estacionan a una profundidad de 6 a 7 km con temperaturas de 750 a 880°C, para dar origen a magmas intermedios de tipo traquiandesítico mediante cristalización fraccionada y contaminación cortical. La deformación estructural observada permite distinguir dos tipos de deformación: dúctil y frágil. La secuencia sedimentaria se encuentra plegada y constituye los anticlinales de La Unión, Caimba, el sinclinal de Buena Vista y la deformación frágil de fallamiento tipo capa-capas. En las rocas volcánicas la deformación es de tipo frágil y consiste en fallamiento y fracturamiento, observándose claramente al NW del complejo volcánico. Desde el punto de vista estructural la actividad hidrotermal está controlada por sistemas estructurales y por contactos litológicos entre el paquete sedimentario y la unidad volcánica. Las manifestaciones termales consisten de manantiales, fumarolas y hervideros distribuidos en cuatro sectores del volcán. La evaluación geoquímica de las manifestaciones hidrotermales permite establecer cuatro tipos de agua: tipo sulfatada con pH ácido, sulfatada cálcica con pH neutro, clorurada ácida y clorurada sódica con pH neutro. El geotermómetro de Na/K arroja temperaturas de 230°C mientras que el geotermómetro de gases  $\text{H}_2/\text{Ar}$  indica temperaturas de 260°C. A partir del análisis estructural y geoquímico se definió una zona de interés geotérmico regida por el fallamiento que controla la distribución termal. El yacimiento geotérmico se considera que puede estar alojado en la secuencia sedimentaria de calizas. Las características termales en el área del complejo volcánico indican la existencia de una fuente de calor de alta temperatura susceptible de generar energía eléctrica a través del vapor endógeno como una fuente alterna de energía.

*Palabras clave:* Volcán Chichonal, estudio estructural, edades radiométricas, geoquímica, geotermometría.

### **Introducción**

Debido a la necesidad de diversificar las fuentes tradicionales de generación de energía eléctrica y contribuir a su desarrollo, la Comisión Federal de Electricidad a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos evalúa el potencial geotérmico que pueda existir en la zona del complejo volcánico del Chichonal.

### **Antecedentes**

El área del complejo volcánico del Chichonal ha sido objeto de un sinnúmero de estudios de diferentes índoles y propósitos. Desde la década de los setenta se han realizado trabajos de exploración por Petróleos Mexicanos (PEMEX). En esa misma época la Comisión Federal de

Electricidad (CFE) inicia un estudio de prospección geotérmica del volcán El Chichón y en 1981-1982 se retomaron los estudios con el objetivo de conocer el potencial geotérmico del volcán.

A finales de Marzo de 1982, la erupción explosiva (VEI 5) del volcán el Chichón queda marcada como el peor desastre causado por actividad volcánica en tiempos recientes de México. El evento natural consistió en la destrucción de un domo y la formación de un cráter-lago. Por tal razón la CFE decide abandonar el proyecto de interés geotérmico.

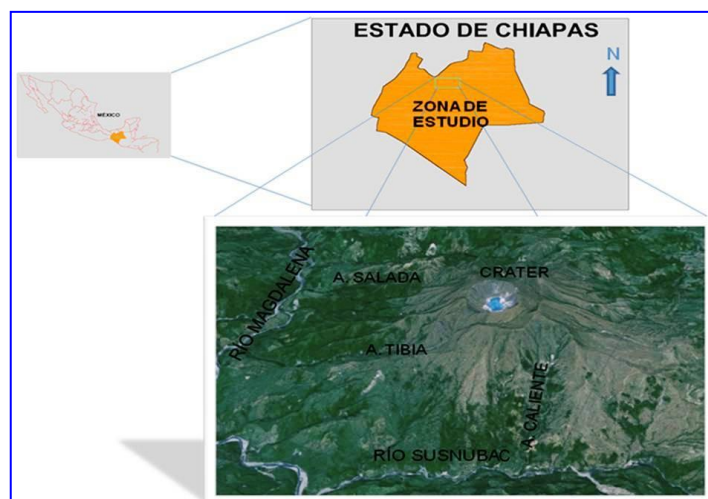
Después de la erupción de 1982, se han realizado estudios sobre el volcán El Chichón, muchos de estos han sido de índole científicos y más aplicados a la génesis y riesgo volcánico.

Del 19 al 25 de Marzo del 2007 en la Ciudad de San Cristóbal de las Casas, Chiapas la Universidad Autónoma de México (UNAM) organiza un evento denominado “*El Chichón Volcano: twenty five years late. A commemorative conference*” al que fue invitado personal técnico del Departamento de Exploración de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. En una de las ponencias se mencionó que se calculó una producción estimada de 125 a 160 MW térmicos proveniente de las manifestaciones termales asociadas al volcán El Chichón. Esta nueva percepción llamó la atención a la Subgerencia de Estudios para iniciar los trabajos de factibilidad geotérmica. Por lo cual se solicitó a la UNAM realizar el estudio de prospección geotérmica para evaluar el potencial del volcán El Chichón.

De manera simultánea se efectuó un estudio por el Departamento de Exploración con el objetivo de caracterizar e identificar las manifestaciones termales y sus posibles estructuras asociadas, complementadas con un estudio de muestreo y análisis geoquímico del termalismo.

### Localización y objetivos

El proyecto geotérmico del Volcán Chichonal se localiza en el estado de Chiapas, aproximadamente 68 km en línea recta al NNW de Tuxtla Gutiérrez y 20 km al SW de la ciudad de Pichucalco (Fig. 1).



**Figura 1.** Localización del Proyecto Chichonal.

El objetivo general de este proyecto es llevar a cabo un estudio de exploración geológico-estructural a semidetalle del complejo volcánico Chichonal.

### Objetivos particulares

- a) Evaluación geológica-estructural, identificación de unidades y secuencia litológicas.
- b) Elaboración de un mapa geológico-estructural de la zona.
- c) Caracterizar, realizar, identificar y ubicar con GPS las estructuras geológicas de origen primario y secundario con la elaboración de 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) Efectuar, localizar con GPS la termalidad activa en la zona de estudio.
- f) Recolección de muestras de agua de los manantiales termales para análisis geoquímico.

## **Desarrollo del trabajo**

### *a) Trabajo de gabinete previo a la visita de campo.*

Los trabajos de gabinete consistieron en consultar material bibliográfico con temas geológicos de diferentes estudios del volcán El Chichón.

### *b) Trabajo de campo.*

El trabajo de campo en el complejo volcánico del Chichonal se realizó en dos etapas diferentes, la primera en el año 2009 y la segunda en el año del 2011. Este consistió en la toma de datos de las discontinuidades en los diferentes afloramientos de roca, además de la caracterización litológica en los sitios de interés y el muestreo de agua de los manantiales para análisis geoquímico.

### *c) 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 elaborar la base de datos estructurales obtenidos en los recorridos de campo e integrarlos en estaciones estructurales. Los datos estructurales se vaciaron en el software Stereonet con la finalidad de visualizar y clasificar por procesos estadísticos los diferentes sistemas estructurales para cada estación. Se concluye con el vaciado de estaciones estructurales en un plano geológico-estructural.

### *d) Elaboración del Informe Final.*

Una vez concluida la etapa de campo y el análisis de la información, se prosiguió a realizar el presente informe.

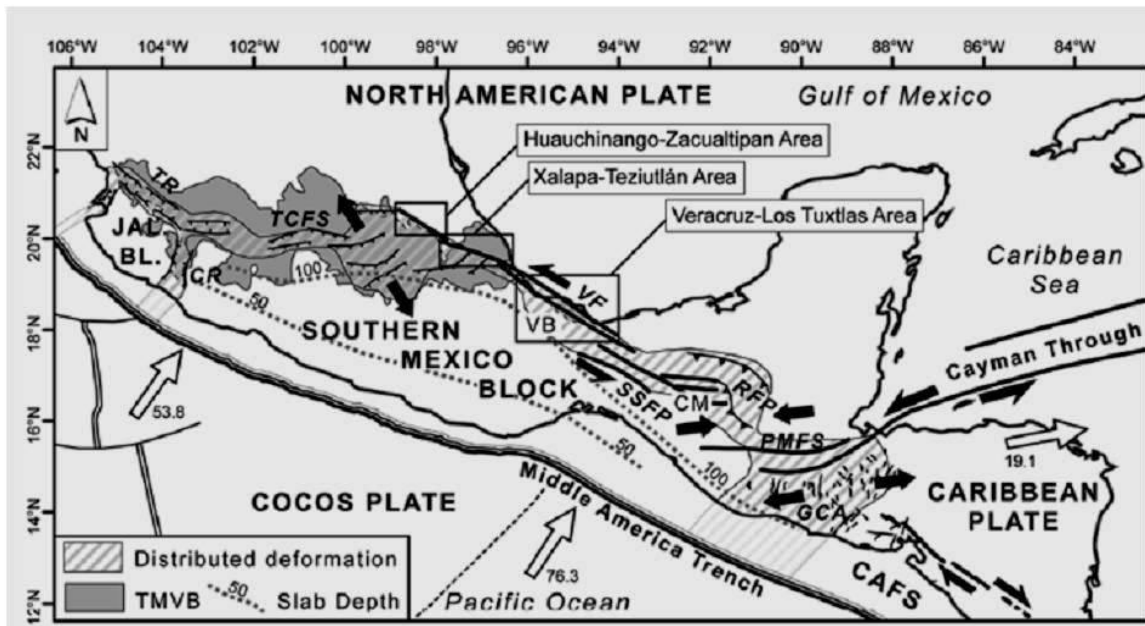
## **Geología**

Dada la complejidad geológica-estructural en el área, asociado con diferentes conceptualizaciones en el entorno geodinámico en el estado de Chiapas, este capítulo lo identificamos a partir de una escala regional a una escala local.

## **Geología Regional**

Desde el punto de vista regional el proyecto geotérmico Chichonal, se ubica en una zona sujeta a diferentes procesos geológicos: sedimentación, subducción de la Placa de Cocos por debajo de la Placa de Norteamérica, plegamientos, fallamientos normales, laterales e inversos y actividad volcánica en épocas recientes. Los elementos tectónicos regionales lo integran la Placa de Norte América, Caribe y la Placa de Cocos con su zona de subducción, y en más detalle la Plataforma de Yucatán, el Cinturón Plegado (Anticlinorio de Chiapas), la Falla del Istmo, el Macizo Granítico y el sistema de fallas Motagua-Polochic. Otro rasgo importante que se puede observar perfectamente, es la zona constituida por bloques que tectónicamente forman la provincia conocida como de Fallas de Transcurrencia.

El complejo volcánico del Chichonal se encuentra situado en el Anticlinorio de Chiapas, que en conjunto tienen vergencia hacia el norte, siendo sepultados por sedimentos post-miocénicos que alcanzan espesores considerables en la Planicie Costera del Golfo (Figura 2).



