

Estudio vulcanológico y estructural de la secuencia estratigráfica Mil Cumbres y del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Héctor Pérez Esquivias¹, José Luis Macías Vázquez², Víctor Hugo Garduño Monroy³, José Luis Arce Saldaña⁴, Felipe García Tenorio², Renato Castro Govea², Paul Layer⁵, Ricardo Saucedo Girón², Carlos Martínez², Adrián Jiménez Haro², Gabriel Valdés², Lorenzo Meriggi² y Ramón Hernández²

¹CFE, Residencia de Los Azufres, correo: hector.perez03@cfe.gob.mx, ²Instituto de Geofísica, UNAM, ³Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, ⁴Instituto de Geología, UNAM, ⁵Universidad de Fairbanks, Alaska.

Resumen

El propósito de este estudio fue actualizar y detallar el conocimiento geológico de superficie y del subsuelo de Los Azufres para realizar propuestas de localización de nuevos pozos geotérmicos y solucionar diversos problemas que puedan presentarse en el campo. El estudio cubrió una superficie de 984 km². Se identificaron tres tendencias principales de fracturamiento: NNO-SSE, NE-SO y E-O. El primer tipo de fracturamiento corresponde a una deformación del Mioceno con geometría semi-vertical que afectó al basamento, mientras los otros dos se formaron con el Cinturón Volcánico Mexicano, tienen geometría semi-vertical y sub-horizontal, y afectaron regionalmente a rocas miocénicas del basamento y a rocas cuaternarias que afloran en el campo geotérmico. Las fallas más importantes para la localización de nuevos pozos resultaron ser Marítaro y Agua Fría, de dirección E-O. Mediante estudios vulcanológicos, diversos estudios de laboratorio y correlaciones del subsuelo y superficie se reconstruyó la secuencia lito-estratigráfica de la zona identificando al menos 64 tipos de aparatos volcánicos y los límites de sus respectivos depósitos, así como seis secuencias volcánicas principales de la región. Los estudios vulcanológicos no aportan argumentos para sostener la existencia de una caldera volcánica de gran dimensión como se había manejado años atrás, sino más bien definen a Los Azufres como un campo volcánico complejo. El producto final fue un mapa vulcanológico estructural digital geo-referenciado, elaborado en ArcGis 9.2, que ofrece muchas ventajas respecto a los antiguos mapas, y un modelo conceptual actualizado y bases de datos con información confiable.

Palabras clave: Los Azufres, geología estructural, vulcanología, modelo conceptual, estratigrafía volcánica.

Structural and volcanologic study on the stratigraphic sequence at Mil Cumbres and the Los Azufres geothermal field, Mich.

Abstract

The purpose of this study is first to increase knowledge of the surface and underground geology of Los Azufres geothermal field and then to propose locations for new geothermal wells, thus solving several field problems. The study area covers 984 km². Three main fractures trends NNW-SSE, NE-SW, and E-W were identified. The first trend corresponds to a Miocene deformation with semi-vertical geometry affecting the basement. The two other trends were formed as part of the Mexican Volcanic Belt and present semi-vertical and sub-horizontal geometry in regionally affected Miocene basement rocks and Quaternary rocks outcropping in the geothermal field. The main faults used to locate new wells are the Marítaro and Agua Fría, trending E-W. By means of volcanic and laboratory studies, and surface and underground correlations, the litho-stratigraphic sequence of the zone was reconstructed and at least 64 types of volcanic structures were identified, including the limits of the deposits. The volcanic study does not show any large volcanic caldera, as once suggested, but shows Los Azufres to be a complex volcanic field. The final study product is a

digitized volcanic-structural and geo-referenced map, prepared with ArcGis 9.2. It includes an updated conceptual model and databases with reliable information.

Keywords: Los Azufres, structural geology, volcanology, conceptual model, volcanic stratigraphy.

1. Antecedentes

Los primeros estudios de la región de Los Azufres fueron dedicados al mapeo regional y descripciones petrográficas de las rocas (Demant *et al.*, 1975). A fines de los setenta la Comisión Federal de Electricidad (CFE) realizó los primeros estudios geológicos de la zona geotérmica (Camacho, 1979; Camacho y Palacios, 1979; Garfias y González, 1978) seguidos de un estudio geocronológico (Aumento y Gutiérrez Negrín, 1980). Los trabajos de Demant (1976) y Silva-Mora (1979), marcaron un claro parteaguas en el conocimiento de la vulcanología de la zona, pues dividen el vulcanismo del estado de Michoacán en dos grandes provincias: al poniente reconocen el vulcanismo monogenético de la Meseta Purépecha, y al oriente un vulcanismo ligado a complejos de domos riolíticos y dacíticos, incluyendo a Los Azufres.

Durante las actividades de exploración del campo geotérmico de Los Azufres, De la Cruz *et al.* (1982), realizaron un estudio estructural en el que identifican tres tipos de fallas: estructuras NNE-SSO y NNO-SSE, afectando a rocas del Mioceno, un sistema muy penetrativo de dirección E-O que juega un papel importante en el campo geotérmico, y fallas N-S como las más jóvenes.

El primer estudio de la estratigrafía volcánica de la región lo realizaron en 1985 Dobson y Mahood, quienes denominaron el área como Centro Volcánico Los Azufres (CVLA), y proponen que este centro de composición silícica empezó su actividad hace aproximadamente 1 Ma, resumida en tres secuencias eruptivas que denominaron riocitas Agua Fría (1.03-0.84 Ma), dacitas San Andrés (0.33 Ma) y riolitas La Yerbabuena (0.30-0.15 Ma). También describieron depósitos ignimbríticos cuya composición química era más evolucionada que las rocas de Los Azufres por lo que los asociaron con la formación del centro volcánico y por ende descartaron la presencia de una caldera. Describieron que Los Azufres era afectado por dos sistemas de fallas, el más antiguo con dirección N-S, cortado por un sistema más joven con orientación E-O y que formaba un graben en el Lago de Cuitzeo. Finalmente proponen que Los Azufres se encuentra emplazado sobre una secuencia espesa de 2700 m de andesitas, cortada en el Pozo Az-20 y fechada en 10.2 Ma (Garfias y Casarrubias, 1979).

Ese mismo año, Pradal y Robin (1985) propusieron alternativamente que Los Azufres era en realidad una caldera resurgente de edad Pleistoceno Medio con un diámetro de 18 x 20 km. Posteriormente, Garduño-Monroy (1987) identificó estructuras NO-SE y NNO-SSE ligadas con la tectónica de Cuencas y Sierras, con componentes laterales más importantes, estructuras NE-SO ligadas con el surgimiento del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), el vulcanismo monogenético de Michoacán y la apertura de las cuencas lacustres y estructuras normales E-O pertenecientes al sistema de fallas Morelia-Acambay. También correlacionó las rocas del basamento de la zona con la ayuda de mediciones en las zonas aledañas al campo geotérmico de Los Azufres. Los resultados de este trabajo indican que la región ha sufrido dos eventos de deformación que incluyen compresión con pliegues NE-SW y NW-SE durante el Cretácico superior, seguido de otra fase de compresión durante el Mioceno, para posteriormente ser afectada por un evento de tensión correspondiente al sistema de Sierras y Cuencas.

