

APUNTE GEOLÓGICO Y REVISIÓN HISTÓRICA DE LA ZONA GEOTÉRMICA DE PATHÉ, HIDALGO

Carles Canet^{1,2}, Sara I. Franco², Lucero Morelos-Rodríguez³, Abdorahman Rajabi⁴, Fernando Núñez-Useche³

Recibido: 5 de marzo, 2021; aceptado: 4 de abril, 2021; publicado en línea: 1 de julio, 2021.

RESUMEN

La zona geotérmica de Pathé, en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana, ha atraído la atención de exploradores y científicos desde finales del siglo XVIII. El ingeniero de minas alemán Joseph Burkart (1798-1870), contemporáneo de Alexander von Humboldt (1769-1859), elaboró en 1836 una descripción geológica de campo por la cual esta zona geotérmica puede considerarse la primera en México en haber sido investigada bajo los paradigmas de la ciencia moderna. A inicios del siglo XX la zona fue estudiada por el ingeniero José Guadalupe Aguilera Serrano (1857-1941), quien en 1907 describió las rocas eruptivas y sus productos de alteración. Su interés eran los yacimientos de caolín de Yexthó, situados a un km de las manifestaciones termales. A mediados del siglo XX la zona ya se prospectaba como fuente de energía geotérmica, lo que culminó en la primera planta geotermoelectrica del continente americano, en operación entre 1959 y 1972 con una capacidad instalada de 3.5 MW.

Las manifestaciones termales de Pathé se ubican en la intersección de dos sistemas regionales de fallas normales, con rumbos N-S y E-W, y están encajonadas en una unidad volcánica (toba y lava) de composición básica a intermedia y edad Mioceno superior. Las alteraciones hidrotermales superficiales son conspicuas y su distribución está igualmente controlada por fallas pertenecientes a ambos sistemas. Asociada a las fallas N-S ocurre la asociación de alteración calcita-yeso, que involucra fluidos oxidados y alcalinos ricos en sulfato. Por otro lado, ligados a las fallas E-W —más tardías— se hallan los depósitos de caolín, producto de una alteración argílica avanzada, característica de zonas de condensación de vapor. Las condiciones del fluido indicadas por esta alteración son un pH muy ácido (2-3) y temperaturas cercanas a los 100 °C. Por su clara asociación con las fallas, así como por la ausencia de vulcanismo reciente (Cuaternario) cercano, Pathé se considera como un sistema geotérmico convectivo controlado por fallas. La sucesión de eventos de alteración sugiere que la actividad hidrotermal inició antes del Plioceno.

PALABRAS CLAVE: Joseph Burkart; José Guadalupe Aguilera Serrano; Faja Volcánica Transmexicana; alteración hidrotermal; caolín; fallas normales.

*Autor de correspondencia: canet@atmosfera.unam.mx

¹Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM
Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510
Ciudad de México, México

²Instituto de Geofísica, UNAM
Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510
Ciudad de México, México

³Instituto de Geología, UNAM
Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510
Ciudad de México, México

⁴School of Geology, College of Science
University of Tebran, Tebran, Irán

ABSTRACT

The Pathé geothermal zone, in the central portion of the Trans-Mexican Volcanic Belt, attracted a variety of scientists and explorers since late 18th century. Joseph Burkart (1798-1870), a German mining engineer and a contemporary of Alexander von Humboldt (1769-1859), provided in 1836 a geological description of the zone because of which Pathé was the first geothermal system to be studied in Mexico under modern science principles. At the beginning of the 20th century, this zone was investigated by the Mexican geologist José Guadalupe Aguilera Serrano (1857-1941), who described in 1907 the local volcanic rocks and their alteration. His main interest were the kaolin deposits of Yexthó, located one km to the west of the geothermal manifestations. By the middle of the century, the area was already explored for geothermal energy, which resulted in the first geothermal power plant in all America, operating between 1959 and 1972 with a nominal capacity of 3.5 MW.

The thermal manifestations of Pathé are located at the junction of two regional normal fault systems, striking N-S and E-W, and are hosted by a volcanic unit (tuff and lava) of basic to intermediate composition and Upper Miocene age. Surficial hydrothermal alteration is conspicuous and largely controlled by faults of these two systems. Associated with the N-S faults is a calcite-gypsum alteration assemblage, indicating oxidized, alkaline sulfate-rich hydrothermal fluids. On the other hand, linked to the later E-W faults are the kaolin deposits; they are the product of an advanced argillic alteration that is characteristic of a steam-heated environment and indicates acidic conditions (pH: 2 to 3) and temperatures around 100 °C. Because of its unambiguous relation to faults and the absence of recent (Quaternary) volcanism, Pathé is likely to be a fault-controlled geothermal system (non-magmatic, extensional domain type). The successive alteration events suggest that the hydrothermal activity is long-lived and dates back to before the Pliocene.

KEY WORDS: Joseph Burkart; José Guadalupe Aguilera Serrano; Trans-Mexican Volcanic Belt; hydrothermal alteration; kaolin; normal faults.

INTRODUCCIÓN

Por sus manifestaciones termales superficiales, antaño espectaculares, la zona geotérmica de Pathé (ZGP), en el límite noroccidental del estado de Hidalgo (colindante con Querétaro) (Fig. 1), atrajo desde finales del siglo XVIII la atención de exploradores y científicos. Pocos años después de las primeras relaciones documentales, las cuales aparecen en textos de carácter oficial y geográfico (Gómez Canedo, 1976; Ward, 1981), Burkart publicó en 1836 la primera descripción geológica de la zona, brindando detalles de la litología e incluso mediciones de la temperatura atmosférica y de las aguas termales. Por estos primigenios escritos de carácter técnico, Pathé se cuenta entre las primeras zonas geotérmicas de México en ser estudiada bajo los paradigmas de la ciencia moderna (*cf.* Morelos Rodríguez, 2012).

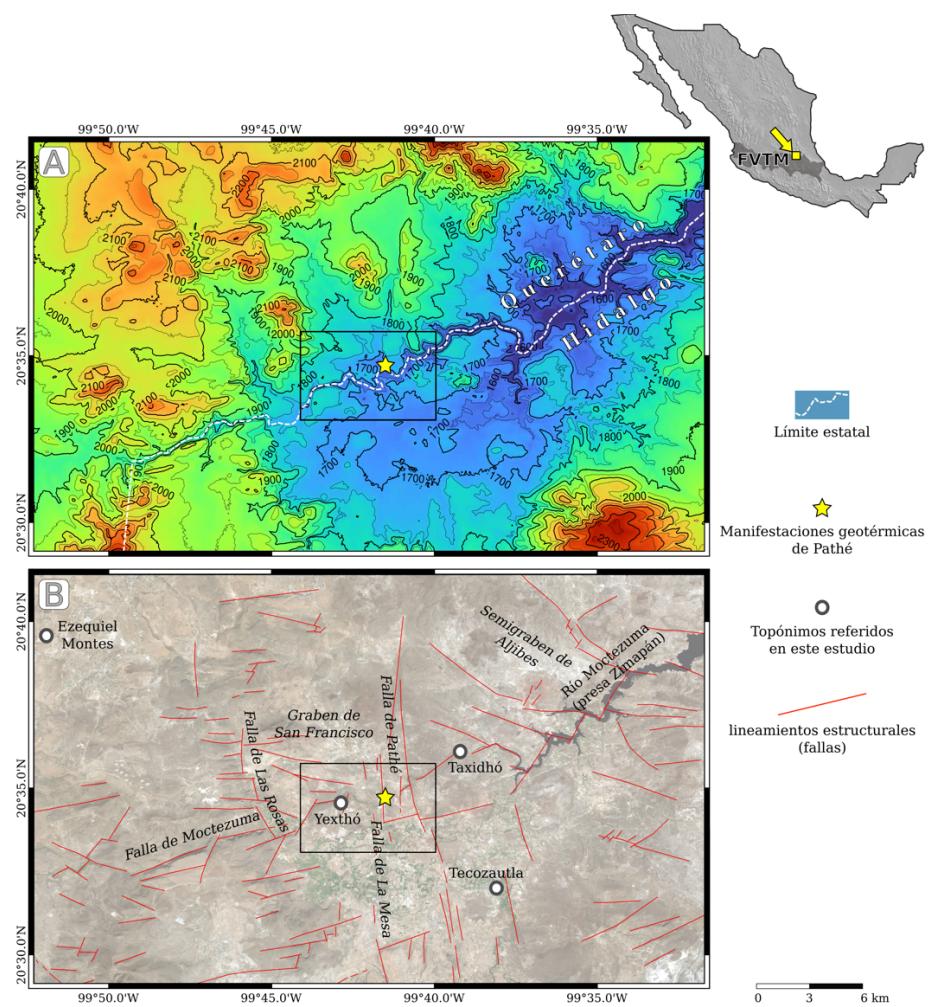


Figura 1. Mapas de ubicación de la zona geotérmica de Pathé, en la región limítrofe entre los estados de Hidalgo (municipio: Tecozautla) y Querétaro (municipios: Ezequiel Montes y Tequisquiapan). (A) Hipsometría (en m sobre el nivel del mar); (B) principales fallas y ubicación de topónimos citados en este trabajo. El recuadro corresponde al mapa geológico detallado de la zona geotérmica de Pathé, mostrado en la figura 5. La nomenclatura de las estructuras geológicas está basada en Carrillo Martínez (1998 y 2000), SGM (2007) e Hiriart Le Bert (2011). FVTM, Faja Volcánica Transmexicana.

A finales del siglo XIX e inicios del XX, en el marco de un proceso de institucionalización de la geología en México que buscaba documentar de manera sistemática y exhaustiva el territorio nacional desde un punto de vista geológico —con particular atención puesta en los recursos minerales—, se reavivó el interés por la ZGP, lo que condujo a nuevas investigaciones, enfocadas, en este caso, a los yacimientos de caolín de Yexthó (Figs. 1 y 2B), los cuales están espacial y genéticamente relacionados con los fenómenos hidrotermales del lugar (Aguilera, 1907).