**Figura 2.** Tectónica del sistema de fallas laterales que afectan al Volcán Chichonal. Tomada de Andreani et al. (2008).

## Geología Local

Las estructuras geológicas de origen primario en la zona del complejo volcánico lo integran los procesos de sedimentación en la formación de estratos terrígenos y calcáreos con estratificación de diferentes unidades en tiempo y espacio con espesores constituidos de cuerpos tabulados.

Las estructuras geológicas de origen secundario son aquellas que se forman posteriormente a los procesos de la diagénesis como respuesta a cambios de esfuerzo y temperatura. Fue posible identificar en campo estos cambios como procesos de deformación: traslación, rotación y dilatación, buzamiento de estratos que infieren flancos de anticlinales o sinclinales, fracturamiento, fallamiento lateral, normal e inverso que dan lugar a cabalgamientos. Esto se hizo mediante el levantamiento de estaciones estructurales.

En la zona del complejo volcánico del Chichonal hay varias estructuras de origen secundario, consistentes en anticlinales y sinclinales con ejes de dirección NW-SE y NNW-SSE, cuyos flancos varían de  $42^\circ$  a  $65^\circ$ . Al norte de Chapultenango fue posible identificar un valle producto de un sinclinal de orientación E-W, que da lugar al drenaje del río Mova.

Uno de los plegamientos es el Anticlinal de Caimba situado en la parte NE del volcán El Chichón con orientación NW-SE y buzamiento al NW. Las rocas calcáreas constituyen su núcleo y afloran en su cima, formando una serranía con una altura de 1 140 msnm.

En la parte oeste del complejo volcánico se encuentra una sierra que corresponde al flanco suroeste de un pliegue asimétrico (recumbente) conocido como La Unión, el cual alcanza su máximo desarrollo (cabalgamiento) en la población de Xochimilco; la orientación de sus flancos así como el buzamiento de la estructura sigue los lineamientos generales de NW-SE.

Entre los plegamientos antes mencionados y al norte del área de estudio se encuentra el sinclinal de Buena Vista que es truncado por el cabalgamiento inverso y también es interrumpida su parte sur por material volcánico. Para efectos de este estudio solamente nos enfocaremos a la zona del

complejo volcánico del Chichonal ligado a las manifestaciones termales superficiales en sus cuatro sectores.

### Morfología del Volcán Chichonal

El Chichonal es un volcán compuesto con un cráter con diámetro de  $1.5 \times 2$  km denominado Somma con una elevación máxima de 1,150 msnm. (Figura 3). En realidad el cráter Somma es un anillo de domos (domos anulares) que tiene paredes internas sub-verticales y pendientes externas suaves. La elevación relativa del Somma con respecto a la topografía circundante es de sólo 700 msnm con respecto a la parte este y de 900 msnm en la parte occidental. El cráter Somma está cortado por estructuras más jóvenes, en su parte SE por el cono de tobas Guayabal y al SW por un domo de lavas. El cráter Somma alberga en su parte interior un cráter-lago creado por la destrucción de un domo en la erupción de 1982 con un diámetro de 1 km y paredes verticales de 140 m. La altura máxima del cráter sobre el nivel del mar es de 1,100 m y la altura del fondo del cráter es de 860 msnm.

Existen otras estructuras asociadas al edificio principal del volcán, esencialmente domos, a los cuales se les ha denominado Domo NW, Domo SW y Cambac, que a diferencia de los domos anulares del Somma se encuentran en la parte externa del edificio principal (Fotografía 1).

### Estratigrafía

La estratigrafía superficial del área de estudio consiste en rocas sedimentarias del Mesozoico, Cenozoico y volcánicas del Cuaternario.

La descripción de las rocas sedimentarias del proyecto Chichonal se tomó de publicaciones de las perforaciones de los pozos realizados por PEMEX 1981, y para las rocas de la actividad volcánica se tomaron de publicaciones y trabajos de cartografía reciente.

Para este estudio, se decidió concentrar la investigación en la secuencia sedimentaria y los depósitos volcánicos que afloran en torno al volcán.



**Figura 3.** Morfología del volcán El Chichón donde se muestra el cráter Somma y el cráter-lago de la erupción de 1982. Vista al Norte.





**Fotografía 1.** En la fotografía izquierda tomada viendo al suroeste, se observa un panorama del cráter Somma, la fotografía de la derecha se tomó viendo al noroeste donde se muestra el cráter Somma y el Domo Guayabal.

## ***Secuencia Sedimentaria***

### *Evaporitas del Cretácico Inferior y calizas del Cretácico Superior*

En esta secuencia se han agrupado dos grandes paquetes sedimentarios. El primero y el más antiguo se compone de rocas evaporíticas intercaladas con calizas dolomitizadas y niveles bentoníticos. La cima de las evaporitas se encuentra a 2 595 m de profundidad en el pozo Caimba 12, perforado por Pemex el cual se ubica al NE de la Colonia El Volcán. Sobreyaciendo concordantemente a las evaporitas se encuentra una secuencia potente de calizas masivas dolomitizadas. Sus colores son café claro y gris, petrográficamente se clasifican como calcarenitas arrecifales. También se observan brechas y desarrollos arrecifales. Es decir que estos carbonatos pertenecen a un ambiente de plataforma. Hacia su cima se observan calizas arcillosas, con nódulos de pedernal y en estratos más pequeños pero que a un conservan las características de alta energía, pero con facies más pelágicas. Todos estos carbonatos son visibles en el anticlinal Caimba en donde se estimó un espesor de 2 500 m, que corresponden a los espesores cortados por los pozos de Pemex.

### *Lutitas arenosas calcáreas del Paleoceno-Mioceno inferior*

Estas unidades forman un paquete de rocas donde predomina la porción terrígena que se asocia a un régimen erosivo y que permite depositar facies de tipo flysch. Toda esta unidad agrupa en su base a lutitas de color gris oscuro con niveles de calizas que poco a poco van graduando a arcillas laminares. Hacia la cima aparecen lentes o estratos de areniscas. Hacia su parte intermedia se alterna con numerosos niveles de areniscas en estratos pequeños y sobresalen niveles calcáreos en forma de lentes con desarrollos coralinos. Estos son bien visibles al sur del volcán El Chichón principalmente en el río Susnubac, donde a la altura de Agua Caliente se observan bloques enormes de estas rocas ricas en corales. También se encontraron bancos que se acuñan lateralmente con *Numulites* del Eoceno. Por su contenido microfaunístico a estas capas de lutitas arenosas calcáreas se les ha asignado una edad que va del Paleoceno al Mioceno inferior. Es sobre estas unidades terrígenas que se encuentra alojado el volcán El Chichón, siendo también la unidad litoestratigráfica que más extensión tiene en el área de estudio. Morfológicamente ocupa todas las depresiones. Se considera que tiene un espesor aproximado de 2 000 m.

Se aprecia que entre estas secuencias más terrígenas y aquellas calcáreas del Cretácico, existió un cambio en el medio sedimentario que pasó de una plataforma marina a un ambiente deltaico asociado a depósitos tipo flysch con eventuales desarrollos arrecifales.

La mayoría de las manifestaciones termales emanan del contacto entre estas unidades terrígenas arcillosas y los productos volcánicos del volcán El Chichón.

### *Areniscas y lutitas del Mioceno Inferior*

Los estratos terrígenos de esta unidad se convierten progresivamente en capas ricas en arenas que llegan a formar grandes bancos de areniscas y conglomerados de color café claro ricos en micas, estructuras primarias, restos de hojas, carbón y tallos. Estos bancos se alternan con lutitas limosas de color gris oscuro. Los mismos bancos de areniscas son las que morfológicamente obedecen las terminaciones de los pliegues al norte del volcán El Chichón, el espesor estimado es de 300 m.

### ***Secuencia Volcánica***

Las rocas volcánicas del área de estudio se agrupan en siete unidades con base en su distribución, características físicas, mineralógicas, químicas, edades y relaciones estratigráficas. La estratigrafía volcánica fue sustentada con la realización de dataciones radiométricas de  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  realizadas en la universidad de Alaska por el Dr. Paul Layer.

A continuación se presenta una descripción en orden cronológico de cada una de éstas.

#### *Unidad Somma*

El Somma representa la estructura más antigua del complejo volcánico Chichonal la cual contiene al cráter-lago formado durante la erupción de 1982. El Somma está disectado en tres partes de su estructura en donde nacen las cabeceras de los ríos Platanar y Mova al este, Cambac en el norte y Agua Caliente en el sureste.

Este cráter consiste de una serie de domos amalgamados de lava andesítica circundados por abanicos de depósitos de flujo piroclástico más recientes. En general las lavas que forman a los domos Somma contienen abundantes fenocristales de plagioclasas, anfíboles y piroxenos, inmersos en una matriz vítrea, cuya composición química es traquiandesítica. Las rocas de esta estructura son las más antiguas del complejo volcánico con una edad fechadas hasta ahora, con K-Ar de  $209 \pm 19$  ka (Damon y Montesinos, 1978) y  $276 \pm 6$  ka (Duffield et al., 1984).

Asociado a la estructura Somma, se encuentran depósitos de flujos piroclásticos de bloques y cenizas expuestos hasta 2.5 km del cráter en el lado oeste. En general estos depósitos definen abanicos suavizados, con drenaje bastante profundo, lo que indica que se trata de materiales relativamente antiguos. En general los depósitos de flujo piroclástico son masivos, compuestos de varias unidades de flujo, con espesores de aproximadamente 50 m, parcialmente endurecidos y constituidos por bloques de traquiandesita, muy similares a las rocas de los domos del Somma con fenocristales grandes de plagioclasas, anfíboles y piroxenos. La edad de estos flujos fueron fechados en 55 ka

#### *Unidad Domo SW*

Se define con este nombre a una estructura cómica compuesta por lavas traquiandesíticas. Este domo tiene una elevación máxima de 990 msnm con paredes sub-verticales de 300 m de alto, pobremente disectado por el drenaje y que interrumpe el borde sureste del cráter Somma. Las rocas que componen a este domo tienen textura porfídica y están compuestas por fenocristales de plagioclasas, anfíboles y piroxenos, inmersos en una matriz pobre de vidrio. La composición química de este domo es de 58.19 % en peso de  $\text{SiO}_2$ . La edad del Domo SW ha sido establecida en  $217 \pm 10$  ka con evidencias de exceso de argón. Aunque esta edad es cercana a la del edificio Somma (Damon y Montesinos, 1978), el Domo SW es más joven debido a relaciones estratigráficas.