Para 1991 Pasquaré y colaboradores concluyeron que los sistemas estructurales NE-SO y E-O han tenido una gran importancia en la fragmentación de la placa de Norteamérica. Ese año López-Hernández (1991) realizó un análisis estructural basado en información obtenida en campo, definió a las fallas Agua Fría y Marítaro como estructuras principales en el campo geotérmico, así como una clara dirección de fracturamiento E-O presente en todo el campo geotérmico. Dividió al campo en tres sectores de acuerdo a las características de

fracturamiento y permeabilidad. Por su parte, Ferrari *et al.* (1991) realizaron un estudio geológico estructural de la región en donde describen cinco extensos depósitos de ignimbritas, cuatro de los cuales fueron asociados a Los Azufres, y determinaron la presencia de una caldera de 20 x 15 km originada durante el Mioceno Tardío y reactivada durante el Plioceno. Con ello se originó una controversia sobre el tiempo de formación de la caldera y su origen (Robin y Pradal, 1993; Ferrari *et al.*, 1993). Más adelante estudios morfo-estructurales en el sistema de fallas Morelia-Acambay definieron evidencias claras de actividad tectónica reciente.

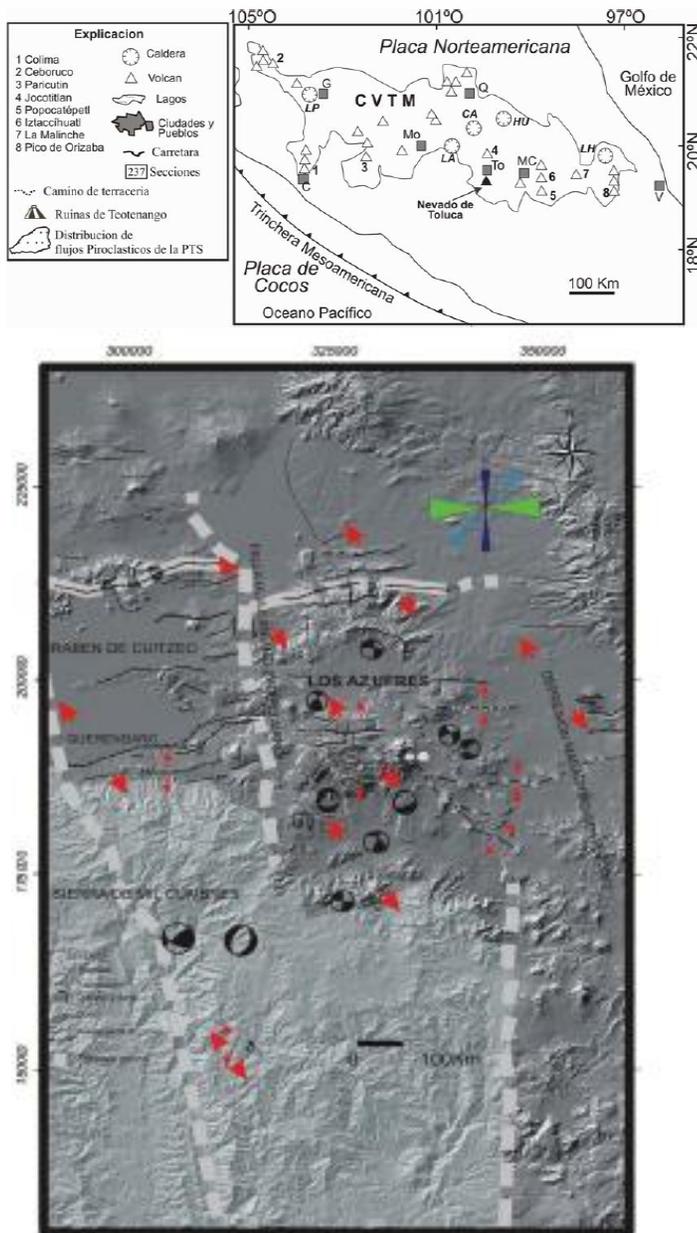


Fig. 1. Ubicación de la zona de estudio (Pradal y Robin, 1985; Ferrari *et al.*, 1991; Campos Enríquez *et al.*, 2005).

En resumen, el análisis de la información existente destaca la importancia del fracturamiento NE-SO y E-O en el campo geotérmico y el potencial de estas estructuras para generar sismos y probables fracturas abiertas. En relación al fracturamiento del campo y las estructuras asociadas con la permeabilidad primaria y secundaria, es claro que por su actividad tectónica y volcánica y por la explotación geotérmica, el fracturamiento es adecuado para el transporte de los fluidos geotérmicos y se mantiene abierto.

2. Introducción y ubicación del área de estudio

Los Azufres ha sido objeto de numerosos estudios, algunos con fines de investigación y otros realizados por CFE para la exploración y desarrollo geotérmico. Conforme se avanza en estas labores se hace necesario un mejor conocimiento del yacimiento geotérmico, ya que debido a la explotación y declinación de los pozos se van restringiendo los espacios para localizar nuevos pozos sin afectar zonas contiguas en producción o inyección. Por tal motivo se requiere de un conocimiento cada vez más preciso y actualizado de la geología del campo que finalmente determina la estructura y forma que tiene el yacimiento geotérmico en explotación. El presente trabajo se realizó con esta finalidad dividiéndose en tres temas, cada uno con objetivos específicos:

- ✓ **Geología estructural:** se realizó con la finalidad de analizar el fracturamiento y fallamiento de las rocas, a diferentes escalas, que potencialmente pueden alojar el yacimiento geotérmico.
- ✓ **Estudio Vulcanológico:** el objetivo fue elaborar un mapa base que integrara la información cartográfica, estratigráfica y geocronológica obtenida de rocas en superficie y del subsuelo, definiendo la evolución del vulcanismo de la zona con el tiempo y su correlación con unidades cortadas en pozos. Esto sería la base para actualizar el modelo geológico conceptual.

✓ **Estudios de laboratorio:** clasificación petrográfica y química de las diferentes unidades encontradas, su caracterización y la definición de sus parámetros mineralógicos y químicos de correlación. Entre los objetivos estaba definir la cronología de los diferentes eventos volcánicos y tectónicos de superficie y subsuelo, con base en fechamientos por los métodos ^{40}Ar - ^{39}Ar y ^{14}C , así como realizar análisis granulométricos para determinar los componentes, tamaño predominante y mecanismos de depósito de flujos piroclásticos, para establecer su origen y correlación con los de otros lugares.

El Campo Volcánico Los Azufres (CVLA) es un alto topográfico a 3000 m sobre el nivel del mar (msnm), ubicado en la parte noreste del Estado de Michoacán, cerca de los límites con el Estado de Guanajuato y a 90 km de la ciudad de Morelia. Se encuentra en la parte central del CVM (Fig. 1, parte superior). Uno de los rasgos más peculiares de todo el CVM, y más acentuado en su parte central, es la presencia de fallas recientes y activas con dirección E-O, aunque en Los Azufres también ocurren fallas en direcciones NE-SO y NO-SE. La zona de estudio comprende un cuadrante de 34×28 km, con un área total de 984.4 km^2 (Fig. 1, parte inferior).

3. Geología estructural

El estudio consistió de cuatro etapas: levantamiento cartográfico, levantamiento estructural de fallas y fracturas, análisis y manejo de los datos e interpretación de los resultados con la ayuda de software especializado. Los levantamientos de campo fueron seleccionados de acuerdo a una discusión previa del grupo de trabajo. La elección de los sitios se basó en la importancia del fracturamiento, estructura principal, papel del fracturamiento en el yacimiento geotérmico y edad relativa de las rocas. Se encontraron diferencias importantes en lo referente a estructuras volcánicas y unidades litológicas con respecto a estudios previos, ya que cada uno de los polígonos se levantó en campo verificándose cada uno de sus contactos. Todo el levantamiento se realizó con la filosofía de que el fracturamiento tiene un comportamiento fractal y que por lo tanto aquél que se levante a una escala métrica (meso-estructura) tiene una clara representación en todo el yacimiento geotérmico de Los Azufres.

Los objetivos principales del estudio estructural fueron: analizar el fracturamiento de las rocas a diferentes escalas y las fallas de aquellas donde se encuentra alojado el yacimiento geotérmico y las de la zona de Los Azufres. Las primeras están expuestas en las Sierras de Santa Inés y Mil Cumbres. Los resultados de las mediciones estructurales en estos sitios muestran un intenso fracturamiento y fallamiento con tres tendencias principales: NNO-SSE, NE-SO y E-O.