Otra marca singular que ostenta la ZGP es haber tenido la primera planta geotermoeléctrica del continente americano, en operación entre 1959 y 1972 con una capacidad instalada de 3.5 MW (Hiriart Le Bert, 2011). Años después de su cierre, a partir de 1985, la zona se convirtió en un balneario de aguas termales, de nombre «Balneario El Géiser», desarrollado bajo un modelo de gestión comunitaria (Toscana Aparicio, 2017). El nombre se debe a que del antiguo pozo

productivo ('Pathé 1') emana una columna de vapor que frecuentemente es visible desde varios kilómetros de distancia (Fig. 2A). Este pozo y el edificio de la central eléctrica, además de algunas máquinas muy deterioradas, son los únicos testimonios que aún se conservan de la antigua planta, dentro de lo que hoy es un enorme complejo turístico que incluye un hotel con 650 habitaciones (Toscana Aparicio, 2017) (Fig. 3). El generador, que había sido adquirido el año 1958 en Larderello —la planta geotérmica más antigua del mundo, ubicada en la Toscana, Italia— se exhibe actualmente como una pieza de museo en el campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán (Nieva *et al.*, 2013). En cuanto a las manifestaciones naturales descritas por los primeros geólogos que estudiaron la zona, no queda ningún vestigio de ellas.



Figura 2. Vistas panorámicas de la zona geotérmica de Pathé. (A) Columna de vapor emanando del antiguo pozo geotérmico de Pathé, hoy día incluido en el complejo turístico-balneológico conocido como «Balneario El Géiser» (vista hacia el este); el relieve tabular que se observa hacia el fondo corresponde a lavas basálticas de la Unidad volcánica inferior (Mioceno superior). (B) Antiguas minas de caolín de la Hacienda de Yexthó (vista hacia el sur).



Figura 3. Vistas hacia el oeste sobre el «Balneario El Géiser», complejo turístico desarrollado a partir de 1985 en lo que fuera la planta geotermoelectrífica de Pathé —la primera del continente americano (operativa entre 1959 y 1972)—. El complejo se ubica en un surco tectónico de aproximadamente medio km de ancho y dirección N-S, producido por la Falla de Pathé, a la cual se asocia el graben de San Francisco (Carrillo Martínez, 1998), en su intersección con la Falla Moctezuma (SGM, 2007), de dirección WSW-ENE y asociada al semigraben de Aljibes (Suter *et al.*, 1995). En segundo plano, al centro de la fotografía, se observa en tonos amarillentos el escarpe de la Falla de Pathé.

Entre las más de 1380 manifestaciones geotérmicas inventariadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) a lo largo y ancho del territorio mexicano (*cf.* Ordaz Méndez *et al.*, 2011), Pathé se incluye en el conjunto del ~20% de ellas con características de sistemas de media o alta entalpía (González-Ruiz *et al.*, 2015), cuyas temperaturas de reservorio (con base en geotermómetros) superan los 150 °C (Ordaz Méndez *op.cit.*). No obstante, no hay evidencia de que el sistema hidrotermal esté conectado con vulcanismo cuaternario (Hiriart Le Bert, 2011), antes bien se trataría un sistema gobernado por fallas normales activas (Nichols, 1970; Suter *et al.*, 1995; Carrillo Martínez, 1998).

A pesar de su relevancia histórica, singularidad geológica e interés económico —nutrido por sus recursos geotérmicos y minerales (no metálicos) y, además, por su actual aprovechamiento como balneario y por su potencial geoturístico—, son muy escasos los estudios publicados en las últimas décadas sobre la ZGP, destacando los que se enfocan específicamente a la geología estructural (Suter *et al.*, 1995; Carrillo Martínez, 1998 y 2000).

La presente contribución ofrece una revisión histórica de las investigaciones y exploraciones realizadas en la ZGP. Partiendo de ello, presenta un estudio original, de carácter cartográfico y descriptivo, acerca de la geología superficial de dicha zona (con énfasis en las alteraciones hidrotermales y su relación con las fallas), el cual pretende servir como marco actualizado de la geología del área.

Con este ensayo, los autores humildemente queremos homenajear al Ing. José Guadalupe Aguilera Serrano (1857-1941) y celebrar su contribución a la geología mexicana, exponiendo la vigencia de su estudio (Aguilera, 1907), publicado hace más de un siglo.

REVISIÓN HISTÓRICA

1. CONTEXTO: EL SURGIMIENTO E INSTITUCIONALIZACIÓN DE LA GEOLOGÍA EN MÉXICO

Antonio del Castillo (1820-1895), José Guadalupe Aguilera Serrano (1857-1941) y Ezequiel Ordóñez (1867-1951) fueron figuras sobresalientes y muy influyentes dentro de una generación de geólogos pioneros que, en la segunda mitad del siglo XIX, logró un hito sin precedentes en México: la fundación de la primera institución que se dedicaría exclusivamente al estudio geológico del territorio nacional. Así, en 1888, se creó por decreto presidencial el *Instituto Geológico Nacional* (IGN) (también conocido como Instituto Geológico de México), que debía documentar y estudiar los rasgos y fenómenos geológicos del territorio nacional bajo un triple enfoque científico-técnico-industrial. Entre sus cometidos se mencionaban: cartografiar desde el punto de vista geológico el territorio; caracterizar los tipos de suelos, rocas, minerales y materiales; así como el acopio, colecta, clasificación, conservación y exhibición de muestras de fósiles, rocas, minerales y tierras en el Museo Geológico Paleontológico de la Nación que debía desarrollar (Morelos Rodríguez y Moncada Maya, 2015).

En vísperas de recibir a la comunidad geológica internacional en el marco del Décimo Congreso Geológico Internacional, a celebrarse en 1906 en el país, los integrantes del IGN se constituyeron en una corporación científica que fue nombrada *Sociedad Geológica Mexicana* (SGM). El acto fundacional se celebró el 6 de diciembre de 1904, y se estableció el objetivo sustancial de «cultivar y propagar el estudio de la Geología y ciencias anexas, contribuir al adelanto de la Geología en general, y dar a conocer el suelo de México, tanto en sí mismo, como en sus relaciones con la minería, la agricultura y otras artes industriales» (SGM, 1904). Para asegurar la difusión de los estudios geológicos realizados por los socios, la SGM contó con el Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, instrumento de comunicación que se ha venido publicando desde 1905, siendo una de las revistas científicas más antiguas actualmente activas en México.

Entre 1904 y 1906, la SGM acometió resueltamente la exploración del territorio nacional, mediante al menos 31 excursiones por todo el país, lo que abonó para la primera versión de la Carta Geológica de América del Norte (a escala 1:5,000,000), resultado de la colaboración de los servicios geológicos de México, Estados Unidos y Canadá (USGS, 1911).

A comienzos del siglo XIX, el estado de Hidalgo había sido objeto de estudios geológicos y mineros particularmente detallados, debido a su profusa riqueza argentífera (Suter, 2016); ese interés resurgió hacia finales del mismo siglo e inicios del XX (*cf.* Aguilera, 1905). Es de suponerse que, durante alguno de los recorridos del IGN por dicho estado, haya nacido en el ingeniero José Guadalupe Aguilera el interés por explorar la zona, entonces remota, de los confines con el estado de Querétaro. En ese contexto, se publicó el artículo «Los kaolines [sic] de la Hacienda de Yexthó» (Aguilera, 1907), en el que se ofrecen detalladas y valiosas descripciones geológicas de la zona objeto del presente estudio.

2. CRONOLOGÍA DE EXPLORACIONES Y ESTUDIOS EN LA ZONA GEOTÉRMICA DE PATHÉ

La primera visita documentada a la ZGP tuvo lugar en 1791, cuando un grupo de naturalistas de la Comisión Científica Novohispana, liderados por Antonio Pineda y Ramírez, realizaron una expedición al Real de Minas de Zimapán (Suter, 2016). Desde este importante distrito minero se dirigieron a Tecozautla donde examinaron las manifestaciones ('baños') termales de Pathé

(Engstrand, 1981; González Claverán, 1988). De esos tiempos existe una primera referencia documental de la zona (escrita entre 1787 y 1792), correspondiente al borrador de un diario de un viaje de inspección a las «milicias de la Sierra Gorda», rescatado por Gómez Canedo (1976):

Andadas cuatro leguas de camino áspero y pedregoso, se encuentra la ranchería nombrada Patehé, tomando esta denominación, que en otomí significa agua caliente, de los hervideros de agua asufrosa que se hallan en la orilla del río de San Juan, que atraviesa el camino. A distancia de otra legua se pasa el Arroyo de San Francisco, que sólo corre en tiempo de aguas, nace en los montes de Xilotepéque y va a unirse con el Río de Cimapán; y caminadas otras dos leguas se llega a Tecozautla, pueblo de suma fertilidad, situado en una loma de tepetate. Su terreno es arenoso y tiene mucha agua; las calles son angostas, casi todas formadas de árboles, pero bien rectas y dispuestas con simetría. No pudo averigüarse en qué tiempo se formó este pueblo, pero la iglesia y sus adornos manifiestan ser de mucha antigüedad. A 3 leguas desta población informan los vecinos hallarse las aguas termales de Taxidío cuyos baños son muy ponderados por la bella temperatura de sus aguas, y por los innumerables enfermos que ocurren.

Una vez que México obtuvo su independencia política de España, las autoridades del nuevo régimen abrieron las fronteras y los mercados para que inversionistas de otras naciones llegaran a la nueva nación. En este escenario, diversos viajeros —con intereses también diversos— se aprestaron para visitar el país, como es el caso de Henry George Ward (1797-1860), diplomático e historiador británico encargado de los negocios de su país en México durante el periodo de 1825 a 1827, quien dedicó algunas páginas de su libro *Mexico in 1827* para describir el terreno de Tecozautla y las aguas termales de Pathé (Ward, 1981, 507):

Para ir de México hasta el Doctor existen dos rutas, una por San Juan del Río y Cadereita, y la otra, un camino de herradura, señalado en mi mapa de rutas según las indicaciones que me dio uno de los agentes de la Catorce Company.