### *Unidad Domo Cambac*

Se define con este nombre a dos estructuras dómicas localizadas en la cabecera del río Cambac,. Estas estructuras tienen una forma asimétrica, aparentemente debido a que la lava que forma a los domos logró fluir hacia el sector oeste. La roca de estos domos presenta un color gris oscuro con alteración de color ocre y presenta lajeamiento de aproximadamente 10 cm. La textura de la lava es porfídica de grano medio, con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxeno inmersos en una matriz vítrea. Además se observa un mineral de alteración de color verdoso, probablemente epidota. La composición química de roca total es traquiandesita, con 56 % en peso de SiO<sub>2</sub>. La edad de estas estructuras fechadas mediante el método de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar en ~187 y ~168 ka.

### *Unidad Domo Capulín*

Esta unidad está representada por varios domos de lava alineados aproximadamente en dirección este-oeste que se localizan a ~3 km al norte-noreste del volcán Chichonal. Esta unidad no había sido descrita anteriormente en ningún trabajo y está compuesta por aproximadamente seis estructuras dómicas, la más alta con una elevación de 739 msnm. En general los domos están compuestos por lava de composición traquiandesítica (57.8 % en peso de SiO<sub>2</sub>) de color gris claro, de textura porfídica, con fenocristales de plagioclasa, hornblenda y piroxeno en una matriz vítrea. Cabe destacar que en algunas partes los domos exhiben brechamiento, lo cual es característico en este tipo de estructuras. La edad para la unidad Capulín fue establecida en este estudio en ~152 ka mediante el método de <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar.

### *Unidad Domo NW*

Esta unidad consiste de una estructura compleja de domos y espinas con una elevación máxima de 1 048 msnm, con rasgos de erosión fuerte. Una característica sobresaliente del Domo NW es una estructura de colapso de ~700 m de ancho, abierto hacia el NW. La lava que forma a esta estructura varía de color gris a verde, parcialmente alterada, de composición traquiandesítica a basáltica (55.34-56.28 % en peso de SiO<sub>2</sub>) y de textura porfídica de grano grueso con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxenos, en una matriz pobremente vítrea. El Domo NW fue fechado en  $90 \pm 18$  ka y  $97 \pm 10$  ka mediante el método <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar. En el presente estudio se obtuvo otra edad <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar de ~80 ka, similar a las previamente reportadas.

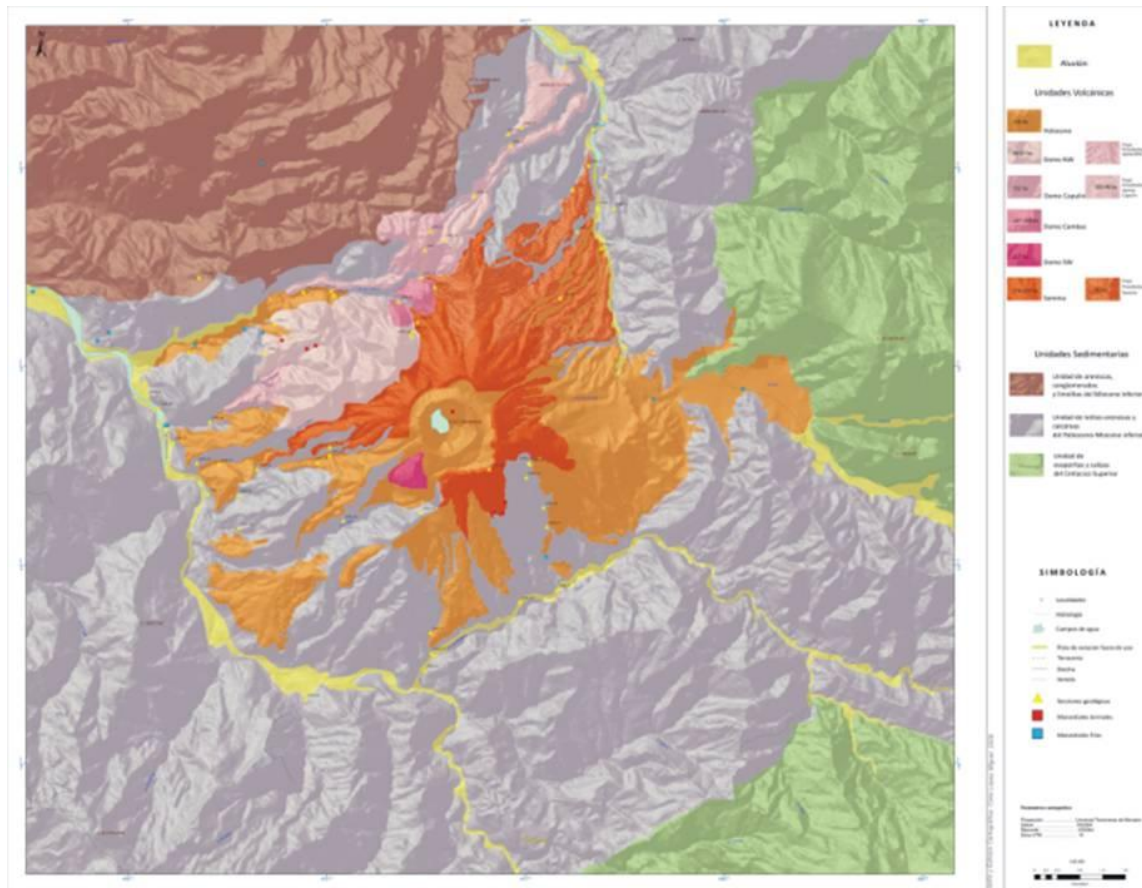
### *Unidad del Holoceno*

La unidad del Holoceno es la más extensa alrededor del volcán Chichonal (Figura 4), debido a que también comprende los depósitos expulsados durante la erupción de 1982. Durante los últimos 8 mil años se han logrado identificar 11 erupciones distintas, que dejaron depósitos piroclásticos diversos (flujos piroclásticos, depósitos de caída de pómez y oleadas piroclásticas), con edades de 7 300, 3 700, 3 100, 2 500, 2 000, 1 900, 1 600, 1 500, 1 250, 900; y 550 años antes del presente (AP). Es común la presencia de flujos piroclásticos de bloques y cenizas de esta unidad, así como flujos piroclásticos de pómez y flujos de ceniza. En general todos los constituyentes (pómez, bloques) tienen una textura porfídica, con fenocristales de plagioclasas, hornblenda y piroxenos, inmersos en una matriz fina de composición traquiandesítica (57-58 % en peso SiO<sub>2</sub>). En la Figura 5 se observa la litología del complejo volcánico del Chichonal.

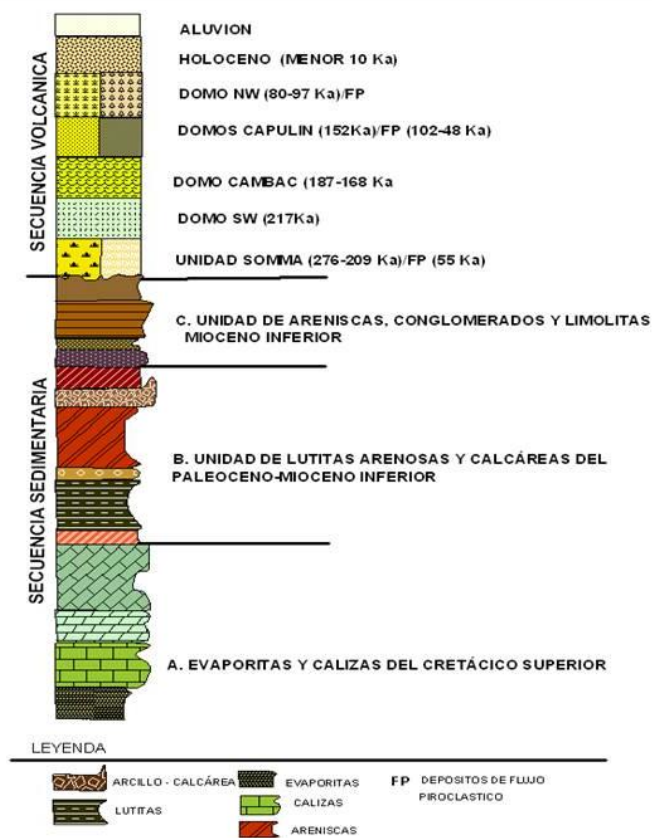
## **Geología Estructural**

El objetivo de este apartado es identificar las estructuras geológicas que guardan un componente rocoso, estas estructuras presentan características geométricas distintivas y rasgos que definen forma, tamaño, límite y orientación. Las estructuras geológicas de acuerdo con su origen y características se dividen en primarias y secundarias.





**Figura 4.** Distribución de las unidades litológicas del complejo volcánico Chichonal.



**Figura 5.** Columna litológica de las unidades del complejo volcánico del Chichonal.

Las estructuras de interés geotérmico son las de tipo secundario, lo que hace necesario identificar las características geométricas de las rocas deformadas causadas por la acción de un sistema de esfuerzos sobre un cuerpo, identificando los tipos de deformación en el campo frágil y dúctil.

Para lograr este objetivo se llevó a cabo una serie de recorridos geológicos a través de los cauces de los arroyos donde la roca se encuentra al descubierto capaz de permitir la toma de datos tales como: rumbo, buzamiento, penetrabilidad, continuidad, búsqueda de elementos cinemáticos como pitch ya sea en planos o en vetas de calcita, este último dato nos permite identificar posibles reactivaciones del fallamiento.

La actividad consistió principalmente en la medición de las estructuras primarias y secundarias, resultado de la deformación dúctil y frágil dando lugar a fracturas y fallas.

Los datos estructurales generados en campo, se vaciaron en el software StereoNet para realizar sus respectivos estereogramas. En ellos se observa la clasificación de Sistemas Estructurales: fallas, fracturas en sistemas.

El software AutoCad 2011 se utilizó para vaciar las estaciones estructurales, fallas y fracturas al plano escala 1:25,000.

En esta etapa se ubicaron 146 Estaciones Estructurales (EE) registradas con GPS, distribuidas en la zona de interés geotérmica (Tabla 1). De los cuales se tomaron 2 350 datos estructurales en los Arroyos Cambac, Agua Salada, Agua Tibia, Susnubac, Agua Caliente, Magdalena y Cráter Lago, (Figura 6).