Las estructuras de dirección NNO-SSE están relacionadas con la deformación ocurrida entre el Oligoceno (33.7-23.8 Ma) y Mioceno (23.8-5 Ma) y a través de sus rasgos estructurales fueron identificadas como fallas laterales provocadas por deformación del basamento. Cabe señalar que estas sólo se observan a nivel regional, como ocurre con la falla Tzitzio-Valle de Santiago. Además, con el campo de esfuerzo actual estas estructuras se desplazan en forma de fallas laterales derechas normales, que desplazan y controlan a la cuenca lacustre de Cuitzeo.

Las estructuras con orientación NE-SO y E-O fueron originadas durante la formación del CVM. En particular, las estructuras con dirección NE-SO son poco visibles en el campo de Los Azufres, y se caracterizan por presentar planos de falla casi verticales, aunque existen algunos con inclinaciones cercanas a los 45° . Las fallas con tendencia E-O son las más abundantes y de mayor importancia, ya que afectan a todas las unidades litológicas y secuencias lacustres de edad holocénica (<0.01 Ma) e histórica en el campo de Los Azufres, y porque sobre ellas se encuentra la mayor parte de la alteración hidrotermal del campo. Ejemplos claros de estas estructuras son las fallas de Marítaro y de Agua Fría, ambas con evidencias morfológicas o paleo-sismológicas de actividad sísmica actual.

El fracturamiento de rocas andesíticas, riolíticas e ignimbríticas miocénicas tiene una geometría semi-vertical, y es de suma importancia para el campo porque a través de esta característica geométrica se propone más adelante un modelo estructural conceptual del yacimiento geotérmico, en el que el fracturamiento y fallamiento estarían representados de la siguiente manera:

a) En las riolitas Agua Fría, el fracturamiento tiene planos sub-horizontales que no son representativos del yacimiento sino mas bien responden a procesos de relajamiento de la carga litostática debidos a su intrusión y a la actividad minera.

b) El fracturamiento en rocas andesíticas almacenadoras del yacimiento geotérmico es intenso, de acuerdo con las densidades obtenidas, y de tipo semi-vertical; los escasos planos sub-horizontales obedecen a diaclasamiento por enfriamiento de las lavas. Por otro lado, la intersección de planos de fracturas se debe considerar como un elemento planar importante en la movilidad de los fluidos geotérmicos y sobre todo en lo referente a recarga del yacimiento.

c) Las fallas Agua Fría y Marítaro generaron un fracturamiento importante y pueden ser objetivos en la localización de nuevos pozos. No es el caso de las otras estructuras, que son menores, en donde más bien se debe buscar el fracturamiento general del yacimiento como objetivo de los pozos. Muchas de las fallas, por su cartografía, son menores y poco profundas.

d) El fallamiento originado por la deformación actual es semi-vertical ($80-90^\circ$) en las lavas riolíticas principalmente, mientras que en las andesitas y basaltos es de unos 70° a 80° , y se vuelve menos inclinado a medida que se profundiza.

Como resultado del estudio se elaboró un mapa estructural regional de la zona en Arc Gis 9.2, que cuenta con una base de datos para cargar la foto del afloramiento, coordenadas, rosa de fracturamiento, estereograma, diagrama de polos y una hoja con las mediciones efectuadas de cada estación realizada en este estudio (Fig. 2).

4. Resultados del estudio vulcanológico

Mediante la interpretación fotogeológica, el levantamiento de 168 secciones estratigráficas, el mapeo vulcanológico del área, la correlación estratigráfica de unidades cartografiables y diferentes tipos de análisis de laboratorio, se definió la evolución vulcanológica del área de estudio, identificando seis secuencias volcánicas principales, cada una compuesta por dos o más unidades volcánicas. Estas unidades volcánicas son, de mayor a menor edad estratigráfica: Sierra de Mil Cumbres, Ignimbrita Pucuateo, Sierra de Santa Inés e Ignimbrita Santa Inés, Sierra de El Fraile, Campo Volcánico Los Azufres y Basaltos-Andesitas del Campo Volcánico Michoacán Guanajuato (CVMG), perteneciente a la parte oeste del CVM (Fig. 3). De

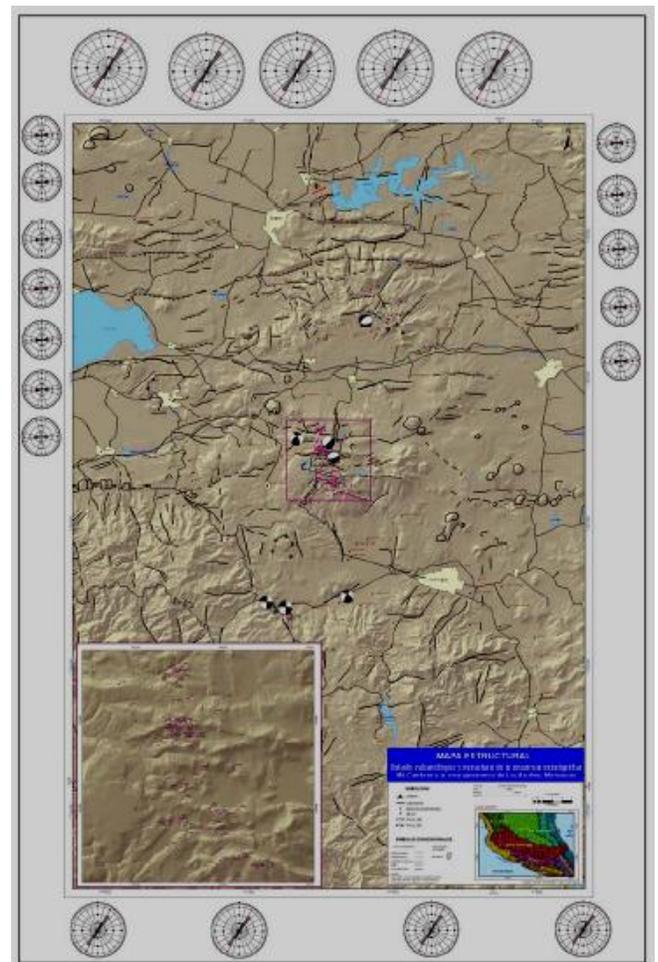
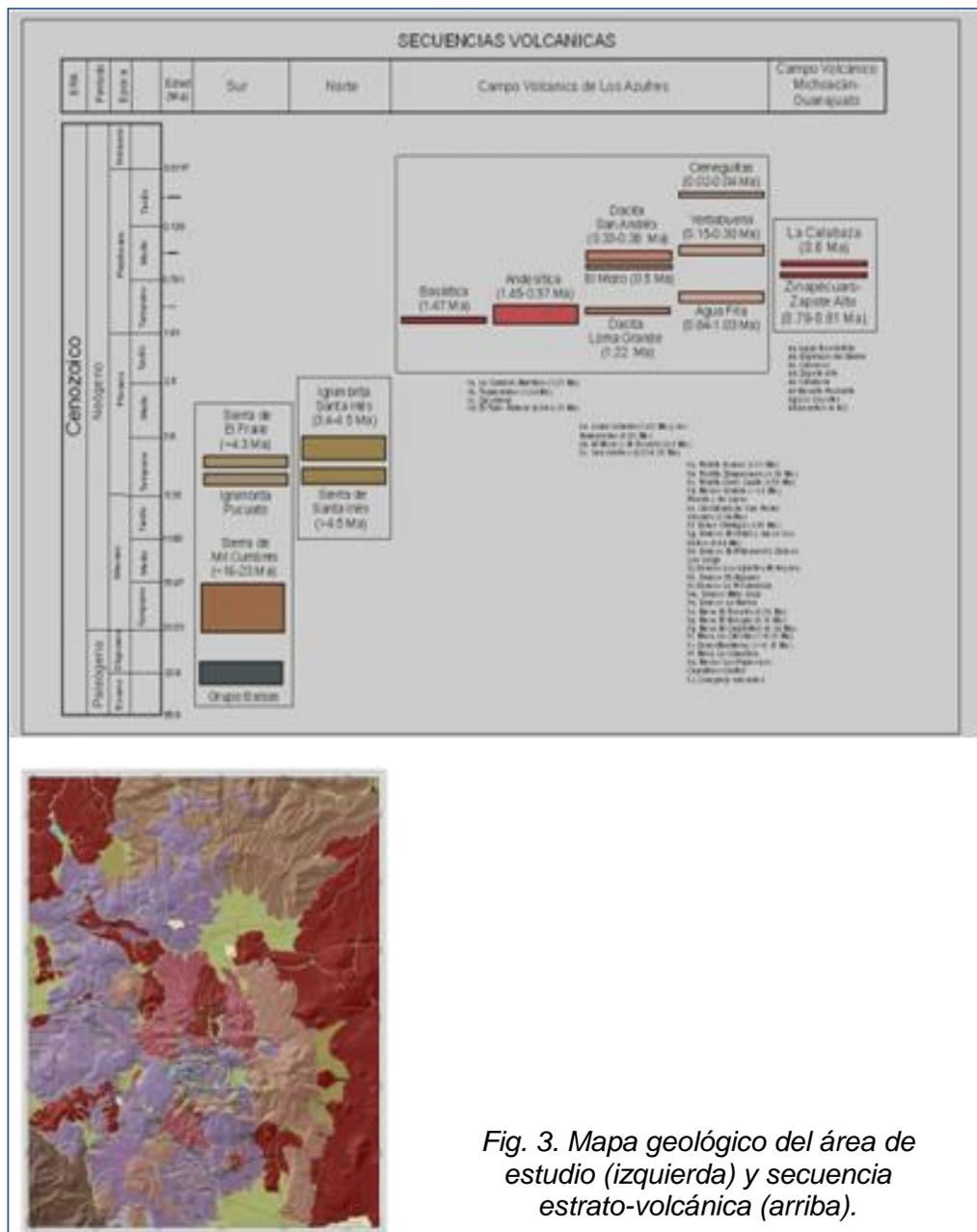