El distrito montañoso comienza al atravesar el río Tula, un poco hacia el sur de Tepetitlán (a catorce leguas de Huehuetoca), desde donde se extiende una sucesión de cerros empinados y áridos hasta la villa indígena de Tecozautla, situada en un valle bien regado y con abundancia de fértiles huertas. Después de Tecozautla el camino cruza el río Pate, en cuya vecindad hay manantiales de aguas minerales que despiden un denso vapor sulfuroso, y desde allí corre hasta el pie de una sombría montaña llamada Sombrerete, en la que se encuentra el rancho de Oliveira. El rancho está a nueve leguas de Tecozautla y a cuatro del Doctor, lugar al que sin embargo es imposible llegar en un solo día.

Desde el punto de vista geotérmico, fue el ingeniero de minas alemán Joseph Burkart (1798-1870), graduado de la Academia de Minas de Freiberg, Sajonia (actual Alemania) y contemporáneo de Alexander von Humboldt (1769-1859), quien realizó unas de las primeras descripciones de la zona comprendida entre Tecozautla y Zimapán. Este experto minero residió en México entre 1825 y 1834, trabajando en empresas mineras de capital alemán e inglés en los distritos mineros de Tlalpujahua, en Michoacán, y Veta Grande, en Zacatecas. Como resultado de su estancia redactó el libro *Aufenthalt und Reisen in Mexico in den Jahren 1825 bis 1834*, publicado en 1836 y nunca traducido al español. En la primavera de 1828 visitó varios distritos mineros después de dejar la empresa minera en Tlalpujahua

y antes de empezar su nuevo empleo en Veta Grande, Zacatecas. Desde la capital, quería visitar Zimapán y sus alrededores, para después dirigirse a Guanajuato, luego pasar a Zacatecas y finalmente ir a Durango, vía Mazapil, Catorce, Ramos y San Luis Potosí. Sin embargo, en aquella ocasión no le fue posible consumar su viaje hasta Durango, pero por otro lado se le facilitó conocer otras áreas que no tenía planeado visitar (Burkart, 1836). Así es como Joseph Burkart acabó realizando un reconocimiento geológico del terreno donde se asentaba la Hacienda de Pathé y una descripción de sus manifestaciones termales. Dada la relevancia de sus observaciones vertidas en su libro, en 1875, el naturalista mexicano Gumersindo Mendoza (1829-1886), miembro de la Sociedad Mexicana de Historia Natural, se dio a la tarea de traducir una sección de la obra del alemán que tituló «Notas sobre las fuentes termales de Pathé» para la publicación minera mexicana *El Propagador Industrial* (Mendoza, 1875):

Desde lo alto de la ribera izquierda del río Moctezuma, hacia el Oeste, el terreno es plano, y solo interrumpido por colinas de poca altura. Rumbo a Tecozautla, el terreno desciende, al grado de que esta población solo queda a 5,564 pies sobre el nivel del mar, pero abí, rumbo a Cadereyta, vuelve el terreno a elevarse. El calcáreo moderno (¿del Jura?) y que yo observé en Huehuetoca y en el Valle de Tula, aquí, entre el río Moctezuma y Tecozautla, lo cubre una roca traquítica que aparece en muchos puntos. El terreno se compone, unas veces de un calcáreo amarillo gris, de poca densidad, de una textura desigual y sin fósiles; otras veces se compone de un conglomerado que encierra fragmentos traquíticos y doloríticos, unidos por un cemento calcáreo, terroso y raras veces denso.

Al Oriente de Tecozautla, el terreno contiene algunas capas delgadas de una arenisca fina y desmoronadiza, manifestando claramente una estratificación horizontal. El pórfido, que en una masa feldspática, encierra cristales de feldespato vidrioso, surge en muchos puntos entre este calcáreo.

Al Oriente [sic] de Tecozautla hay una masa feldspática color rojo de carne; los espacios arejigados están cubiertos de bialita, y en la masa total se hallan fragmentos grandes de un feldespato vitreo ligeramente colorido.

De Tecozautla parte un camino, en una dirección Noroeste, (como a una y media leguas) cuyo piso es de la misma roca calcárea, hasta las inmediaciones de las fuentes termales de Pathé.

Sobre las manifestaciones termales de Pathé, vocablo *hñähñu* (otomí) que significa agua caliente —o termal—, Joseph Burkart se explató en valiosas descripciones geológicas-mineralógicas (Mendoza, 1875):

El arroyo que viene de San Juan del Río, del lado Suroeste, y dirigiéndose al Noroeste, se ha cavado un lecho algo profundo, será apenas de unas 150 a 200 varas, en un pórfido alterado.

El pórfido es de un gris oscuro y encierra cristales de feldespato bojoso, núcleos y cordones o cintitas de granate pardo.

Las fuentes termales de Pathé (agua caliente en otomí) brotan del pórfido y al través del mencionado conglomerado. Estas aguas están brotando con gran ruido y cuando se tapan las aberturas naturales de donde están saliendo, con una piedra, entonces el agua sale haciendo borbollones. Las aberturas son de alguna consideración, puesto que algunas de ellas tienen de uno a dos pies de diámetro. El agua que está brotando de ellas es considerable.

Los vapores de esta agua se elevan en la atmósfera, y son visibles a gran distancia, especialmente por la mañana y por la tarde. El agua que está brotando allí es extraordinariamente transparente y de

una alta temperatura, próximamente de 96° centígrados, mientras que la temperatura del aire era al tiempo de la observación de 23°. A las nueve de la mañana la columna barométrica era de 24,908 pulgadas inglesas.

En el valle, conté 9 diversos manantiales, poco distantes entre sí: 7 a la derecha y 2 a la izquierda. Todos ellos brotan en una línea de Oriente a Poniente, y se dirigen paralelamente a la línea principal de los volcanes de México. Sobre las rocas que cubren estas aguas, van dejando un residuo de sulfato de fierro.

Subiendo un poco más hacia el valle adyacente de Pathé, el pórfido ya descrito, se cambia por una capa de un espesor de 6 a 12 pulgadas de una pizarra blanca, espática, en la cual se encuentra la calcedonia lechosa [...] El pórfido es colorido, poco más que el anterior, y a veces es de un gris rojizo, y se hiende en las tablas delgadas y paralelas a la estratificación. En esas capas pórfidos-espáticas apiñadas, suele atravesar el azufre nativo, que en otro tiempo fue explotado. La mina estaba abandonada, el camino intransitable y por esta razón no pude adquirir más datos sobre ella.

Una extensa área situada al norte de la ZGP, correspondiente a sector central del estado de Querétaro, fue investigada a mucho detalle por el Ing. Mariano Bárcena (1842-1899), quien se desempeñó como «director sustituto de la práctica de Mineralogía y Geología de los alumnos de la Escuela de Ingenieros». De dicha expedición, realizada en el año 1872, publicó un extenso informe (Bárcena, 1873), en el que se mencionan las aguas termales, así como los depósitos de alteración de la ZGP:

Además de las rocas eruptivas mencionadas, tuvimos ocasión de observar otras del mismo origen (p. 215), como son la perlita y la piedra pez. En el camino de Tequisquiapam a San Juan del Río se ven grandes bancos de la primera, provista de numerosas y pequeñas concreciones de la misma sustancia. En esta formación existen algunos manantiales termales muy alcalinos, cuya temperatura media es de 31°C.

Tres décadas más tarde, la ZGP atrajo la atención del ingeniero José Guadalupe Aguilera (Fig. 4), quien describió tanto las rocas eruptivas como sus productos de alteración. Su mayor interés, sin embargo, no fueron las aguas termales sino los yacimientos de caolín de Yexthó, situados a un kilómetro al suroeste de las manifestaciones de Pathé. Aguilera analizó la potencialidad y estado de explotación de las minas de caolín, con base en descripciones detalladas y en su relación con las rocas volcánicas de la región y con los manantiales termales. Entre sus conclusiones, el autor menciona que los numerosos manantiales de la localidad debían su temperatura a los «macizos volcánicos, relativamente recientes, que se encuentran en su periodo de enfriamiento», asignando la actividad volcánica al Plioceno (Aguilera, 1907).

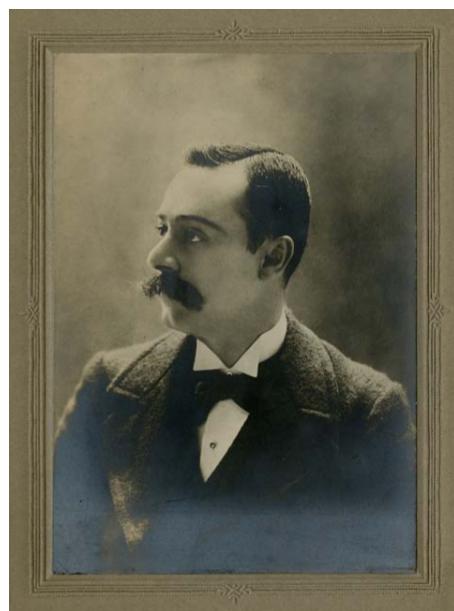


Figura 4. Retrato del ingeniero José Guadalupe Aguilera Serrano (1857-1941), quien fuera director del *Instituto Geológico de México*, además de fundador y primer presidente de la *Sociedad Geológica Mexicana*, ca. 1906. Archivo Histórico del Instituto de Geología, UNAM.

Además de describir la estructura y composición mineralógica de las vetas de caolín, Aguilera (1907) se refirió a las minas a cielo abierto, enumerándolas (Mothó, Santa Rosa, El Có y La Salitrera) y calificando los trabajos mineros de «muy superficiales y desordenados», pero asegurando la existencia de reservas de caolín suficientes para sostener su explotación por varios años. Para principios de los años 1950 estos criaderos estaban casi agotados (Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, 1952).

Aguilera (1907) destacó la aplicación que se le podía dar al caolín para la fabricación de porcelana, con base en los análisis realizados en el Laboratorio Químico del IGN para conocer las concentraciones de los elementos mayores «cal, potasa, sosa, fierro, magnesia» que intervenían en sus propiedades mecánicas y su coloración. A partir de sus observaciones de campo y resultados de laboratorio, Aguilera (1907) auguró el éxito en la explotación del caolín dada la cercanía de la localidad a Ciudad de México y a las vías de ferrocarril que acortaban distancias. Para esa fecha eran de sobra conocidas las diversas aplicaciones del caolín para producir objetos de uso doméstico y ornato, loza, ladrillos y tejas. Existían fábricas de loza en Salamanca, Guanajuato, la de Niño Perdido en Ciudad de México, y en Chignahuapan, Puebla (Arriaga, 1873). En su disertación, Aguilera (1907) describió el mineral no metálico:

De colores blanco y rosado el más puro, y amarillento el de menor calidad. El kaolín de mejor calidad viene en pequeñas bolsas dentro de las zonas de kaolín y se distingue del menos puro además de su color, que hemos dicho que es blanco rosado, por ser más blando y ligeramente untuoso, caracteres que facilitan su separación o pepena en la mina a los trabajadores.