**Tabla 1.** Resultado de los datos estructurales.

DATOS ESTRUCTURALES	ESTACIÓN ESTRUCTURAL	SISTEMAS ESTRUCTURALES			
		N-S	NE-SW	NW-SE	E-W
	EE	537	529	651	633
<b>TOTAL: 2 350</b>	<b>146</b>	<b>22.85%</b>	<b>22.51%</b>	<b>27.70%</b>	<b>26.93%</b>

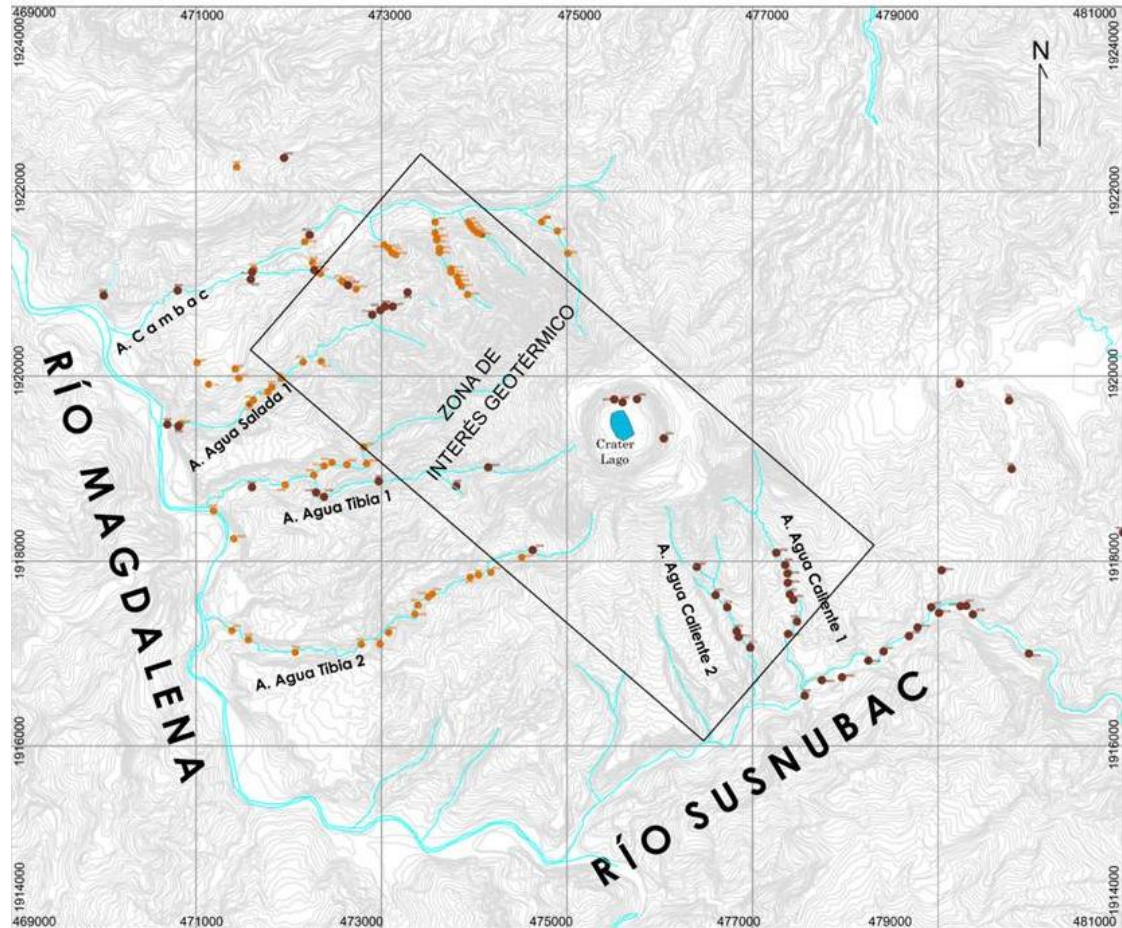
## Localidades visitadas

### 1. Calizas Cretácicas de Chapultenango-Rancho San Juan.

Estas afloran en la porción oriente del Volcán Chichonal sobre el río Mova, a partir del rancho San Juan y hasta el NW de Chapultenango, donde en esta última localidad se tiene el afloramiento tipo. La roca es de color gris claro en roca sana e intemperiza a un color ocre amarillento, es de estructura compacta y textura mudstone. Se presenta en forma estratificada con estratos que varían en espesor de 0.15 a 1 m, se observan vetillas finas de calcita menores a 1 cm de espesor sin dirección preferente. Esta secuencia sedimentaria se encuentra afectada al menos por tres etapas de deformación:

a) *Plegamiento*. Dando como resultado un sinclinal de orientación E-W, donde en su eje el río Mova tiene su cauce. Los flancos del sinclinal presentan la siguiente geometría; en la porción norte la estratificación es E-W con buzamiento de 45 a 60° al sur, y en su flanco sur la estratificación es E-W con buzamiento de 40 a 50° al norte.

b) *Fallamiento* del Sistema San Juan de orientación E-W ( $N74-76^{\circ}W$ ), de carácter tectónico. La traza de esta falla corre a través del río Mova pasando por el rancho San Juan donde esta toma el nombre, se infiere que atraviesa por el aparato volcánico de El Chichón afectando la parte norte del cráter Somma y afloramientos de traquiandesita del arroyo Agua Salada, a demás de horizontes de arenisca del arroyo Cambac, se considera que este sistema tiene una longitud de entre 16 a 18 km y el cual se divide en tres segmentos consecuencia del producto de una deformación heterogénea.



**Figura 6.** Ubicación de las estaciones estructurales en el complejo volcánico del Chichónal.

El primer segmento de la porción este de la traza de la Falla San Juan se localiza al NW de Chapultenango sobre el cauce del río Mova. Consiste de un sistema de fallas capa-capa que se da en estratos de la misma roca. Los elementos cinemáticos nos permiten distinguir al menos dos tipos de movimiento: el primero de componente normal oblicua con pitch de  $43$  a  $80^{\circ}$  al este, la segunda componente y de carácter tectónico se asocia con la estructura denominada Falla San Juan con desplazamiento lateral izquierdo con pitch de  $10$  a  $25^{\circ}$  al este, los anteriores elementos cinemáticos nos permiten definir que la estructura San Juan es reactivada.

Asociado a este sistema se observan que están afectadas por fracturas abiertas donde dicha apertura varía de  $2$  a  $15$  cm y densidad promedio de  $12$  fracturas en un metro lineal. Uno de los fracturamientos es el conjugado con tendencia general N-S con buzamiento de  $65$  a  $83^{\circ}$  tanto al este como al oeste, el segundo sistema de fracturas es el NW-SE, con buzamiento de  $55$  a  $80^{\circ}$  al SW,.

La traza del segundo segmento se ubica en la parte central, está inferida debido a que se enmascara por los flujos piroclásticos de los diferentes eventos del volcán, inicia a partir del rancho San Juan cruzando la parte norte del cráter Somma hasta el arroyo Agua Salada, esta falla se sustenta con la



toma de datos en un afloramiento de lutitas intercalado con areniscas el cual se midieron datos conjugados de fracturas E-W.

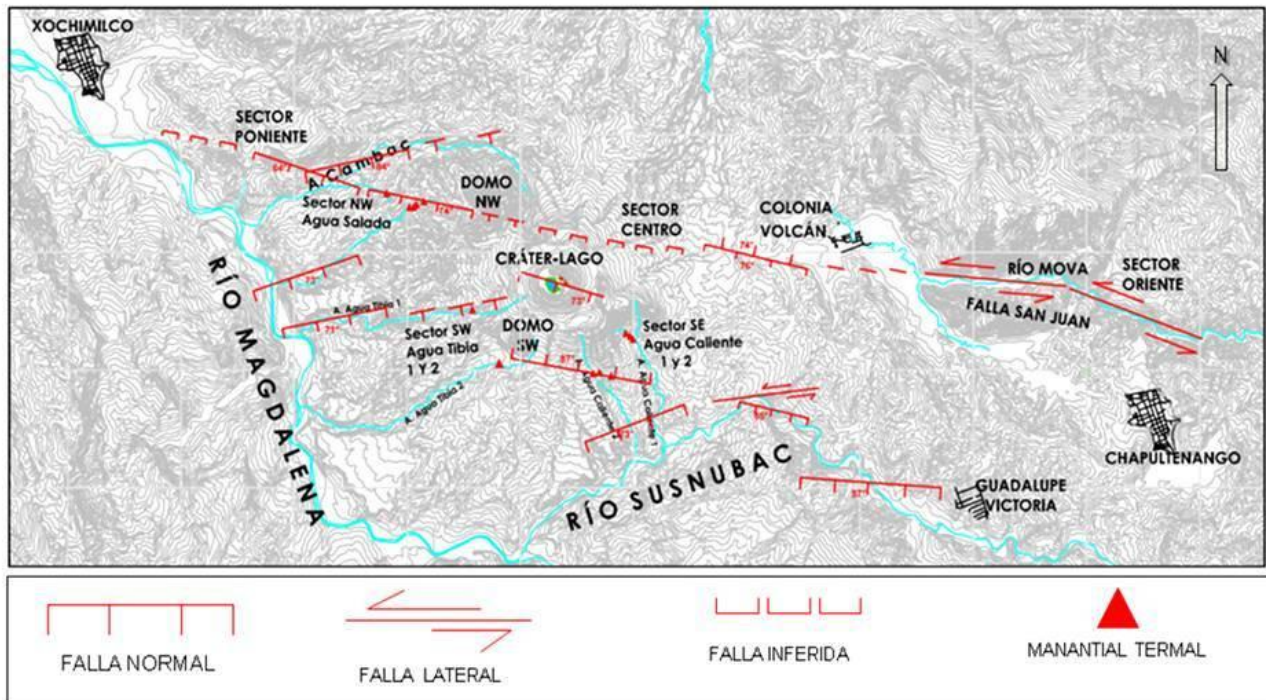


Figura 7. Traza de la Falla San Juan en sectores.

El tercer segmento se localiza en la porción poniente del aparato volcánico y se sustenta con datos medidos en afloramientos de traquiandesitas en las manifestaciones termales del arroyo Agua Salada 1 y El Cochi, en traquiandesitas del Domo NW y estratos de areniscas en una porción del arroyo Cambac, donde se obtuvieron rumbos de fracturas de  $N74-76^{\circ}W$  con buzamiento de  $64-74^{\circ}$  al SW (Figura 7).

## 2. Lutitas intercaladas con areniscas del Terciario

**Localidad área de Guadalupe Victoria:** Al SW y W del poblado de Guadalupe Victoria y siguiendo el cauce aguas abajo del río Susnubac, se continuó con la toma de datos en afloramientos de roca. Los datos estructurales se tomaron en lutitas intercaladas con areniscas.

Los datos de estratificación de esta unidad son de orientación variable no pudiendo establecer a que estructura de plegamiento corresponde.