Fig. 2. Mapa estructural regional del CVLA.

estas seis secuencias volcánicas, sólo cuatro convergen en el área de estudio y cada una tiene una historia geológica diferente.



La actividad volcánica empezó a partir el Mioceno temprano hace por lo menos unos 23 Ma, con el emplazamiento de una secuencia compleja de espesas ignimbritas soldadas, brechas, piroclastos de caída y oleadas piroclásticas y derrames de lava (Secuencia de Mil Cumbres), en la porción centro y sur del área de estudio. Las nuevas edades de roca obtenidas en este trabajo sugieren que esta actividad volcánica continuó hasta fines del Mioceno Temprano (17 Ma). Por el momento se desconoce si este vulcanismo estuvo ligado a centros eruptivos o actividad fisural así como la proveniencia de los materiales. Al parecer se trata de una zona volcánica probablemente asociada al vulcanismo de la Sierra Madre Occidental o a inicios del vulcanismo del CVM (Ferrari *et al.*, 1999). Estructuralmente, las rocas de la Sierra de Mil

Cumbres fueron cortadas por la Falla Huajúbaro-Zinapécuaro de dirección NO-SE (según estudio estructural) y desplazadas a mayor profundidad, por lo que aparecen entre 700 y 1000 m de profundidad en los pozos de Los Azufres.

Después de un periodo de unos 2.5 Ma de posible calma volcánica (que bien podría tratarse de escasa resolución en la estratigrafía disponible en este momento), la actividad continuó hace ~14.5 Ma con la formación de un estratovolcán en la parte norte del área de estudio que originó la Secuencia de Santa Inés. En la actualidad esta secuencia en la Sierra de Santa Inés tiene una forma arqueada abierta hacia el sur que parece indicar que el volcán fue destruido por una erupción de gran magnitud asociada a la formación de una caldera. Ferrari *et al.* (1991) propusieron que esta caldera se había formado hace 4.5 Ma con el emplazamiento de la Ignimbrita de Santa Inés. Sin embargo, la nueva edad obtenida para la secuencia Santa

Inés, de 14.5 Ma, y para la ignimbrita del mismo nombre, de sólo 4.7 Ma, indican claramente que no tienen una genética común. El único depósito que podría estar asociado a la formación de esta caldera es la Ignimbrita de Pucuate (de 14.47 Ma) (Fig. 3), que está expuesta al sur del área de estudio, pero en este trabajo no se cuenta con mayor información para realizar una correlación más precisa.

Después de la formación de la estructura arqueada en la Sierra de Santa Inés, hubo un hiatus de la actividad volcánica que duró varios millones de años. La actividad continuó hace ~7 Ma mediante la efusión de lavas andesíticas expuestas sobre la Secuencia de Mil Cumbres al SO del área de estudio. Se desconoce si esta efusión lávica está asociada a la reactivación de la actividad volcánica de Mil Cumbres o si se debe a alguna actividad puntual en el área. Posteriormente, se nota un retorno de la actividad volcánica en la región, mediante el emplazamiento explosivo de la Ignimbrita de Santa Inés hace ~4.7 Ma, la cual rellena depresiones en la Sierra de Santa Inés, al norte del área de estudio. Más adelante, hace ~4.3 Ma ocurrió el emplazamiento de dacitas y flujos piroclásticos que formaron los domos de la Sierra El Fraile al SE del área de estudio.

La formación del Campo Volcánico Los Azufres comenzó hace aproximadamente 1.47 Ma. El magmatismo no estuvo centrado en un lugar único que hubiera dado lugar a la formación de un estratovolcán, sino más bien estuvo supeditado al ascenso de magma a través de fallas corticales que atraviesan el área, dando lugar a la emisión fisural de lavas de manera aleatoria. De esta forma el magmatismo empezó con emisiones basálticas como las del norte de San Pedro Jacuaro y Rincón de Rubios, que son la base del cerro Chinapo. Continúo con la emisión de lavas andesíticas, como las de La Cumbre, Marítaro, y Tejamaniles, que formaron aparatos como El Zacatonal, El Tule y El Palmar; el rango de edades de estos aparatos y lavas va de 1.47 a 0.97 Ma. Continuaron lavas dacíticas que formaron domos como Loma Grande, Las Humaredas, El Mozo y San Andrés, con edades de 1.22 hasta 0.33 Ma. Finalmente ocurrió una evolución a emisiones riolíticas que originaron domos como los de Agua Fría, Chinapo y Cieneguillas, y mesas como La Yerbabuena, entre muchos otros, con edades que van de 1.03 a 0.02 Ma (Fig. 3). Los productos asociados a este vulcanismo riolítico (domos y mesas) descansan invariablemente sobre lavas de composición andesítica o andesítico-basáltica, pertenecientes a aparatos que corresponden al vulcanismo monogenético del Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato el cual es la parte oeste del CVM. Estos volcanes ocurren en la periferia del área de estudio; en su gran mayoría son conos cineríticos compuestos por derrames de lava alternados con depósitos de caída de escoria y bombas volcánicas, como los volcanes Agua Escondida, El Nopalito, Espinazo del Diablo y Carrasco, entre otros, con edades que varían de 0.81 a 0.6 Ma y que se formaron previamente a los domos y mesas. De acuerdo a las observaciones de campo, y con base en las edades radiométricas disponibles, las mesas más jóvenes son las de El Bosque y El Carpintero, cuyos productos piroclásticos (flujos) rellenan depresiones.