Por su relevancia y calidad, el estudio realizado por Aguilera (1907) fue transscrito por el ingeniero Jenaro González Reyna en su libro «Riqueza Minera y Yacimientos Minerales de México», publicado en 1944 por el Banco de México y reeditado en 1956 como parte de los trabajos del XX Congreso Geológico Internacional celebrado en México.

DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ÁREA DE ESTUDIO

La ZGP se localiza en el límite entre los estados de Hidalgo y Querétaro (centro de México), en el trecho limítrofe interestatal que sigue el cauce del Río San Juan, el cual es un tributario de la cuenca del Pánuco que aguas abajo de esta zona toma el nombre de Río Moctezuma (Fig. 1). Tanto las manifestaciones termales (antiguo pozo geotérmico y actual balneario) como las alteraciones hidrotermales de mayor extensión (incluyendo los depósitos de caolín) se hallan en el lado hidalguense (sur) de la frontera interestatal, dentro del municipio de Tecozautla.

1. CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

Geológicamente la ZGP se encuentra en el sector central de la Faja Volcánica Transmexicana. A nivel regional se distingue una secuencia volcánica continental de más de 1000 m de espesor, de edad Mioceno y Plioceno, que cubre discordantemente un basamento sedimentario marino del Cretácico (SGM, 2007). Este último no está expuesto en la ZGP; los afloramientos más cercanos se encuentran aproximadamente a 15 km hacia el N y el E, y corresponden a las formaciones El Doctor (carbonatos de plataforma) y Soyatal (lutitas y margas) (Wilson *et al.*, 1955; Carrillo Martínez, 2000).

La cubierta volcánica consiste esencialmente en tobas y lavas de composición riolítica, andesítica y basáltica (Nichols, 1970), y presenta una configuración en bloques limitados por fallas normales escalonadas que controlan los grandes rasgos del relieve. Las fallas se agrupan en dos sistemas: E-W y N-S (Carrillo Martínez, 1998 y 2000); al primero se asocia el semigraben de Aljibes (Suter *et al.*, 1995) y al segundo el graben de San Francisco (Carrillo Martínez *op.cit.*) —o de Pathé (Hiriart Le Bert, 2011).

Para identificar los enjambres de fallas y lineamientos predominantes en la región, se han procesado para el presente estudio varias imágenes satelitales Landsat 8 y QuickBird mediante el *software* ENVI 5.3. Los lineamientos se han extraído con un filtro de dirección y se han revisado usando imágenes sombreadas; finalmente, se han cotejado uno por uno con los rasgos geomorfológicos y la geología superficial, usando diferentes capas en un sistema de información geográfica ArcGis. El mapa así generado (Fig. 1B) muestra el control estructural del cauce del Río San Juan, el cual sigue el trazado de la Falla Moctezuma; se observa asimismo que la ZGP se ubica en la intersección de los dos sistemas de fallas predominantes (E-W y N-S).

2. SISTEMA GEOTÉRMICO

Las temperaturas del reservorio geotérmico en el antiguo pozo productor de vapor 'Pathé 1' (coordenadas: 20°34'40.2"N, 99°41'34.4"W) fueron calculadas en 191 °C y en 221 °C con el geotermómetro de cationes Na/K y el de gases H₂/Ar, respectivamente (Hiriart Le Bert, 2011). Las temperaturas medidas directamente en varios pozos exploratorios perforados en la zona por la CFE rondaron los 150 °C a 300 m de profundidad (Hiriart Le Bert, 2011).

Del pozo 'Pathé 1' fluye todavía hoy agua del tipo sódico-clorurado a 95 °C, mientras que en las manifestaciones naturales adyacentes a la ZGP el agua es sódica-bicarbonatada y las temperaturas no superan los 40 °C (Hiriart Le Bert, 2011); como ejemplo de estas últimas están los manantiales de Taxidhó (topónimo *hñähñu* que significa 'piedra blanca'), situados 4.5 km hacia el NE de la zona de estudio (coordenadas: 20°36'7.2"N, 99°39'15.7"W), sobre el trazado de la Falla Moctezuma ('Falla E' en Carrillo Martínez, 1998), al fondo del cañón por el que discurre el Río San Juan (Fig. 1).

En la ZGP son conspicuas las alteraciones hidrotermales superficiales, desarrolladas a lo largo de fallas (Carrillo Martínez, 1998 y 2000), especialmente en las intersecciones de fallas (Fig. 5). Incluyen los depósitos de caolín de Yexthó, objeto de investigación de Aguilera (1907).

De acuerdo con Hiriart Le Bert (2011), el potencial del sistema geotérmico es de 33 MW (desviación estándar = 17 MW), estimado con el método volumétrico-Montecarlo, o de hasta 49 MW con el método de descompresión gradual.

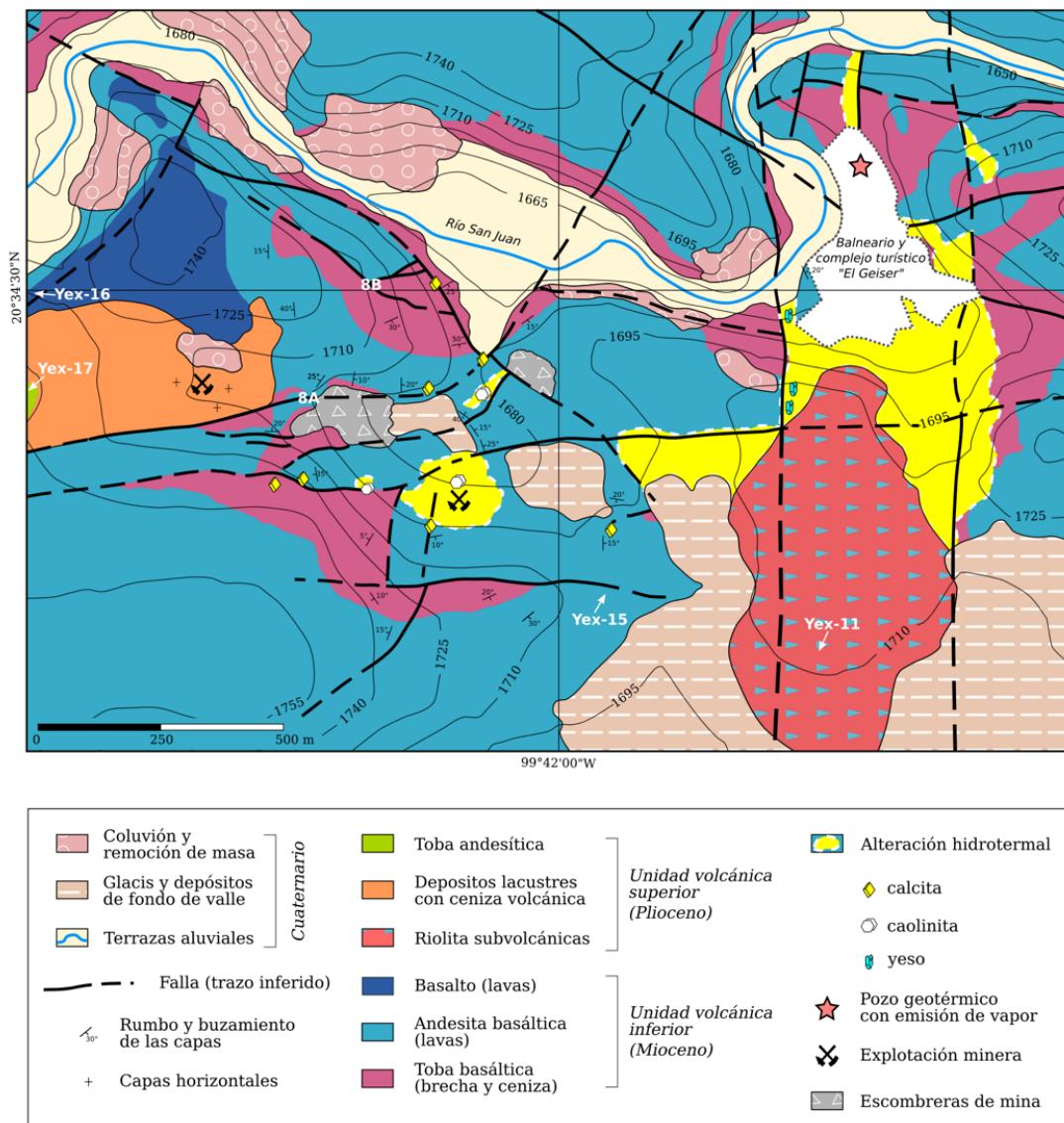


Figura 5. Mapa geológico detallado de la zona geotérmica de Pathé (fuente: elaboración propia, a partir de levantamientos de campo apoyados por imágenes satelitales), que incluye la distribución de las alteraciones hidrotermales y sus minerales más característicos, así como la ubicación de las manifestaciones termales (actual «Balneario El Géiser») y de los depósitos de caolín (antiguas minas de Yexthó).

8A y 8B: ubicaciones de las fallas mostradas en la Fig. 8.

Yex-11, Yex-15, Yex-16 y Yex-17: ubicaciones de las muestras analizadas (resultados en Tabla 1 y Fig. 7).

ESTUDIO GEOLÓGICO LOCAL

A pesar del modesto rango hipsométrico, con cotas entre 1645 y 1760 m s.n.m. (en el lecho del Río San Juan y en las mesetas más elevadas, respectivamente; Fig. 1A), la orografía que enmarca la ZGP es intrincada, caracterizándose por un relieve montuoso de naturaleza volcánica disecado por barrancas (Fig. 2A), cuyo trazado está controlado por los sistemas de fallas que concurren en el área (*cf.* Carrillo Martínez, 1998). Las fallas, además de modelar el patrón de la red de drenaje hídrico (Fig. 1), tienen como expresión morfológica común los escarpes —originales o derivados (afectados por la erosión)—, con desniveles de hasta 30 m (Fig. 3); este valor en la vertical coincide con el desplazamiento medido por Carrillo Martínez (1998) en muchas de las fallas de la zona, aunque para algunas del sistema N-S reporta saltos de hasta 70 m.