Las lutitas son de color gris claro en roca sana e intemperiza a un color ocre, se encuentran estratificadas con espesores de 1 a 20 cm, presentan una textura escamosa, presentan fracturas cerradas, en ocasiones estas fracturas se observan rellenas de calcita con espesores que varían de 1 a 5 cm. Estas a su vez presentan elementos cinemáticos de fallamiento capa-capa con rumbo general de  $N40^{\circ}W-60^{\circ}$  al SW y pitch de  $16$  a  $40^{\circ}$  al NW. La estratificación en esta unidad tienen un rumbo general de  $N40-52^{\circ}W$  con buzamientos de  $33$  a  $60^{\circ}$  al SW y su escaque respectivo corresponde a la traza lineal NW-SE del arroyo Susnubac. Se identificaron además sistemas de fracturamiento de rumbo general N-S y resultante de  $N13^{\circ}E-72^{\circ}$  al SE, el sistema NE tienen una resultante de  $N50^{\circ}E-81^{\circ}NW$  y el fracturamiento NW-SE presenta una resultante de  $N40^{\circ}W-80^{\circ}SW$  y el tercer sistema es el de orientación general E-W con resultante de  $N85^{\circ}W$  con  $57^{\circ}$  al sur.

**Localidad arroyo Agua Caliente.** La estratificación de esta secuencia sedimentaria consiste en una alternancia de lutitas con areniscas, los espesores de las areniscas varían de 10 a 50 cm y los estratos de lutita son menores a los 10 cm. La estratificación se midió en los estratos de arenisca ya que al ser una roca competente conserva mayor estabilidad guardando bien definidos sus planos tanto de estratificación como de fractura. La resultante general de estratificación es de N52°E-37° al SW. Se identificó un fracturamiento abierto de 1 a 10 cm con rumbo general al NE, el cual se obtuvo una resultante de N50°E-81° al NW y fracturas secundarias del sistema N-S con buzamiento de 73° al este, otro de los sistemas encontrados es el NW-SE con resultante de N29°W con 74° al NE y N58°W con 69° al SW y fracturas del sistema E-W con rumbo de N85°W con buzamiento de 87° al norte.

**Localidad arroyo Cambac.** Al NW del volcán se recorrió el arroyo Cambac aguas arriba de SW a NE donde se identificaron afloramientos de lutitas intercaladas con areniscas, las primeras son de color gris oscuro con estratos de 1 a 15 cm de espesor, las areniscas son de color gris claro de grano medio a fino con estratos que varían de 15 a 40 cm de espesor. En estos afloramientos se midió la estratificación, obteniendo una resultante general de N85°W con buzamiento de 21° al N. El fracturamiento en general es abierto de 2 a 5 cm y se agrupa en tres sistemas: el primer sistema es de orientación general al NE-SW, donde se obtuvo una resultante de N37°E con buzamiento de 85° al SE, el segundo sistema medido es el de orientación al NW-SE el cual se determinó una resultante de N44°W con buzamiento de 81° al SW, los dos primeros sistemas son de tipo conjugado cuyo análisis nos permite visualizar la presencia de una deformación que afecta a la estratificación. El tercer sistema es el de orientación general N-S con resultante de N17°E con buzamiento de 29° al NW. Asociado a estos sistemas se observaron elementos cinemáticos de falla con componente lateral izquierda en los estratos de arenisca, con rumbo de N37°E y buzamiento de 85° al SE y con pitch de 10° al NE.

**Localidad arroyo Agua Salada.** En esta localidad los datos tomados fueron en dos litologías diferentes: la primera litología se identificó en la margen izquierda aguas arriba del arroyo, el cual consta de lutitas de color amarillento a ocre con estratos menores a 15 cm de espesor, la estratificación tiene un rumbo general de N-S y buzamiento al este. Este paquete sedimentario es afectado por fracturas semi-cerradas y de poca densidad, 4 fracturas en un metro lineal, el primer sistema de fracturas es el de orientación al NE-SW el cual se obtuvo una resultante de N45°E y buzamiento de 62° al SE, el segundo sistema es el de orientación general al E-W con resultante de N74°W y buzamiento de 73° al SW. La segunda litología se observó en margen derecha aguas arriba del arroyo Agua Salada 1 y se trata de lavas de composición traquiandesítica pertenecientes al domo NW, estas son de color rosáceo con fenocristales grandes de plagioclasas y hornblenda. En estos afloramientos se observaron diferentes sistemas de fracturas, con densidad de 10 fracturas en un metro lineal, el primer sistema es de tipo conjugado y consiste de fracturas de orientación al NE-SW con el NW-SE, con resultante de N50°E y buzamiento de 75° al SE, el segundo sistema es NW-SE el cual se obtuvo su resultante de N36°W con buzamiento de 83° al SW, el tercer sistema medido es el de orientación al N-S, el cual se obtuvo una resultante de N15°W con buzamiento de 84° al este y el cuarto sistema es el E-W, dando una resultante de N75°W con buzamiento de 54° al S.

**Localidad de Agua Tibia 1 y 2.** Al SW del aparato volcánico El Chichón se encuentran los arroyos de Agua Tibia 1 y 2, donde afloran lutitas de color gris oscuro con intercalaciones de areniscas de color gris claro, las lutitas tienen estratos con espesores menores a 15 cm y las areniscas estratos de 10 a 20 cm. La estratificación tiene un rumbo general de N-S con buzamiento de 34° al W. Estas rocas se observan fracturadas en dos sistemas de forma ortogonal, el primer sistema es perpendicular a la estratificación y es de orientación E-W con una resultante de N79°E y buzamiento de 71° al SE, el segundo es paralelo al rumbo de la estratificación, donde el sistema es

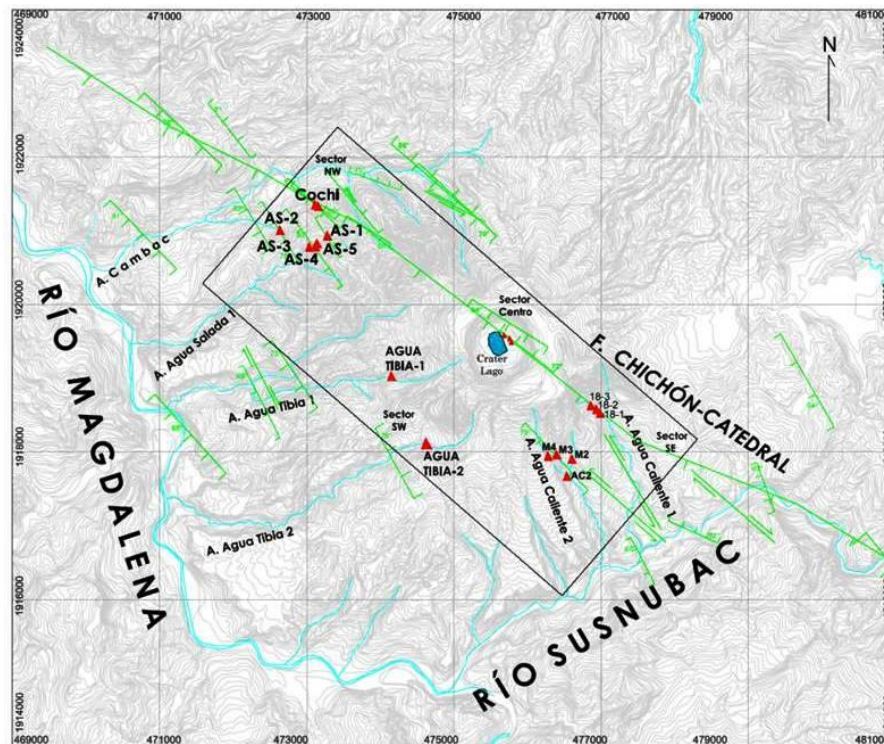
N-S, con resultante de N06°E con buzamiento de 77° al E, todos estos datos se midieron en estratos de lutitas.

**Traquiandesitas del cráter-lago.** Se hizo un recorrido en el interior del cráter-lago con la finalidad de encontrar una asociación sistemática de los sistemas de fracturas internas con las externas. El primer sistema de fracturas es el conjugado de dirección general NW-SE con el NE-SW, teniendo una resultante de N52°W con buzamiento de 72° al NE y N58°W con buzamiento de 64° al SW respectivamente; el segundo sistema es el NE-SW con resultante de N42°E y buzamiento de 76° al NW y N38°E con buzamiento de 83° al NW; el tercer sistema es el de orientación general N-S donde se obtuvo una resultante de N19°W con buzamiento de 56° al SW. En esta zona se midió un elemento cinemático con rumbo de N74°W con buzamiento de 73° al SW y un pitch de 77 y 75°.

**Sistema NW-SE, Chichón-Catedral.** Se le denomina así a un sistema estructural de orientación NW-SE que se detecta a partir del volcán Catedral ubicado a unos 25 km al NW del volcán El Chichón. La geometría de este sistema consiste de un patrón estructural de escalonamiento izquierdo. Para el presente trabajo se identificó un fragmento de 13 km de este sistema, a partir del río Susnubac al oeste de Guadalupe Victoria pasando por el cráter Somma y hasta el arroyo Cambac al NW del volcán el Chichón.

La integración de este segmento lo componen las resultantes de las estaciones estructurales obtenidas a partir del alineamiento NW-SE del arroyo Susnubac, centro del cráter-lago, Somma y en el arroyo Cambac.

Los datos estructurales que confirman este sistema son: N31°W-76°SW, N31°W-82°SW, N36°W-83°SW, N58°W-64°SW, N31°W-80°SW, N43°W-79°SW, N40°W-80°SW, N30°W-64°SW, N44°W-81°SW y N32°W-76°NE, N44°W-65°NE, N38°W-81°NE, N52°W-72°NE, estos datos constituyen sistemáticamente un sistema conjugado en el cual se infiere que la componente sintética es buzante al SW. Este sistema se considera que es la frontera de la conducción y responsable del flujo de fluidos hidrotermales (Figura 8).



**Figura 8.** Sistema Catedral-Chichón, a partir del río Susnubac pasando por el Somma y hasta el arroyo Cambac.



## Sistema Estructural NE-SW

En la zona del complejo volcánico Chichonal existe un sistema de fracturas de orientación preferencial NE-SW, que de acuerdo a los análisis realizados en estudios anteriores se ha deducido que este patrón estructural funge como un límite de la zona termal, ubicado al SE por el río Susnubac y al NW por el Arroyo Cambac. Para este trabajo describiremos el comportamiento y distribución de las fracturas de las estaciones estructurales registradas dentro de la zona de interés geotérmico marcado con el rectángulo de orientación NW-SE.