Finalmente, debe mencionarse que la actividad del CVLA no ha terminado, ya que han ocurrido erupciones riolíticas durante el Pleistoceno Tardío, como las del Complejo Volcánico Guangoche, los domos del área de Acámbaro y en el Volcán San Andrés. Además, junto con la actividad volcánica hay fallas regionales activas que cortan al complejo. Muchos de los domos tienen un control estructural muy marcado por fallas E-O, como la de Agua Fría que ha originado el colapso hacia el sur (dirección de máxima extensión del campo de esfuerzos regional) del Domo El Chinapo, el Volcán San Andrés y el Cerro Guangoche. Adicionalmente, tanto lavas de composición dacítica como domos y aparatos volcánicos monogenéticos han sido emitidos a partir de fallas regionales E-O (y en otras direcciones como NO-SE) (Fig. 3).

El resultado de esta parte del estudio fue el mapa vulcanológico y geológico elaborado en ArcGis 9.2, que presenta mucho más detalle que todos los mapas anteriores a pesar de ser muy regional. Mediante links se pueden consultar los datos de cada afloramiento incluido en este estudio, tales como coordenadas, descripción y columna estratigráfica.

5. Resultados de los estudios de laboratorio

Se realizaron cuatro diferentes tipos de estudios de laboratorio:

- ✓ Estudios petrográficos.
- ✓ Análisis químicos de roca total.
- ✓ Fechamientos radiométricos por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y ^{14}C .
- ✓ Estudios granulométricos.

Los resultados de los estudios de laboratorio fueron muy útiles para alcanzar los objetivos.

Petrográficamente se documentó una variación litológica diferenciada desde basalto hasta riolita en las muestras de los pozos. Las rocas predominantes son andesitas de clinopiroxeno, seguidas de andesitas basálticas y en menor abundancia se encuentran basaltos, dacitas y riolitas. Pudieron identificarse muchas interrupciones en el vulcanismo, de tal manera que aunque las andesitas son las rocas ígneas más abundantes, no llegan a formar unidades individuales de varios centenares de metros de espesor. Más bien son muchas unidades de composiciones semejantes, producto del tipo (monogenético) y composición del vulcanismo en el área, que fueron producidas por una gran cantidad de erupciones y aparatos volcánicos diferentes. Se identificaron también depósitos de tipo lacustre y palustre, flujos piroclásticos, depósitos de caída y avalanchas.

Desde el punto de vista geoquímico, el espectro analizado varió de andesita basáltica a riolita, con tres rocas de carácter alcalino. Estos datos se ubicaron en los diagramas de clasificación química SiO_2 contra $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, tanto para las rocas que afloran en superficie (Fig. 4) como para las rocas subterráneas colectadas de los pozos (Fig. 5). Estas últimas incluyeron basaltos traquiandesíticos.

Los fechamientos por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ y ^{14}C arrojaron dos grupos de edades principalmente: uno del Mioceno (17-23 Ma), correspondiente a la Sierra Mil Cumbres y a rocas profundas del campo de Los Azufres, y otro del Cuaternario (<1.47 Ma) para todo el vulcanismo del CVLA (Tabla 1). Sólo se obtuvieron dos edades superficiales del Plioceno en la Sierra del Fraile (4.3 Ma) y en la Ignimbrita de Santa Inés (4.5 a 3.4 Ma).

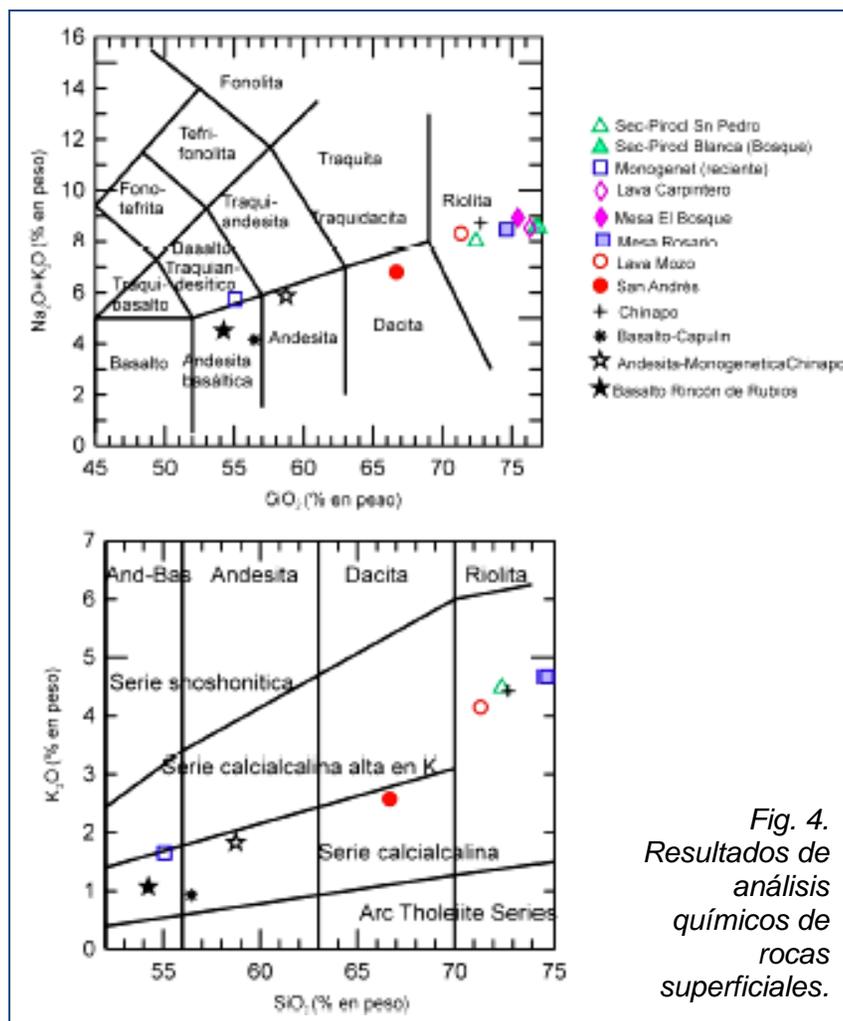


Fig. 4. Resultados de análisis químicos de rocas superficiales.