1. UNIDADES LITOLÓGICAS Y ESTRUCTURALES

Con la excepción de los depósitos del Cuaternario —que ocupan el lecho y las orillas del Río San Juan (terrazas aluviales), los terrenos llanos (glacis y depósito de fondo de valle) y el pie de las laderas (coluvión y depósitos de remoción de masa)—, todas las rocas que afloran en la ZGP pertenecen a unidades volcánicas del Neógeno (Figs. 5 y 6). Para una mayor certeza en la clasificación de dichas unidades, se ha realizado el análisis químico de cuatro muestras de roca por medio del método de espectroscopía de emisión óptica por plasma de acoplamiento inductivo (ICP-OES, por su sigla en inglés) en el laboratorio ActLabs, Ancaster, Canadá. Los resultados se presentan en la Tabla 1 y se proyectan en el diagrama de clasificación química de rocas mostrado en la figura 7.

Tabla 1. Composición química (análisis de roca total por ICP-OES) de muestras representativas de las unidades volcánicas de la zona geotérmica de Pathé (clasificación y descripción de las muestras en Fig. 7).

| # muestra | SiO ₂ (% en peso) | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ (T) | Mn O | MgO | CaO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ | P ₂ O ₅ | LOI* | total |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------|--|---------|------|------|-------------------|------------------|----------|-------------------------------|------|-------|
| 1 | Yex-11 | 80.97 | 6.66 | 1.35 | 0.01 | 0.50 | 1.02 | 0.12 | 4.78 | 0.24 | 0.12 | 4.02 |
| 2 | Yex-15 | 52.73 | 17.65 | 7.91 | 0.13 | 4.57 | 8.83 | 3.21 | 1.00 | 1.20 | 0.23 | 3.38 |
| 3 | Yex-16 | 50.99 | 17.67 | 9.84 | 0.15 | 3.58 | 8.49 | 3.75 | 0.62 | 2.05 | 0.41 | 3.12 |
| 4 | Yex-17 | 60.20 | 14.41 | 5.29 | 0.09 | 2.03 | 2.98 | 3.51 | 3.21 | 0.75 | 0.22 | 7.81 |
| # | Ba (ppm) | Sr | Y | Sc | Zr | Be | V | | | | | |
| 1 | 518 | 160 | 22 | 5 | 196 | 3 | 11 | | | | | |
| 2 | 285 | 485 | 21 | 26 | 161 | 1 | 171 | | | | | |
| 3 | 438 | 591 | 33 | 24 | 296 | 1 | 174 | | | | | |
| 4 | 476 | 536 | 29 | 11 | 303 | 2 | 52 | | | | | |

*LOI = pérdida por ignición (por su sigla en inglés)

Coordenadas: #1: 20°34'01.1"N / 99°41'43.3"W; #2: 20°34'03.5"N / 99°42'04.8"W; #3: 20°34'28.1"N / 99°42'47.0"W; #4: 20°34'21.4"N / 99°42'45.4"W

En la ZGP se distinguen dos unidades volcánicas, que en el presente trabajo denominaremos (a) Unidad volcánica inferior, de composición básica, y (b) Unidad volcánica superior, de composición intermedia a ácida (Figs. 6 y 7). Cabe mencionar que las perforaciones realizadas con fines exploratorios (hasta una profundad de 1286 m) revelaron una sucesión riolítica de lavas, tobas y brechas (Carrillo-Martínez, 2000), la cual no aflora en la ZGP por estar cubierta por la Unidad volcánica inferior.

La Unidad volcánica inferior es la que ocupa una mayor extensión de la ZGP y su espesor expuesto es de hasta 70 m. Se corresponde con la ‘unidad basáltica’ a la que Nichols (1970) atribuyó una edad Mioceno superior; de acuerdo con Suter *et al.* (1995), esta unidad equivaldría al Grupo San Juan (definido por Wilson *et al.*, 1955). Hacia la base, la Unidad volcánica inferior presenta depósitos piroclásticos (tefra) no consolidados, de tamaños ceniza y lapilli predominantes, con bloques dispersos de hasta 40 cm de diámetro. Estos depósitos, que se corresponden con la ‘toba basáltica’ definida por Nichols (1970), tienen un espesor máximo de ~25 m, muestran laminación, y presentan —a escala de afloramiento— cambios bruscos de coloración, de amarillo a rojizo (Fig. 6A). Por encima de ellos yace un paquete de lavas de hasta 50 m de espesor. Las lavas comúnmente se encuentran brechificadas a la base, pero su modo de ocurrencia más característico es como lavas lajeadas, aspecto que ya había sido percibido por Joseph Burkart y descrito como ‘apizarrado’ (en: Mendoza, 1875). Las lavas con esta fisibilidad característica presentan en muestra de mano una coloración gris y fenocristales de hasta 2 mm de plagioclasa y piroxeno (Fig. 6B). Químicamente son andesitas basálticas (Fig. 7). Hacia el techo de la unidad, las lavas son diferentes en cuanto a textura y composición: son más oscuras y marcadamente vesiculares (Fig. 6C), con una composición química distintiva de los basaltos (Fig. 7).

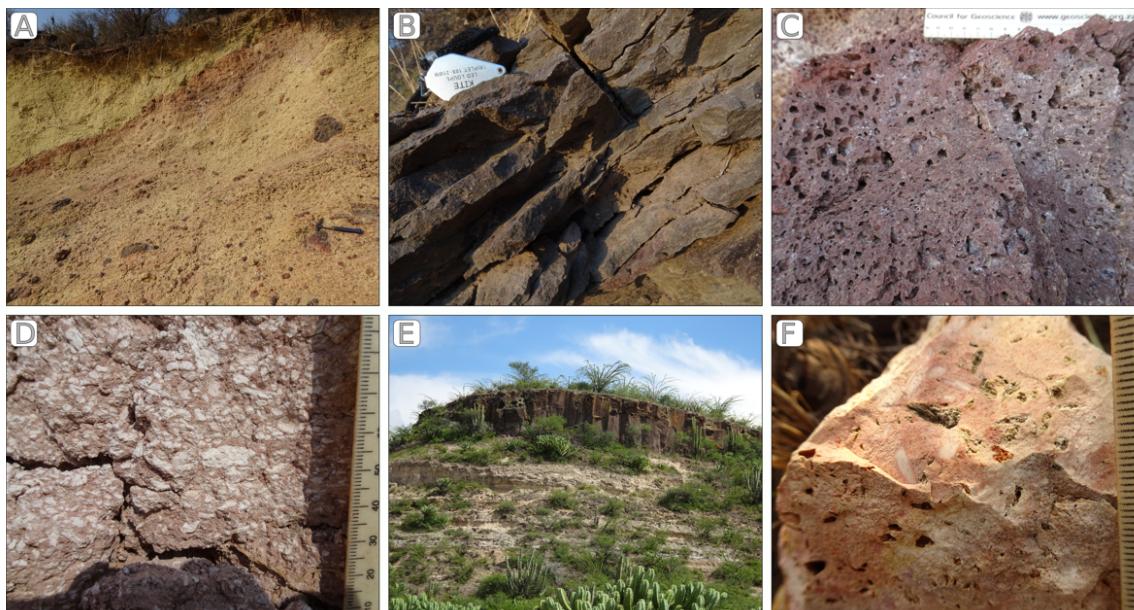


Figura 6. Fotografías de campo de las unidades volcánicas de la zona geotérmica de Pathé. Unidad volcánica inferior (Mioceno superior): (A) Depósitos piroclásticos (‘toba basáltica’; Nichols, 1970), con lapilli predominante y bloques dispersos; (B) andesita basáltica sin alteración de la unidad volcánica inferior, con peculiar fisibilidad que le confiere un aspecto lajeado característico; y (C) basalto vesicular. Unidad volcánica superior (Plioceno): (D) Toba pumítica; y (E) toba Don Guiñó, culminando la secuencia volcánica. (F) Riolita (‘intrusión subvolcánica felsica’; Suter *et al.*, 1995), con porosidad secundaria (fantasmas) debida a la disolución cuasi total de los fenocristales.

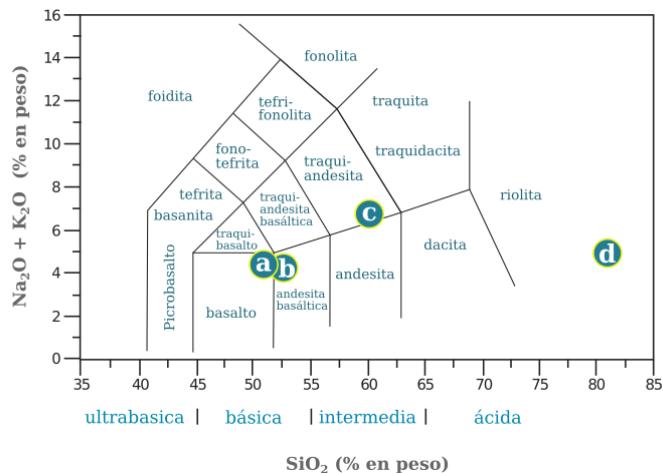


Figura 7. Clasificación química de muestras representativas de las unidades volcánicas de la zona geotérmica de Pathé (análisis y coordenadas disponibles en la Tabla 1), mediante diagrama TAS (del inglés ‘total-alkali silica’; Le Bas, 1986): (a) Basalto: lava vesicular de la Unidad volcánica inferior, Mioceno superior (muestra ‘Yex-16’ en Tabla 1); (b) Andesita basáltica: lava lajeada de la Unidad volcánica inferior, Mioceno superior (muestra ‘Yex-15’ en Tabla 1); (c) Andesita (traquiandesita): toba Don Guiñó de la Unidad volcánica superior, Plioceno (muestra ‘Yex-17’ en Tabla 1); (d) Riolita alta en sílice de la ‘intrusión subvolcánica felsica’ (Suter *et al.*, 1995) (muestra ‘Yex-11’ en Tabla 1).