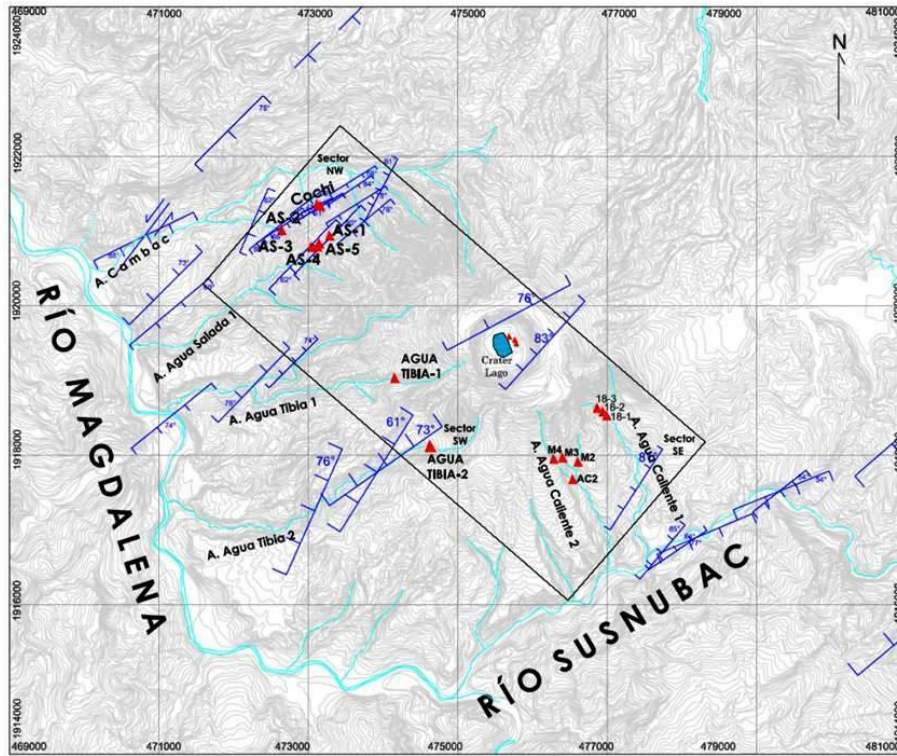
La mayor contundencia encontrada del sistema NE-SW para la zona de interés geotérmico se ubica al NW, en la zona de los manantiales de Agua Salada y El Cochi, ya que en los demás tributarios de los arroyos los registros son menores, incrementándose hacia el cauce del río Susnubac, fuera de la zona de interés.

Para soportar la información, a continuación se da detalle de los datos medidos en las estaciones estructurales (EE).

Para la zona de los manantiales de Agua Salada y El Cochi se obtuvieron las siguientes estaciones estructurales: EE10 con resultante de N58°E/58°SE este fracturamiento se midió en estratos de lutitas color gris oscuro, EE11 con resultante de N56°E/84°SE, los datos de esta estación se midieron en una plancha de arenisca color gris oscuro de grano fino de textura sacaroides, este afloramiento se encuentra con derrumbes debido al intenso fracturamiento, EE15 con resultante de N58°E/78°SE, estas fracturas se observan abiertas con densidad de 7 fracturas en un metro lineal, las fracturas se encuentran rellenas por material arcilloso, donde se midió esta fractura se observó impregnada con sílice, EE20 con resultante de N50°E/76°SE los datos de esta estación se tomaron en un afloramiento inestable de traquiandesitas, EE27 con resultante de N65°E/47°SE estos datos se tomaron justo donde emana el manantial El Cochi, en rocas traquiandesitas porfídicas, se observan 7 fracturas en un metro lineal, EE28 con resultante de N59°E/86°NW con pitch de 60° y 66° al oeste, se observa como zona de derrumbe, EE33 con resultante de N52°E/73°SE estas fracturas se midieron en estratos de areniscas con textura sacaroides de grano fino, son cortadas por el sistema E-W muy cerca al manantial Agua Nueva, EE45 con resultante de N38°E/83°NW, datos medidos en afloramiento de traquiandesitas en los manantiales de Agua Salada, EE46 con resultante de N38°W/82°SE los datos se midieron en traquiandesitas en el Arroyo Agua Salada.

Dentro de la pared interna del Cráter-Lago se registraron las siguientes estaciones: EE67 con resultante de N42°E/83°NW fracturas medidas en traquiandesitas con apertura de 2 a 8 cm, EE70 con resultante de N62°E/76°NW, es un plano con superficies pulidas en rocas traquiandesitas, EE61 con resultante de N45°E/81°NW datos medidos en lutitas finamente estratificadas de 5 a 20 cm, EE43 con resultante de N55°E/73°NW afloramiento de lutitas donde convergen varios sistemas de fracturas sobre el Arroyo de Agua Tibia 1, se observa inestable, las fracturas son abiertas de 1 cm a 4 cm, EE44 con resultante de N32°E/61°NW y pitch de 70° y 71° al NE con reactivación lateral el escalonamiento se inclina al W, en afloramiento de lutitas sobre el cauce del Arroyo Agua Tibia 1.

Para lo que corresponde a la zona de interés geotérmico da una resultante general de fracturamiento en la zona NW donde se localizan los manantiales de Agua Salada y El Cochi de: N54°E/71°SE y para la zona centro y sureste resulta un fracturamiento con orientación general de: N46°E/78°NW, resultando un fracturamiento NE-SW con buzamiento al SE y NW de tipo conjugado (Figura 9).



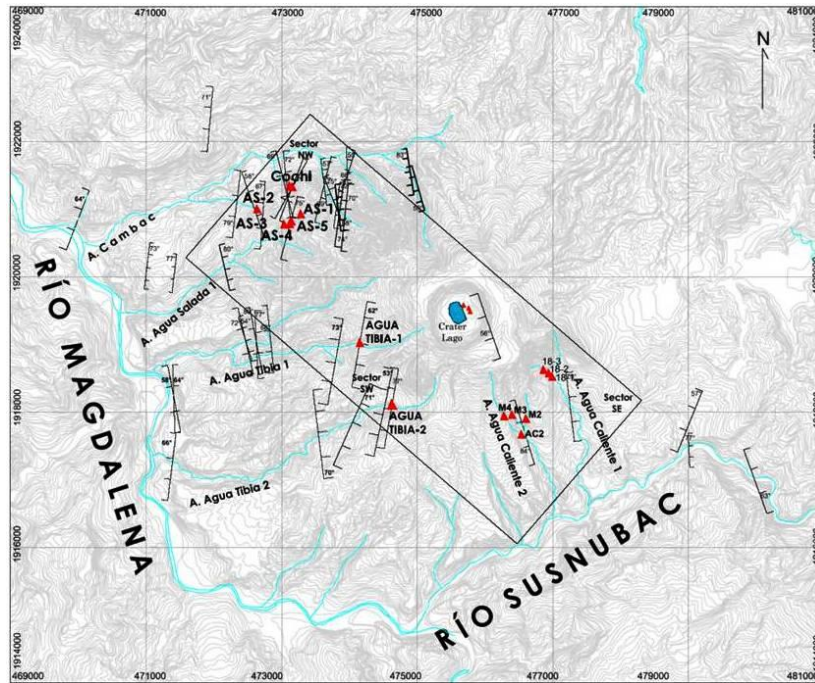
**Figura 9. Geometría del Sistema NE-SW.**

## Sistema Estructural N-S

Este es otro de los sistemas importantes medidos en los diferentes afloramientos tanto de las rocas sedimentarias como de las rocas volcánicas dentro de la zona de interés geotérmico, son las fracturas correspondientes al sistema estructural N-S. A continuación se describen las estaciones estructurales que demuestran la existencia de este sistema estructural.

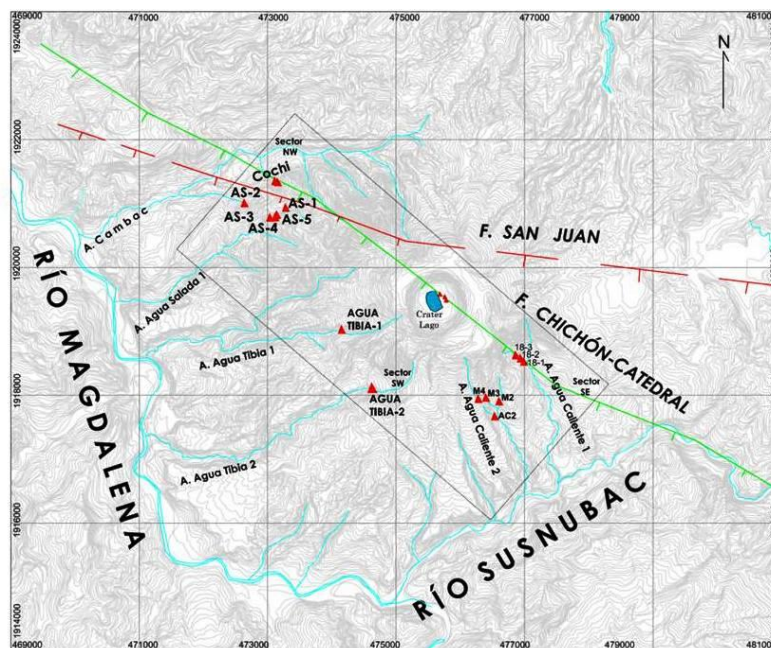
En la zona de los manantiales termales de Agua Salada y El Cochi se registraron las estaciones: EE14 tiene una resultante de N14°E/57°SE, fracturas medidas en traquiandesitas en afloramiento inestable, se observan abiertas sin mucha penetración, estas son cortadas por el sistema E-W; EE15 con resultante de N07°W/69°NE fracturas en traquiandesitas al NW del aparato volcánico, se observan abiertas con densidad de cinco fracturas en un metro lineal; EE21 con resultante general de N08°E/72°SE datos medidos en un plano de traquiandesitas con superficies pulidas, en los planos se observa milonitización; EE22 con resultante general de N07°W/74°NE datos tomados en una plancha de traquiandesitas de 5 m x 10 m con superficies pulidas; EE23 con resultante general de N08°E/68°SE plano de falla con pitch de 40°, 45° y 47° con dirección al SW; EE15 con resultante de N14°W/69°SW con pitch de 56°, 44° y 34° con dirección al SE; EE19 con resultante de N22°W/75°NE, fracturas abiertas de 2 cm a 7 cm, presenta clorita impregnada sobre la pared de las fracturas; EE25 con resultante general de N14°W/69°SW plano de falla en areniscas con pitch 56°, 44° y 34° al SE; EE26 con resultante de N06°W/72°NE en afloramiento de traquiandesitas de textura porfídica cerca del manantial El Cochi; EE28 con resultante de N21°E/72°SE y N29°E/67°NW fractura conjugada en traquiandesitas, fracturas abiertas de 2 cm a 10 cm con densidad de 7 fracturas en un metro lineal; EE31 con resultante general de N19°W/58°E fractura abierta de 1 cm a 4 cm y densidad de 6 fracturas en un metro lineal; EE41 con resultante de N12°E/53°NW fracturas medidas en lutitas sobre el cauce del Arroyo Agua Tibia; EE43 con resultante de N24°E/71°SE fracturas abiertas en lutitas color gris oscuro sobre el cauce del Arroyo Agua Tibia.