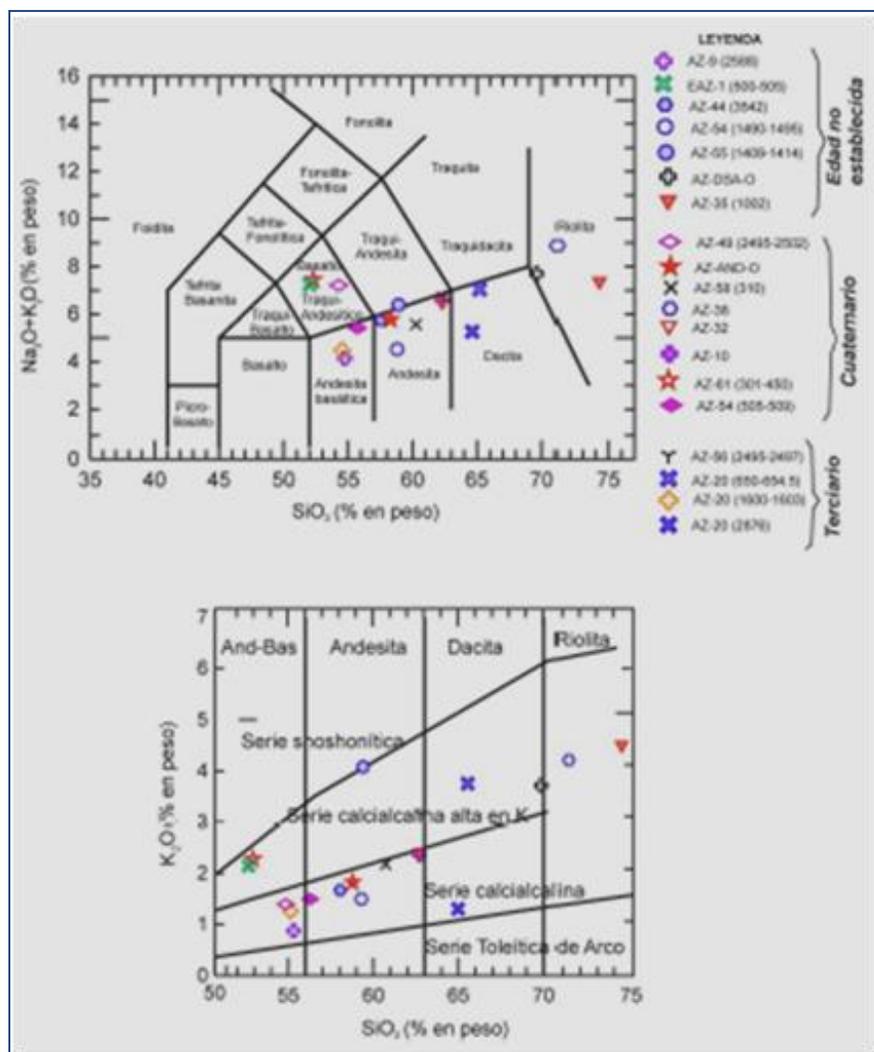


Fig. 5. Resultados de análisis químicos en rocas subterráneas de los pozos de Los Azufres.

subsuelo consistente en una gran cantidad de unidades de andesita y andesita basáltica, principalmente, con cantidades menores de riolitas, dacitas y basaltos. No hay mayores diferencias de composición entre las rocas terciarias y las cuaternarias. El yacimiento geotérmico parece encontrarse por debajo de las rocas del Cuaternario (<1.47 Ma), mismas que actúan como sello. La evolución química de los magmas, con excepción de los que originaron los basaltos traquiandesíticos, parece haber ocurrido de manera predominante por procesos de cristalización fraccionada, pues las fases minerales de estas rocas se correlacionan con las tendencias observadas en los diagramas binarios de elementos mayores. La mayoría de estas rocas corresponden con el vulcanismo del CVM en el área.

6. Modelo estratigráfico-estructural

Finalmente, con la información proporcionada por los estudios de geología estructural, vulcanológico y de laboratorio, se realizó la interpretación de la estratigrafía de superficie y del subsuelo de la zona de estudio. Tomando en cuenta el tipo de vulcanismo (monogénico) y la extensión que pueden tener sus productos, se formó un modelo estratigráfico estructural idealizado basado en la interpretación de correlaciones efectuadas entre las diferentes unidades encontradas que esquematiza el comportamiento de las fallas principales (Marítaro y Agua Fría), y de las secundarias como Laguna Verde, La Cumbre, El Chino, Laguna Larga, San Alejo, Puenteillas, Tejamaniles, El Vampiro y El Viejón. Además, el modelo toma en cuenta los datos

En la Tabla 1 se presenta un condensado de los resultados de los fechamientos realizados por el método $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en rocas colectadas en el CVLA. Se reporta el resultado geocronométrico más satisfactorio para cada una de las muestras, con una incertidumbre de ± 1 sigma. Las edades de “cero” corresponden a muestras que sufrieron pérdidas importantes de argón por fenómenos naturales, por lo cual no son confiables. Las edades rejuvenecidas también perdieron argón, pero el dato reportado puede considerarse como una edad mínima, aunque estos valores deben tomarse con cautela. En general el método de fechamiento fue por roca total, aunque en algunas muestras se fecharon minerales específicos.

Por su parte, los estudios granulométricos ayudaron a correlacionar diferentes flujos piroclásticos encontrados en la región, y a definir su distribución en el mapa y su origen.

Los resultados de los estudios petrográficos y geocronométricos permiten delinear una estratigrafía del

superficiales (de cartografía volcánica y criterios vulcanológicos) para delinear aparatos volcánicos, derrames de lava, domos y conos monogenéticos. Este modelo se ilustra mediante la Figura 6 que incluye un plano regional con una columna litoestratigráfica compuesta, y dos secciones, A-A' y B-B', de dirección aproximada N-S.

Secuencia	Muestra	Edad de meseta (Ma)
<i>Mioceno</i>		
Mil Cumbres (lava)	AZ-20-2876	>23.1 ± 3.5 (Edad mínima; rejuvenecida)
Mil Cumbres (lava)	AZ-20-1600	19.62 ± 0.27
Mil Cumbres (lava)	AZ-20-650	>18.3 ± 0.8 (Edad mínima; rejuvenecida)
Mil Cumbres (ignimbrita)	AZV-0801	17.6 ± 0.2
Mil Cumbres (lava)	AZ-56-2495	16.83 ± 0.28
Santa Inés (lava)	AZV-0804	14.5 ± 0.2
Mil Cumbres (lava)	AZV-0802	7.0 ± 0.1
<i>Plioceno</i>		
Santa Inés (ignimbrita)	AZV-0803	4.7 ± 0.1
<i>Cuaternario</i>		
Andesítica	AZ-61-330	1.57 ± 0.06
Basáltica	AZ-54-505	1.47 ± 0.06
Tejamaniles	AZ-10-0	1.24 ± 0.05
Andesítica	AZ-32-0	1.23 ± 0.05
Dacítica	AZ-38-0 (samidino)	1.21 ± 0.04
Andesítica	AZ-EAZ1-500	1.16 ± 0.04
Riolítica	AZ-EAZ1-300	1.05 ± 0.06 (rejuvenecida)
Andesítica	AZ-58-310	0.97 ± 0.25
Andesítica	AZ-AND-0	0.69 ± 0.03
Andesítica	AZ-49-2495	0.41 ± 0.50 (edad no válida)
San Andrés	AZ-DAC-0	0.38 ± 0.06
Riolítica	AZ-23-1000	0.32 ± 0.03
Andesítica	AZ-55-1409	0.24 ± 0.04 (Cero)
Andesítica	AZ-54-1490	0.20 ± 0.08 (Cero)
Andesítica	AZ-44-3542	0.09 ± 0.13 (Cero)
Dacítica	AZ-35-1002	0.04 ± 0.04 (Cero)
Andesítica	AZ-58-972	0.02 ± 0.04 (Cero)
Basáltica	AZ-09-2588	Cero

Tabla 1. Resultados de fechamientos por $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ en rocas del campo de Los Azufres.

vertical en todas las unidades litológicas del campo, con rangos que van de 70° a 90°, siendo más constante en las secuencias volcánicas del Mioceno-Plioceno de Mil Cumbres y de la Sierra de Santa Inés.

c) El fracturamiento más intenso se localiza en la Sierra de Santa Inés y le sigue el de la Sierra de Mil Cumbres, considerándose que ambas secuencias andesíticas son las rocas huésped del yacimiento geotérmico en el subsuelo de Los Azufres. En el campo geotérmico, el fracturamiento es más intenso en las fallas mayores, que son Marítaro y Agua Fría.

d) El fracturamiento y fallamiento que se observa en las riolitas de El Chino, El Gallo, Agua Fría y El Chinapo, no es representativo de las estructuras del yacimiento geotérmico en el subsuelo, el cual se aloja en unidades más antiguas (Mioceno-Plioceno) que han registrado más eventos de deformación. Por lo tanto, no es conveniente localizar futuros pozos que busquen atravesar esas estructuras a profundidad.

e) Los análisis petrográficos, químicos y granulométricos, en conjunto con los estudios geocronométricos y los trabajos de campo, han permitido un mayor detalle en la estratigrafía de los pozos analizados, y una mejor comprensión de la estructura del subsuelo, tomando en cuenta el tipo de vulcanismo (predominantemente monogenético) del área.