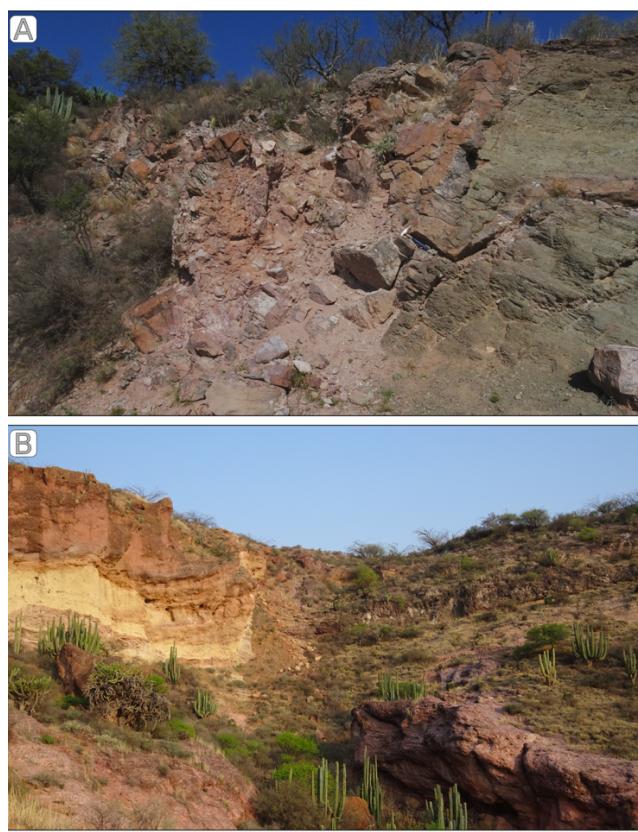


Figura 8. Fallas en la zona geotérmica de Pathé: (A) Brecha tectónica en una falla de dirección E-W que corta a las lavas (andesita basáltica) de la Unidad volcánica inferior (Mioceno superior) (coordenadas: 20°34'20.2"N, 99°42'22.1"W); (B) falla E-W que pone en contacto los depósitos piroclásticos (izquierda) con las lavas de composición andesítica-basáltica que los sobreyenacen (derecha), ambos de la Unidad volcánica inferior (Mioceno superior) (coordenadas: 20°34'27.5"N, 99°42'15.7"W). La ubicación de ambas fotos se muestra en la Fig. 5.

La Unidad volcánica superior, de composición más silícica, aflora únicamente en algunas zonas elevadas de la ZGP, con espesores no mayores a 30 m (Fig. 6E). Consiste en una sucesión de dos unidades de edad Plioceno; de base a techo: (i) ‘toba pumítica’, depositada en un ambiente lacustre (Nichols, 1970) y que se correlaciona, según Carrillo-Martínez (2000), con la Formación Tarango (Segerstrom, 1962), y (ii) ‘Toba Don Guyño’ (Segerstrom, 1962) —o Don Guiño—, de naturaleza félscica, atribuida a una erupción de la Caldera de Huichapan (Ferriz y Mahood, 1986; Aguirre-Díaz y López-Martínez, 2009).

La toba basal (pumítica) forma una capa que yace sobre la Unidad volcánica inferior, y consiste en fragmentos angulares de pómez, con buena clasificación (diámetro de partículas entre 3 y 10 mm), en una matriz limosa de coloración rojiza, no superior al 30% modal (Fig. 6D). Dicho depósito no está consolidado y ha sido objeto de explotación intermitente en unos bancos de material situados 500 m al oeste de las minas de caolín (Fig. 5), donde tiene un espesor no mayor a 5 m. Esta capa presenta granoclasiación positiva e incrementa hacia el techo su proporción de matriz limosa. De esta manera, da lugar gradualmente a una capa de limo y arena, con bloques basálticos dispersos hacia la base y una marcada laminación en sus partes media y superior. Contiene restos fosilizados de plantas (posiblemente tallos y raíces) y algunos horizontes con laminaciones onduladas que podrían corresponder a sismitas.

Sobreyciendo los depósitos vulcanosedimentarios antes descritos y, por lo tanto, culminando las unidades volcánicas de la ZGP, se encuentra la toba Don Guiño (Fig. 6E). En esta zona, dicha toba aparece únicamente en afloramientos relictos, de escasa extensión y con un espesor no mayor a 4 m, representando un emplazamiento muy distal respecto a la Caldera de Huichapan de la que se originó, donde alcanza espesores de más de 100 m y tiene importancia económica como roca dimensionable (SGM, 2012). A diferencia de las capas vulcanosedimentarias, la toba Don Guiño está consolidada y presenta mala clasificación granulométrica, con clastos de hasta 5 cm entre los que se halla obsidiana. El resultado de un análisis químico en roca total indica que su composición es entre andesítica y traquianandesítica (Fig. 7).

Inmediatamente al sur de las manifestaciones termales, se encuentra un afloramiento de ~ 0.2 km² de rocas de composición silícica, a modo de meseta (~ 1700 - 1715 m s.n.m.) (Figs. 5 y 6F), que corresponde a la unidad mencionada en Suter *et al.* (1995) como ‘intrusión subvolcánica félscica’. Las rocas que la componen presentan un aspecto en afloramiento y muestra de mano marcadamente distinto al de las de las unidades volcánicas antes descritas. De gran dureza y coloración clara (blanco, beige y rosado), son masivas y microcristalinas, enteramente silícicas de acuerdo a su apariencia macroscópica (no se observa ninguna fase mineral aparte de la matriz cuarzosa), y tienen porosidad macroscópica posiblemente secundaria (Fig. 6F). Localmente presentan pseudoestratificación, aunque mucho más burda que el lajeado de las lavas de la unidad volcánica inferior. Químicamente es extremadamente rica en sílice (80.97 % en peso; Tabla 1), composición que es compatible con la de una riolita alta en sílice (Fig. 7); esta composición aunada a las relaciones de corte con el resto de unidades nos sugiere una afinidad genética y cronológica con la Unidad volcánica superior, aunque no podemos descartar que sea el producto de una silicificación hidrotermal.

Desde un punto de vista morfoestructural, la ZGP está conformada como un arreglo de bloques de la Unidad volcánica inferior basculados entre 10° y 30° hacia el S y el W, limitados por fallas con direcciones predominantes E-W, N-S y NW-SE (Figs. 5 y 8). Las tobas basales de la Unidad volcánica superior yacen en inconformidad sobre la Unidad volcánica inferior, con las capas en

disposición horizontal o quasi horizontal (Fig. 6E). Únicamente las fallas del sistema E-W parecen afectar a la Unidad volcánica superior (incluido el cuerpo subvolcánico félscico; Fig. 5).

2. ALTERACIÓN HIDROTERMAL

La ZGP desarrolla una notoria alteración hidrotermal superficial, aunque en afloramientos discontinuos, los cuales en conjunto suman una extensión de ~ 0.5 km² (Figs. 5 y 9). Esta alteración fue estudiada por Aguilera (1907), quien describió en detalle su composición mineral, texturas y modo de ocurrencia. La interpretación de esta información de campo le permitió formar una hipótesis del origen hidrotermal de la alteración —incluido el caolín—, atribuyendo su génesis a la circulación de ‘agua caliente’ a través de fracturas y zona porosas de las rocas.

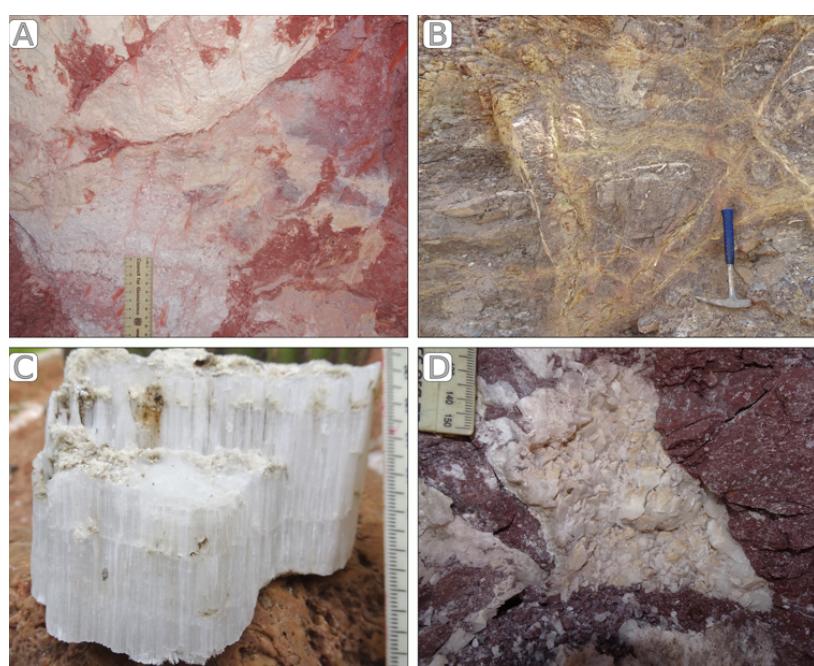


Figura 9. Fotografías de campo de los productos de la alteración hidrotermal en la zona geotérmica de Pathé: (A) Caolín de las antiguas minas de Yexthó, formado por la alteración *pervasiva* de los depósitos piroclásticos de la Unidad volcánica inferior (Mioceno superior); (B) Alteración selectiva en *stockwork* de vetillas de yeso de lavas de la Unidad volcánica inferior (Mioceno superior); (C) espécimen de yeso fibroso de origen hidrotermal recolectado en el trazado de la Falla de Pathé (N-S), en las inmediaciones de las manifestaciones geotérmicas; (D) veta de calcita «hojosa» en una brecha del techo de los depósitos piroclásticos de la Unidad volcánica inferior (Mioceno superior).