Las estaciones estructurales EE74 y EE6 se registraron sobre el cauce del Arroyo Agua Caliente, dando una resultante general de  $N09^{\circ}W/80^{\circ}NE$  y  $N29^{\circ}W/74^{\circ}NE$ , son fracturas conjugadas paralelas al cauce del arroyo. Dentro de la pared del cráter lago se registro la estación estructural EE67 dando una resultante de  $N06^{\circ}W/82^{\circ}SW$ , se observan las fracturas abiertas de 1 cm a 5 cm en traquiandesitas (Figura 10).



**Figura 10.** Geometría del Sistema Estructural N-S.

Este sistema estructural no se observa con una tendencia bien definida, sino que tiene formas conjugadas y aunque es un fracturamiento secundario debido a que en su mayoría es cortado por alguno de los otros sistemas antes descritos, y de poca penetración, resalta señalar que por su vasta densidad en los afloramientos es parte del arreglo estructural-permeabilidad al converger con las fallas principales y formar las denominadas isletas de fracturamiento.

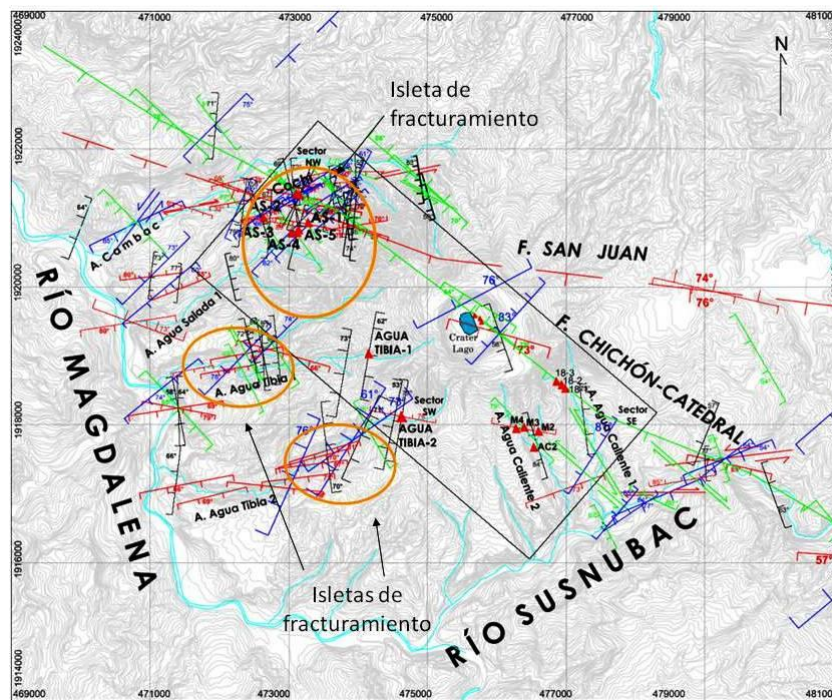


**Figura 11.** Trazo de la Falla San Juan y Falla Chichón-Catedral.



Las trazas de las fallas San Juan y Chichón-Catedral en la zona de interés geotérmico convergen al noroeste de la zona del complejo volcánico en el área de los manantiales de Agua Salada y El Cochi (Figura 11).

La distribución, integración y sobreposición de los Sistemas Estructurales en la zona de interés geotérmico se marca con más frecuencia al noroeste del complejo volcánico, dando a esta zona un interés particular debido al alto fracturamiento, resultando una isleta con un fuerte potencial de permeabilidad en el área de los manantiales Agua Salada y El Cochi (Figura 12).



**Figura 12.** Sobreposición de los sistemas estructurales con isletas de fracturamiento.

Cabe mencionar que las litologías tanto lutitas intercaladas con areniscas, calizas y traquiandesitas se observaron en los cauces de los arroyos Mova, Susnubac, Agua Caliente 1 y 2, Agua Tibia 1 y 2 y Cambac ya que en la parte superior se encuentran sepultados por material piroclásticos de los diferentes eventos del propio volcán, los datos de rumbo y echados se llevaron a cabo con brújula Brunton de cuadrantes de  $0^{\circ}$  a  $90^{\circ}$ .

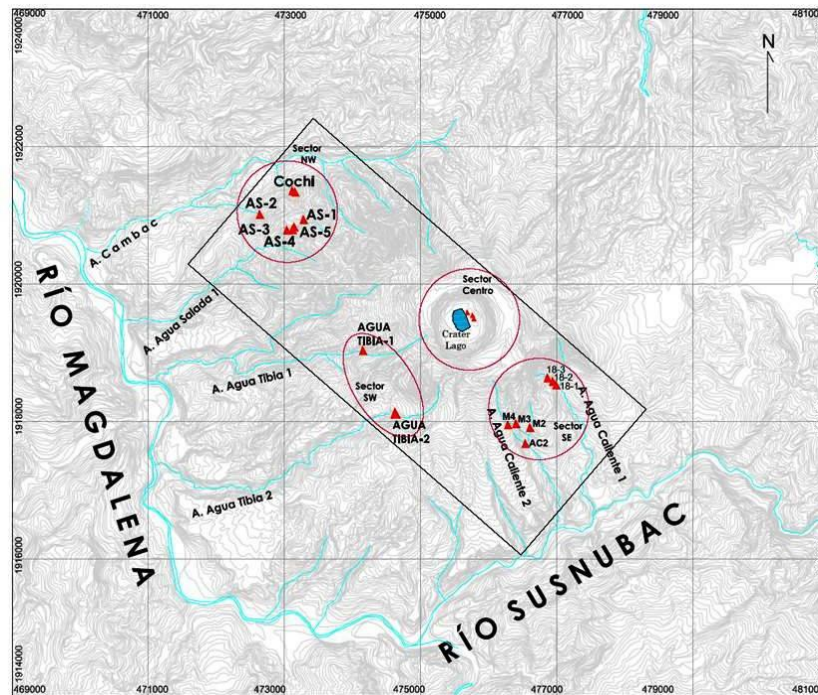
## Termalismo

Uno de los objetivos del trabajo fue actualizar la ubicación de las manifestaciones termales y asociarlas con la litología de donde emanan, identificar el tipo de manifestación, estructuras asociadas que controlan las manifestaciones, zonas de alteración hidrotermal (Tabla 2). Para cumplir este objetivo fue necesaria la contratación de personal local de la zona que conoce de la ubicación de las manifestaciones termales.

El trabajo consistió en censar y muestrear las manantiales termales en fase líquida en los alrededores del complejo volcánico El Chichonal, se ubicaron con GPS, se tomó su temperatura, pH y litología del cual emanan, la ubicación se plasmó en un plano a escala 1:25 000.

Las manifestaciones termales identificadas consisten principalmente de manantiales de agua caliente y fumarolas. La ubicación de estos se distribuyeron en cuatro sectores tomando como

referencia el centro del volcán El Chichón: Sector sureste, Sector suroeste, Sector noroeste y Sector centro del volcán (Figura 13).



**Figura 13.** Ubicación de las manifestaciones termales en cuatro sectores dentro del complejo volcánico el Chichonal.

**Tabla 2.** Manantiales termales del complejo volcánico El Chichonal censados entre junio y noviembre de 2009.

Manantial	Litología	T°C	pH	Observaciones
Manantial-2 (M2)	Contacto entre lutitas y piroclastos	65	7	La muestra de agua se tomó en un tributario del Arroyo Agua Caliente 2.
Manantial-3 (M3)	Contacto entre lutitas y piroclastos	58	7.5	Manantial en el Arroyo de Agua Caliente 1.
Muestra-4 (M4)	Contacto entre lutitas y piroclastos	29	-	La muestra se tomó en el afluente del Arroyo de Agua Caliente 1.
Manantial AS1	Contacto entre traquiandesita y piroclastos	44	5	La muestra se tomó en un manantial en la parte de arriba del arroyo Agua salada 1.
Manantial AS2	Contacto entre lutitas y piroclastos	64	7.5	Manantial en la parte alta del Arroyo Agua Salada 2.
Manantial AS3	Material piroclástico de pómez	50	7	Se tomó en la margen izquierda aguas arriba del Arroyo Agua Salada 1.
Manantial AS4	Contacto entre traquiandesita y piroclastos	60	2.5	La muestra de agua se tomó en la margen derecha aguas arriba del Arroyo Agua Salada 1.
Manantial AS5	Material piroclástico de pómez	72	7	Manantial en la margen derecha del Arroyo Agua Salada 1.
Manantial AT1	Del contacto con arenisca arenosa y material piroclástico.	70	7.5	Manantial en la parte alta del Arroyo Agua Tibia 1.
Manantial AT2	Contacto entre lutitas y piroclastos de pómez.	50	7	La muestra de agua se tomó en la unión de dos manantiales del Arroyo Agua Tibia 2.
Manantial AR	Material piroclástico de pómez	26	3.5	Manantial en la margen derecha del Arroyo Agua Caliente 1.
Manantial 18-1	Contacto entre lutitas y piroclastos de pómez	60	8.5	Manantial en la margen izquierda aguas arriba del Arroyo Agua Caliente 1.

Manantial 18-2	Contacto entre lutitas y piroclastos de pómez	64	6.5	Muestra tomada en la margen izquierda aguas arriba del Arroyo Agua Caliente.
Cauce 18-3	Cauce del Arroyo Agua Caliente	70	8.5	Muestra de agua tomada en la cascada en la parte alta del Arroyo Agua Caliente.
LGOCTER	Se tomó dentro del lago-cráter	22	2	Muestra tomada al este del lago-cráter del volcán.
Manantial Agua Caliente 2	Contacto entre lutitas y piroclastos de pómez	40	8	Manantial en la parte alta de un tributario del Arroyo Agua Caliente 2.
El Cochi	En fractura de traquiandesitas	60		El manantial emana de una fractura de traquiandesitas del Domo NW.

a) *Sector sureste.* Dan lugar al denominado arroyo Agua Caliente 1, los manantiales calientes emanan a partir de la cota 620 a 700 msnm, sus temperaturas varían de 60° a 70 °C y un pH de 6.5 a 8.5, su centro de emanación corresponde al contacto entre las lutitas y los depósitos piroclásticos. Otra localidad más al SSE del volcán es el arroyo Agua Caliente 2 los manantiales censados se ubican en la cota 640 a 700 m.s.n.m., las temperaturas varían de 44° a 65° °C y tienen un pH de 5 a 7, su centro de emanación es el contacto litológico entre lutitas y el material piroclástico.

b) *Sector suroeste:* Hacia el SW del aparato volcánico El Chichón existen los manantiales denominados arroyo Agua Tibia 1 y 2, estos se ubican en el rango de cota de 620 a 660 msnm; las temperaturas medidas son de 50° a 70 °C y tienen un pH de 7 a 7.5. Estos manantiales emanan del contacto entre lutitas intercaladas con areniscas y depósitos piroclásticos.

d) *Sector El Chichón:* El termalismo en este sector se localiza en su porción norte dentro de la estructura del cráter-lago formado en la erupción de 1982. Las manifestaciones termales se ubican en las cotas de 890-900 msnm y consisten de hervideros, fumarolas (*Soap Pools*) y suelos calientes. Se caracterizan por presentar temperaturas que varían de 58 a 96 °C y pH de 4 a 8.