El modelo fue concebido con base en la correlación de los pozos a lo largo de los perfiles A-A' y B-B' y en el conocimiento del tipo de vulcanismo en el área. La presencia de rocas pliocénicas se infiere con base en una edad pliocénica obtenida en superficie, pero el límite inferior del Plioceno se ha fusionado con el límite superior del Mioceno.

7. Conclusiones y recomendaciones

a) Las direcciones del fracturamiento medido a nivel de meso-estructuras responden claramente al fracturamiento regional, observándose las mismas estructuras con tendencias NNO-SSE ó N-S, NE-SO y E-W, que corresponden con los principales sistemas de fallas y fracturas observados.

b) Las inclinaciones de las fracturas tienen un comportamiento semi-

vertical en todas las unidades litológicas del campo, con rangos que van de 70° a 90°, siendo más constante en las secuencias volcánicas del Mioceno-Plioceno de Mil Cumbres y de la Sierra de Santa Inés.

c) El fracturamiento más intenso se localiza en la Sierra de Santa Inés y le sigue el de la Sierra de Mil Cumbres, considerándose que ambas secuencias andesíticas son las rocas huésped del yacimiento geotérmico en el subsuelo de Los Azufres. En el campo geotérmico, el fracturamiento es más intenso en las fallas mayores, que son Marítaro y Agua Fría.

d) El fracturamiento y fallamiento que se observa en las riolitas de El Chino, El Gallo, Agua Fría y El Chinapo, no es representativo de las estructuras del yacimiento geotérmico en el subsuelo, el cual se aloja en unidades más antiguas (Mioceno-Plioceno) que han registrado más eventos de deformación. Por lo tanto, no es conveniente localizar futuros pozos que busquen atravesar esas estructuras a profundidad.

e) Los análisis petrográficos, químicos y granulométricos, en conjunto con los estudios geocronométricos y los trabajos de campo, han permitido un mayor detalle en la estratigrafía de los pozos analizados, y una mejor comprensión de la estructura del subsuelo, tomando en cuenta el tipo de vulcanismo (predominantemente monogenético) del área.

f) Por primera vez las secuencias litológicas cuaternarias han quedado relativamente bien definidas en el subsuelo, aunque no el contacto entre el Plioceno y el Mioceno del cual sólo se obtuvo una idea aproximada.

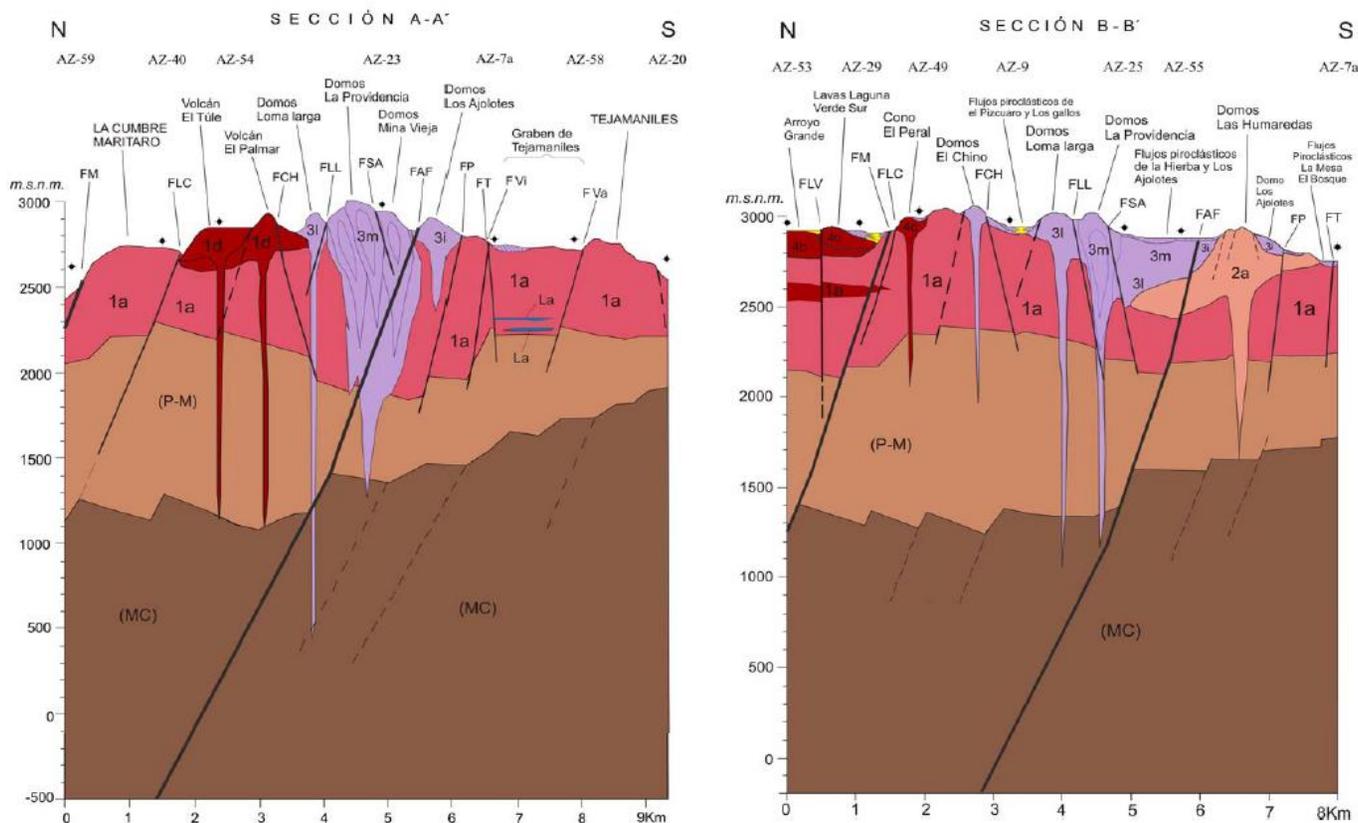
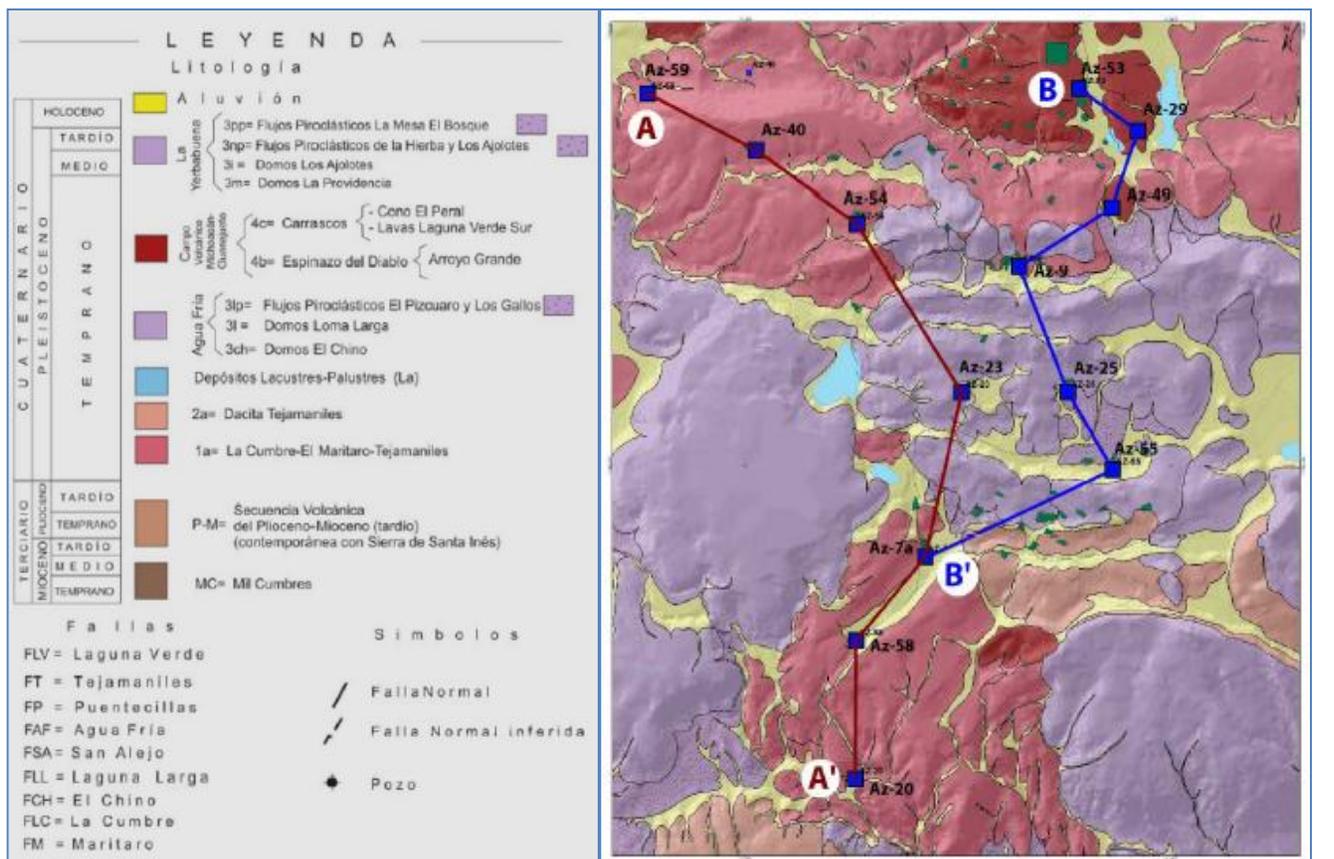