De acuerdo con su geometría y distribución en la superficie, la alteración en la ZGP está controlada por fallas (Fig. 5), y se desarrolla predominantemente a expensas de los depósitos piroclásticos de la Unidad volcánica inferior y, más escasamente, en las lavas de la misma unidad. Los depósitos de caolín de Yexthó (Figs. 2B y 9A), de al menos 10 m de espesor, se hallan sobre el trazado de fallas E-W (Fig. 5). Desarrollan una textura masiva y criptocristalina, producto de una alteración *pervasiva* de las cenizas volcánicas (Fig. 9A), aunque localmente preservan texturas relictas de la tefra. Asociado al caolín, en cantidades subordinadas, hay ópalo de aspecto lechoso y textura botroidal. En su parte superior, el depósito de caolín termina de manera abrupta, dando lugar a las lavas andesítico-basálticas. El espectro de reflexión en el infrarrojo de onda corta (λ : 1300–2500 nm) del caolín de Yexthó, obtenido con un equipo LabSpec Pro Spectrophotometer

(Analytical Spec-tral Devices, Inc.) en el Instituto de Geofísica de la UNAM, muestra únicamente —y muy claramente— los rasgos de absorción característicos de la caolinita, $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ (USGS Spectroscopy Lab de Clark *et al.*, 2007), revelando la gran pureza del depósito (Fig. 10).

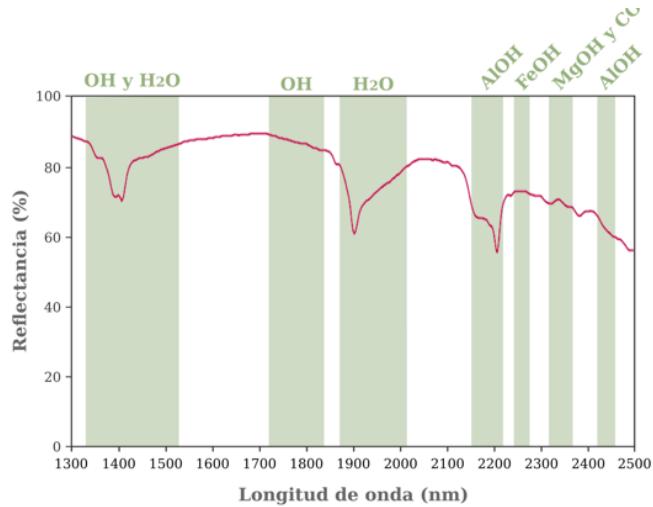


Figura 10. Espectro de reflectancia en el infrarrojo de onda corta (λ : 1300–2500 nm), representativo de los depósitos de caolín de Yexthó (coordenadas: 20°34'13.7"N, 99°42'08.9"W). Los rasgos de absorción revelan que la muestra analizada está compuesta por caolinita $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ de gran pureza. Las bandas de absorción usadas para la identificación mineral (barras verticales) se obtuvieron de Spectral International Inc. (1994).

Por otro lado, la alteración asociada a las fallas N-S es muy distinta en composición y modo de ocurrencia: los minerales predominantes son la calcita y el yeso, emplazados en vetillas de algunos mm hasta 25 cm de espesor. Las vetas están encajonadas en la Unidad volcánica inferior, tanto en los depósitos piroclásticos como en las lavas, y su orientación predominante es N-S (Fig. 11). Localmente forman *stockworks* (Fig. 9B) y pueden presentar brechamiento hidráulico. La calcita desarrolla una textura hojosa, con cristales tabulares de hasta 1 cm (Fig. 9D), mientras que el yeso se presenta en agregados de cristales de hábito fibroso, de hasta 5 cm de longitud (Fig. 9C).

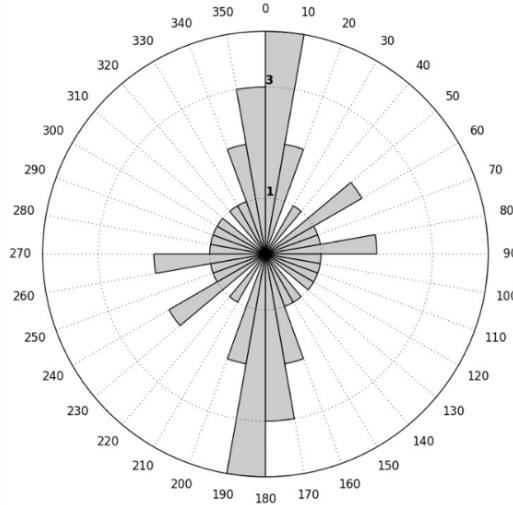


Figura 11. Diagrama de rosa de los vientos ($n = 24$ mediciones) que muestra las orientaciones predominantes de vetillas de calcita de la zona geotérmica de Pathé.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

1. RELEVANCIA HISTÓRICA Y PATRIMONIAL

Durante los siglos XVIII y XIX la ZGP recibió la visita de distinguidos exploradores y científicos, cuyo objetivo era recorrer el territorio mexicano y describir sus recursos naturales. Sin embargo, esas visitas de hecho tenían como destino el Real de Minas de Zimapán, renombrado por su extraordinaria riqueza argentífera desde el periodo colonial temprano (Suter, 2016). Pero la cercanía de éste (situado ~35 km hacia el NE) a la ZGP, aunada a la fama que por aquel entonces tenían las manifestaciones termales de Pathé, debió persuadir a los exploradores a acercarse hasta dicha zona, en ese entonces remota.

Entrando al siglo XIX, la ZGP se convirtió en objeto de interés por sí misma, primero por sus recursos minerales (Aguilera, 1907) y, a mediados de siglo, como fuente de energía (*cf.* Hiriart Le Bert, 2011). Si bien la producción eléctrica fue baja (3.5 MW de capacidad instalada) y duró apenas 13 años (1959–1972), Pathé fue la primera planta geotermoelectrica del continente americano, y forjó capacidades técnicas que le permitieron a México desarrollar otros campos más productivos y alcanzar en 2016 la cuarta posición a nivel mundial en capacidad geotermoelectrica instalada (CeMIEGeo, 2020). Además, dada la necesidad de una transición energética global hacia las fuentes renovables como una medida urgente para afrontar el desafío mundial del cambio climático (*e.g.* Solheim *et al.*, 2018), resulta inverosímil que la ZGP caiga en el olvido.

Al margen de cualquier consideración acerca de su memorable pasado histórico, su singular contexto geológico y la estética particular de su entorno natural, existe desde 1985 un complejo turístico en la ZGP, el cual es considerado por Toscana Aparicio (2017) como un éxito en términos del desarrollo económico de las comunidades. Sin embargo, las instalaciones no cuentan con ningún elemento de interpretación geoturística (*i.e.* paneles informativos sobre la energía geotérmica o sobre el valor histórico y geológico del sitio) que sensibilice e informe al visitante o que promueva la educación. El estudio y eventual restauración de los testimonios que aún quedan de la antigua planta eléctrica deberían hacerse siguiendo los preceptos de la arqueología industrial, en aras de garantizar su conservación para las futuras generaciones. De la misma manera, deberían preservarse los afloramientos rocosos que en el pasado encajonaron las manifestaciones termales.

2. CONDICIONANTES GEOLÓGICOS Y MODELO DEL SISTEMA HIDROTERMAL

Las manifestaciones termales de la ZGP se ubican en una zona de intersección de dos sistemas regionales de fallas, con direcciones N-S y E-W; asimismo, la distribución de las alteraciones está controlada por fallas pertenecientes a dichos sistemas (Fig. 5). Esta característica, junto con la ausencia de vulcanismo reciente (Cuaternario) cerca del área de estudio, permite interpretar la ZGP como un sistema geotérmico convectivo controlado por fallas (*'non-magmatic, extensional domain type'* según la clasificación de Moeck, 2014). Dentro de esta tipología se incluyen numerosos ejemplos de la Faja Volcánica Transmexicana (*e.g.* Cruz Pérez *et al.*, 2018; Canet *et al.*, 2019; Pérez-Martínez *et al.*, 2020). En este tipo de sistemas geotérmicos la energía es transportada hacia la superficie mediante fluidos que ascienden a través de fallas normales, en ausencia de una fuente magmática de calor; el desplazamiento vertical relativo provocado por las fallas es lo que ocasiona que las alteraciones queden expuestas (*e.g.* Faulds y Hinz, 2009).

En la ZGP, las fallas del sistema N-S afectan exclusivamente a la Unidad volcánica inferior, del Mioceno Superior (Nichols, 1970), la cual se presenta segmentada en bloques basculados. Por otro lado la Unidad volcánica superior, del Plioceno (Nichols, 1970), aparece afectada únicamente por las fallas del sistema E-W, lo cual se percibe a nivel regional, ya que localmente las tobas que la componen se disponen horizontalmente y sin evidencia de deformación (Fig. 5). Podemos considerar, por lo tanto, que las fallas N-S son en términos generales más antiguas que las E-W. Asociada a las fallas N-S ocurre la asociación de alteración calcita-yeso, que involucra fluidos ricos en sulfato, oxidados y alcalinos. Para establecer el origen del azufre sería necesario conocer su composición isotópica en el yeso; en tanto no se cuenta con dicha información no se puede descartar una posible removilización hidrotermal desde series evaporíticas del basamento Mesozoico.

La formación de caolinita, claramente ligada a las fallas E-W —y por lo tanto más tardía—, es índice de una alteración argílica avanzada (e.g. Thompson y Thompson, 1996). Este tipo de alteración es característico de zonas de condensación de vapor en sistemas geotérmicos (e.g. González-Partida *et al.*, 2005), de tal modo que ocurre por encima del nivel freático debido a la disolución y oxidación del H_2S , el cual condensa como resultado de la interacción entre el vapor y el acuífero; las condiciones del fluido son un pH muy ácido (2–3) y temperaturas cercanas a los 100 °C (Thompson y Thompson, 1996).

La sucesión de los eventos de alteración, asignables a sendos sistemas de fallas, sugiere que la actividad de la ZGP inició desde antes del Plioceno, tratándose, por lo tanto, de una actividad hidrotermal longeva.