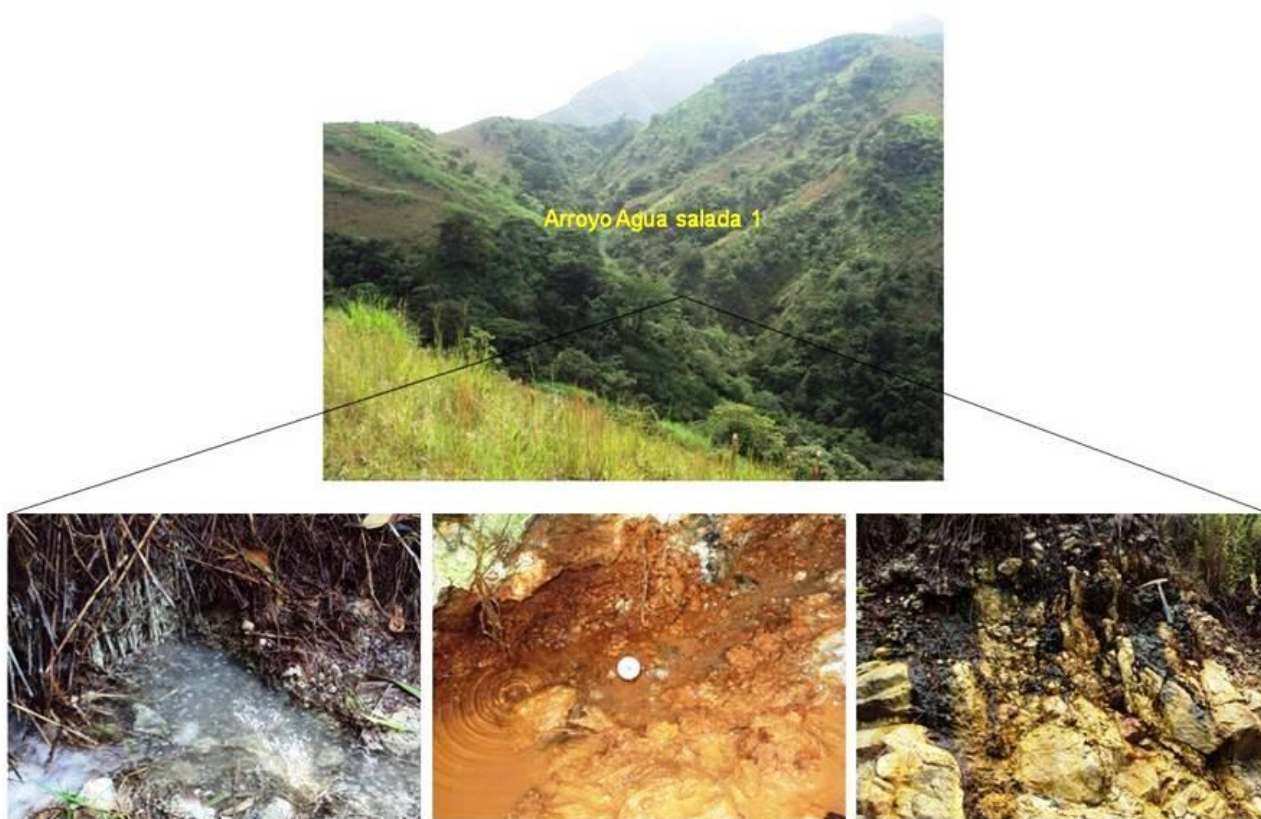


**Fotografía 2.** Cráter-Lago del volcán El Chichón vista al suroeste, donde se muestran las manifestaciones termales.



Las fracturas abiertas de forma irregular dan lugar a la presencia de fumarolas donde es posible identificar la precipitación de azufre nativo y hedor tenue de  $H_2S$  (Fotografía 2). La distribución del termalismo en este sector presenta un alineamiento general NW-SE (Sistema Catedral-Chichón) e inflexión al E-W (Sistema San Juan).

d) *Sector noroeste:* Estos manantiales se ubican a 3,5 km al NW del volcán El Chichón. Los manantiales de este sector se agrupan en dos zonas, los de Agua Salada 1 y Agua Salada 2. Los de Agua Salada 1 emanan en ambas márgenes del arroyo con un alineamiento NE-SW desde la cota 530 a 600 msnm. En la margen derecha aguas arriba del arroyo existen dos manantiales que emanan de los derrames de lava de composición traquiandesítica producto del Domo NW en contacto con material piroclástico, en la margen izquierda aguas arriba del arroyo se ubican dos manantiales termales que emanan del material piroclástico compuesto principalmente de pómez, las temperaturas de estos manantiales varían de 50° a 60 °C con pH de 2.5 a 7.5 (Fotografía 3).



**Fotografía 3.** Manifestaciones termales del arroyo Agua Salada 1 al NW del volcán El Chichón.

El arroyo Agua Salada 2 se ubica a 450 m al NW del arroyo agua Salada 1 y presenta un alineamiento E-W, donde se localizó un manantial termal en la cota 460 m.s.n.m., este emana del contacto litológico entre lutitas con depósitos piroclásticos, presenta una temperatura de 64 °C y pH de 7. Estos manantiales se diferencian de los anteriores por sabor salobre, su baja cota de elevación y por su posición que no se asocian directamente con la presencia del volcán El Chichón, si no que más bien a la presencia del Domo NW.

De acuerdo a las observaciones de campo y análisis de la información se considera que el termalismo activo en el complejo volcánico del Chichonal está limitado por fronteras de orientación NE-SW y NW-SE.

## Conclusiones y recomendaciones

- El Chichonal es un volcán activo compuesto por un cráter de 1.5 por 2 km de diámetro, denominado Somma, el cual contiene al cráter-lago formado durante la erupción de 1982.
- El volcán Chichonal se considera como un sistema magmático hidrotermal activo.
- Localmente el volcán está emplazado en un basamento de rocas sedimentarias que incluyen evaporitas del Jurásico, calizas del Cretácico y areniscas y lutitas del Terciario.
- Desde el punto de vista tectónico, el complejo volcánico del Chichonal está situado dentro de la Provincia de Fallas Laterales Motagua-Polochic.
- Las rocas del basamento están afectadas por fallas orientadas E-W con movimiento lateral izquierdo, como la Falla San Juan, y por fallas normales de rumbo NE-SW con buzamiento al NW.
- Los estilos de deformación en la zona del complejo volcánico corresponden a los tipos dúctil y frágil. La deformación dúctil ha dado lugar a estructuras anticlinales y sinclinales y la frágil a fracturas y fallas.
- Localmente las estructuras que afectan al complejo volcánico del Chichonal son las NW-SE (Sistema Chichón-Catedral) y las E-W (Sistema San Juan).
- Desde el punto de vista estructural se infiere que la actividad hidrotermal está controlada por estructuras de orientación NW-SE y NE-SW.
- Las manifestaciones termales en el exterior del volcán emanan del contacto litológico de la secuencia de lutitas con los productos piroclásticos de origen reciente.
- Las manifestaciones termales en la zona del complejo volcánico del Chichonal consisten de manantiales termales, fumarolas y hervideros distribuidos en cuatro sectores: SE, SW, Central y NW.
- En los sectores SE y SW las cotas de las manifestaciones oscilan entre los 620 y 700 msnm, y en el Central entre 890 y 900 msnm. Están asociadas con la estructura volcánica.
- En el sector NW los manantiales y fumarolas de Agua Salada 1 y 2 tienen las cotas más bajas, de 460 a 600 msnm, y se consideran más relacionadas con el Domo NW que con el volcán.
- La evaluación geoquímica de las manifestaciones termales sugiere la existencia de un sistema geotérmico profundo con temperaturas de 230°C, calculadas por el geotermómetro Na/K, y de hasta 260°C con el geotermómetro de gases H<sub>2</sub>/Ar.
- Las características termales en el área de estudio indican la existencia de una fuente de calor de alta temperatura susceptible de aprovecharse para generar energía eléctrica a través del vapor endógeno.

- De la evaluación estructural y ubicación del termalismo puede definirse una zona de mayor interés geotérmico.

## Recomendaciones

- Realizar estudios geofísicos de alta resolución magnética y resistiva que permitan visualizar con mayor detalle las propiedades físicas y la geometría de la litología del subsuelo, además de la posible configuración del conducto volcánico.
- Monitorear la actividad sísmica que permita distinguir fenómenos de origen hidrotermal de los de origen tectónico.

## Bibliografía

Armienta, M.A., De la Cruz-Reyna, S., Macías, J.L., 2000. Chemical characteristics of the crater lakes of Popocatepetl, El Chichon, and Nevado de Toluca volcanoes, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 97, 105-125.

Canul, R.F., Razo, A.M., Rocha, V.L., 1983. Geología e historia volcanológica del volcán Chichonal, Estado de Chiapas. *Memorias de la VI Convención Geológica Nacional, Sociedad Geológica Mexicana*. México, DF., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, pp. 3-22.

Canul, R.F., y Rocha, V.L., 1981. Informe geológico de la zona geotérmica de El Chichonal, Chiapas, México. Comisión Federal de Electricidad, Informe 32-81, 38 p. Inédito.

Capaccioni, B., Tarán, Y., Tassi, F., Vaselli, O., Mangani, F., y Macías, J.L., 2004. Source conditions and degradation processes of light hydrocarbons in volcanic gases: an example from El Chichón volcano, Chiapas, State of Mexico. *Chemical Geology*, 206, 81-96.

Capaul, W.A., 1987. Volcanoes of the Chiapas Volcanic Belt, Mexico. Houghton, U.S.A, Michigan Technological University, Tesis de maestría, 93 p. Inédito.

Carfantan, J.Ch., 1981. Evolución estructural del sureste de México. Paleogeografía e historia tectónica de las zonas internas mesozoicas. *Revista del Instituto de Geología*, 5: 207-216.

Carey, S.N., and Sigurdsson, H., 1986. The 1982 eruptions of El Chichón volcano-Mexico (2): Observations and numerical modeling of tephra fall distribution. *Bulletin of Volcanology*, 48, 127-141.

Espíndola, J.M., Macías, J.L., Tilling, R.I., and Sheridan, M.F., 2000. Eruptive history of El Chichón volcano (Chiapas, Mexico) and its impact on human activity. *Bulletin of Volcanology*, 62, 90-104.

García-Palomo, A., Macías, J.L., and Espíndola, J.M., 2004. Strike-slip faults and K-Alkaline volcanism at El Chichón volcano, southeastern Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 136, 247-268.

Giggenbach, W.F., 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, 2749-2765.