Fig. 6. Modelo litoestratigráfico, vulcanológico y estructural idealizado del Campo Volcánico de Los Azufres.

Las rocas cuaternarias alcanzan profundidades cercanas a los 500 m. Las rocas miocénicas comienzan a profundidades que varían desde unos 700 m en el sur, hasta cerca de 1200 m hacia el norte, debido a un fallamiento escalonado. Los resultados actuales parecen indicar que el yacimiento geotérmico se encuentra sellado por las rocas volcánicas cuaternarias.

g) Con base en lo anterior, se concluye que puede haber al menos dos zonas del yacimiento a profundidades diferentes. La primera puede variar entre 500 y 700 m, aproximadamente, y se atribuye al cambio litológico entre unidades del Cuaternario (1.47 Ma) y las rocas andesíticas del Plioceno (4.7 Ma). La segunda zona se debe al cambio litológico entre las rocas pliocénicas (4.7 Ma) y las miocénicas de la Sierra Mil Cumbres (23 a 17 Ma). Y aun podría existir una tercera zona del yacimiento, entre la discordancia o hiatus encontrado en rocas miocénicas con edades entre 17 y 14.5 Ma, pero como su límite no fue identificado con precisión ni se definió su continuidad en la región, no se puede identificar.

h) Es recomendable continuar estudiando el subsuelo de Los Azufres en la misma forma en que se realizó en este estudio, buscando en otros pozos muestras en las que se pueda encontrar la posible continuidad de la secuencia y/o definir mejor el hiatus y los probables límites del yacimiento geotérmico. Ello llevaría a obtener mejores resultados en la localización de futuros pozos productores e inyectores.

i) También se recomienda continuar actualizando los mapas en ArcGis, agregando nuevos datos estructurales y geológicos y la información que se vaya recopilando de nuevas zonas de estudio en el campo.

Referencias

- Aumento, F., y L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 1980. Geocronología de Los Azufres, Michoacán. Reporte interno de la CFE, No. 3-80, 66 p. Inédito.
- Camacho, F., 1979. Geología de la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán. Reporte interno de la CFE, s/n, 18 p. Inédito.
- Camacho, F., y M. Palacios N., 1979. Geología de la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán. Reporte Interno de la CFE No. 6-79, 42 p. Inédito.
- Campos-Enríquez, J.O., F. Domínguez-Méndez, M. Lozada-Zumaeta, H.F. Morales-Rodríguez and J.A. Andaverde-Arredondo, 2005. Application of the Gauss theorem to the study of silicic calderas: The calderas of La Primavera, Los Azufres, and Los Humeros (México). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 147, pp. 39-67.
- De la Cruz, V., J. Aguilar, D. Ortega, y J.M. Sandoval, 1982. Estudio geológico estructural a detalle del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. Reporte interno de la CFE No. 9-82, 41 pp. Inédito.
- Demant, A., R. Mauvois, y L. Silva-Mora, 1975. *Estudio geológico de las hojas Morelia y Maravatío (1/100,000), Estado de Michoacán*. Universidad Nacional Autónoma de México, 40 p.
- Demant, A., 1976. Características del Eje Neovolcánico Transmexicano y sus problemas de interpretación. *Revista del Instituto de Geología, UNAM*, Vol. 2, No. 2, pp. 172-187.
- Dobson, P., and G.A. Mahood, 1985. Volcanic stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 25, pp. 273-287.

- Ferrari, L., V.H. Garduño, G. Pasquaré, and A. Tibaldi, 1991. Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relationships with regional tectonics. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 47, pp. 129-148.
- Ferrari, L., V.H. Garduño, G. Pasquaré, and A. Tibaldi, 1993. The Los Azufres caldera, Mexico: the results of multiple nested collapses (Reply to a comment by Robin and Pradal). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 56, pp. 345-349.
- Ferrari, L., M. López-Martínez, G. Aguirre-Díaz, and G. Carrasco-Nuñez, 1999. Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central Mexico: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt. *Geology*, No. 27, pp. 303-306.
- Garduño-Monroy, V.H., 1987. Estudio geológico regional para conocer las características de las rocas del basamento relativo del campo geotérmico de los Azufres. Reporte interno de la CFE No. 20-87, 73 p. Inédito.
- Garfias, A., y A. González, 1978. Resultados de las exploraciones en la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán, México. Reporte interno de la CFE s/n, 42 p. Inédito.
- Garfias, A., y Z. Casarrubias, 1979. Resumen geológico del pozo Azufres No. 5. Reporte interno de la CFE s/n, 15 p. Inédito.
- López-Hernández, A., 1991. Análisis estructural del campo de Los Azufres, Mich. Interpretación de datos estructurales y del subsuelo. Informe interno de CFE No. 11-91, 137 p. Inédito.
- Pradal, E., et C. Robin, 1985. Découverte d'une caldera majeure associée au champ géothermique de Los Azufres (Mexique). *C.R. Acad. Sci. Paris*, 132 (Sér. II), pp. 135-142.
- Pasquaré, G., L. Ferrari, V.H. Garduño, A. Tibaldi, and L. Vezzoli, 1991. Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, States of Guanajuato and Michoacán. *Geological Society of America Map and Chart Series*, MCH072, 22 p.
- Robin, C., and E. Pradal, 1993. The Los Azufres caldera, Mexico—Comment on the paper by Ferrari et al., — An attempt to understand the volcanic structure—. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, No. 56, pp. 339-344.
- Silva-Mora, L., 1979. Contribution a la connaissance de l'Axe volcanique Transmexican: étude géologique et pétrologie des lavas du Michoacán oriental: Thèse du Troisième Cycle, Univ. de Aix-Marseille III, France, 146 p. Inédito.