AGRADECIMIENTOS

Nuestro mayor reconocimiento y gratitud a las personas e instituciones mexicanas cuya labor pionera sentó las bases de las investigaciones geológicas actuales, en particular aquellas cuyos trabajos son citados en este artículo. Agradecemos a Xavier M. Canet Franco y a Meritxell Canet Franco por su apoyo incondicional durante el trabajo de campo. Igualmente expresamos nuestro agradecimiento a Michael Vázquez Gómez y Augusto A. Rodríguez Díaz por los análisis mediante espectroscopia de reflexión de las alteraciones hidrotermales, a Iván Gustavo Vallejo Castillo por el modelo digital de elevaciones, al profesor Gregorio Jaén Gaspar por la revisión y traducción de los topónimos de origen *hñähñú*, al M. en C. Miguel Á. Cruz Pérez por las discusiones en campo, y al Lic. Saúl Armendáriz Sánchez por el apoyo documental. Este trabajo se ha beneficiado de las valiosas revisiones realizadas por el Dr. Max Suter, el Dr. Arturo Iglesias y un revisor anónimo, así como del apoyo editorial del Dr. Servando De la Cruz-Reyna y de la Mtra. Andrea Rostan Robledo.

REFERENCIAS

- Aguilera, J.G., 1905, Reseña del Desarrollo de la Geología en México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 1, 35–117.
- Aguilera, J.G., 1907, Los Caolines de la Hacienda de Yexthó: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 3, 25–33.
- Aguirre-Díaz, G.J., López-Martínez, M., 2009, Geologic evolution of the Donguinyó-Huichapan caldera complex, central Mexican Volcanic Belt, Mexico: Journal of Volcanology and Geothermal Research, 179 (1–2), 133–148.
- Arriaga, J.J., 1873, La Exposición Municipal. Artículo V. Productos cerámicos: El Minero Mexicano, tomo I, núm. 37, 4.

- Bárcena, M. 1873, Memoria presentada al Sr. Blas Balcárcel, Director de la Escuela Especial de Ingenieros, por Mariano Bárcena, Director sustituto de la práctica de Mineralogía y Geología en el año de 1872, Díaz Covarrubias, J., Memoria que el encargado de la Secretaría de Justicia e Instrucción Pública presenta al Congreso de la Unión en 15 de septiembre de 1873: México, Imprenta del Gobierno, en Palacio, 201-227.
- Burkart, J., 1836, Aufenthalt und Reisen in Mexico in den Jahren 1825 bis 1834; Bemerkungen über Land, Produkte, Leben und Sitten der Einwohner und Beobachtungen aus dem Gebiete der Mineralogie, Geognosie, Bergbaukunde, Meteorologie, Geographie: Stuttgart, Verlag Schweizerbarth, 1, 392 p.; 2, 286 p.
- Canet, C., Rodríguez-Díaz, A.A., Bernal, I.D., Pi, T., Sánchez-Córdova, M.M., Núñez-Useche, F., Villanueva-Estrada, R., Molina, G., Reich, M., Peláez, B., Jiménez Salgado, E., González-Partida, E., Sandoval Medina, F., Carrillo-Sánchez, C.B., 2019, Consideraciones sobre el sistema geotérmico de San Bartolomé de los Baños, Guanajuato (México), desde un análisis de la alteración hidrotermal y las inclusiones fluidas: Geofísica Internacional, 58-3, 229-246.
- Carrillo Martínez, M., 1998, Normal faulting in the Pathé geothermal area, Central Mexico: Geofísica Internacional, 37, 103-111.
- Carrillo-Martínez, M., 2000, Geología de la Hoja 14Q-e(7) Zimapán, Estados de Hidalgo y Querétaro: México, D.F., Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Carta geológica de México, serie 1:100000, map explanations, 33 p.
- Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo), 2020, Geotermia en México, disponible en <http://www.cemiegeo.org/index.php/geotermia-en-mexico>, consultado el 3 de noviembre de 2020.
- Clark R.N., Swayze G.A., Wise R.A., Livo K.E., Hoefen T.M., Kokaly R.F., Sutley S.J., 2007, USGS Digital Spectral Library splib06a, USGS Digital Data Series, 231, <http://speclab.cr.usgs.gov>, consultado el 3 de noviembre de 2020.
- Cruz Pérez, M.A., Canet Miquel, C., Salgado Martínez, E., Morelos-Rodríguez, L., García Alonso, E., 2018, Geositios, en Canet Miquel C. (coord.), Guía de campo del Geoparque de la Comarca Minera, 1a edición, Instituto de Geofísica-Secretaría de Desarrollo Institucional, UNAM, 150-221.
- Engstrand, I.H.W., 1981, Spanish scientists in the New World, The eighteenth-century expeditions: Seattle, Washington, University of Washington Press, 220 p.
- Faulds J.E., Bouchot V., Moeck I., Oguz K., 2009, Structural controls of geothermal systems in Western Turkey: A preliminary report: GRC Transactions, 33, 375-383.
- Ferriz, H., Mahood, G.A., 1986, Volcanismo riolítico en el eje neo volcánico mexicano: Geofísica Internacional, 25, 117-156.
- Gómez Canedo, L., 1976, La Sierra Gorda a fines del siglo XVIII. Diario de un viaje de inspección a sus milicias: Historia Mexicana, 26 (1), 132-149.
- González Claverán, V., 1988, La expedición científica de Malaspina en Nueva España 1789-1794: México, D.F., El Colegio de México, 528 p.
- González-Partida E., Carrillo-Chávez A., Levresse G., Tello-Hinojosa E., Venegas-Salgado S., Ramirez-Silva G., Pal-Verma M., Tritlla J., Camprubi A., 2005, Hydrogeochemical and isotopic fluid evolution of the Los Azufres geothermal field, Central Mexico: Appl. Geochem., 20, 23-29.
- González-Ruiz, L.E., González-Partida, E., Garduño Monroy, V.H., Martínez, L., Pironon, J., Díaz-Carreño, E.H., Yáñez-Dávila, D., Romero Rojas, W., Romero-Rojas, M.C., 2015, Distribución de Anomalías Geotérmicas en México: Una guía útil en la prospección geotérmica: Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica, nota técnica.
- Hiriart Le Bert, G., 2011, Evaluación de la energía geotérmica en México: Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, 164 p.
- Instituto Nacional para la Investigación de Recursos Minerales, 1952, Memorias de la Primera Convención Interamericana de Recursos Minerales, México, Imprenta Moctezuma, 331 p.
- Le Bas, M.J., Le Maitre, R.W., Streckeisen, A., Zanettin, B., 1986, A chemical classification of volcanic rocks based on the total alkali-silica diagram: Jourary of Petrology. 27, 745-750.

- Mendoza, G., 1875, Notas sobre las fuentes termales de Pathé, traducidas de “Los Viajes en México del Dr. J. Burkart, por el señor socio”: El Propagador Industrial, tomo I, núm. 32, 373.
- Moeck, I.S., 2014, Catalog of geothermal play types based on geologic controls: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 37, 867–882.
- Morelos Rodríguez, L., 2012, La geología mexicana en el siglo XIX. Una revisión histórica de la obra de Antonio del Castillo, Santiago Ramírez y Mariano Bárcena, México: Secretaría de Cultura de Michoacán / Plaza y Valdés, 356 p.
- Morelos Rodríguez, L., Moncada Maya, J.O., 2015, Orígenes y fundación del Instituto Geológico de México: Asclepio, 67, 103.
- Nichols, C.R., 1970, The geology and geochemistry of the Pathé geothermal zone, Hidalgo, Mexico: Norman, Oklahoma, EUA, The University of Oklahoma, tesis doctoral 178 p.
- Nieva, D., Prol-Ledesma, R.M., Romo-Jones, J.M., 2013, La geotermia en el futuro energético sustentable de México: Foro Internacional sobre Energía Geotérmica, *Conference paper*.
- Ordaz Méndez, C.A., Flores Armenta, M., Ramírez Silva, G., 2011, Potencial geotérmico de la República Mexicana: Geotermia, 24, 50–58.
- Pérez-Martínez, I., Villanueva-Estrada, R.E., Cardona-Benavides, A., Rodríguez-Díaz, A.A., Rodríguez-Salazar, M.T., Guadalupe, J., 2020, Hydrogeochemical reconnaissance of the Atotonilco el Alto-Santa Rita geothermal system in the northeastern Chapala graben in Mexico: Geothermics, 83, 101733.
- Segerstrom, K., 1962, Geology of south-central Hidalgo and northeastern México: U.S. Geological Survey Bulletin, 1104-C, 87–162.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2007, Tequisquiapan F14-C67, carta geológico-minera 1:50,000. SGM, Pachuca, Hidalgo, 1 mapa.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM), 2012, Inventario físico de los recursos minerales de la carta Huichapan F14-C78. SGM, Pachuca, Hidalgo.
- Sociedad Geológica Mexicana (SGM), 1904, Asamblea General y Estatutos de la Sociedad Geológica Mexicana: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 1, 15–18.
- Solheim, E., Espinosa, P., Stieglitz, N., 2018, Clean Energy Transition Needs to Accelerate: United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), disponible en <https://unfccc.int/news/clean-energy-transition-needs-to-accelerate>, consultado el 3 de noviembre de 2020.
- Spectral International Inc., 1994, SWIR spectral mineral identification system and spectral database SPECMINTM, vol. II. Integrated Spectronics, CO, USA.
- Suter, M., Carrillo Martínez, M., López Martínez, M., Farrar, E., 1995, The Aljibes half-graben —Active extension at the boundary between the trans-Mexican volcanic belt and the Basin and Range Province, Mexico: Geological Society of America Bulletin, 107, 627–641.
- Suter, M., 2016, Early 19th Century Geologic Studies of the Zimapán Region, Central Mexico: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 68, 215–230.
- Thompson, A.J.B., Thompson, F.J.H., 1996, Atlas of Alteration: A Field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals: Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 120 p.
- Toscana Aparicio, A., 2017, Balneario El Géiser: una experiencia de turismo comunitario en México. Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía, 26, 279–293.
- United States Geological Survey (USGS), 1911, Geologic map of North America. Compiled by the United States Geological Survey in cooperation with the Geological Survey of Canada and Instituto Geológico de Mexico, under the supervision of Bailey Willis and George W. Stose: USGS Professional paper, 71.
- Ward, H.G., 1981, México en 1827: México, Fondo de Cultura Económica, Trad. de Ricardo Hass.
- Wilson, B.W., Hernández, J.P., Meave, T.E., 1955, Un banco calizo en la parte oriental del Estado de Querétaro, México: Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, 18, 1–10.