

Reconocimiento de las asociaciones minerales de alteración y depósitos hidrotermales relacionados con la actividad de los manantiales termales de Araró, Michoacán

David Avalos-Tapia¹, Augusto A. Rodríguez-Díaz², Ruth E. Villanueva-Estrada² y Esther M. Cruz-Gómez¹

¹Facultad de Ciencias de la Tierra, Universidad Autónoma de Nuevo León, Linares, Nuevo León.
Correo: davidavalostapia@hotmail.com. ²Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México.

RESUMEN

En la región de Araró, al oriente del Lago de Cuitzeo, Michoacán, se presentan diversas manifestaciones termales con interés geotérmico, entre las que se destacan Huingo y Los Hervideros. En este trabajo se realiza una evaluación preliminar del potencial geotérmico de la zona, a partir de las asociaciones mineralógicas y alteraciones reconocidas en superficie. Esta investigación está auspiciada por el Proyecto P02 del CeMIE-Geo: *Mapa de provincias geotérmicas de México a partir de la geoquímica de fluidos y distribución de acuíferos*. La caracterización de los minerales se realizó mediante microscopía óptica de luz reflejada y transmitida, y para complementar la identificación de algunos minerales se utilizaron técnicas como difracción de rayos X, espectroscopia de infrarrojo de onda corta y microscopía electrónica. Geológicamente la zona de Araró comprende litologías piroclásticas ácidas y derrames andesíticos afectadas por fallas normales de orientaciones E-W y NW-SE. Estas fallas, además de pertenecer a la estructura general del graben de Cuitzeo, controlan la presencia de los manantiales termales. La alteración hidrotermal se manifiesta de manera discreta, restringida a los alrededores de las manifestaciones, y se compone de ópalo, minerales de arcilla (montmorillonita e illita) y zeolitas. Esta asociación mineralógica representa alteraciones de tipo argílica y silicificación. Los depósitos presentan una laminación fina, coloforme y estromatolítica. Las asociaciones minerales de alteraciones y depósitos permiten tipificar las manifestaciones hidrotermales como activas y fósiles. Las activas corresponden a las descargas termales (zona de Huingo y Los Hervideros) y tienen poco desarrollo. Las fósiles se distribuyen en un patrón NE-SW al oeste de las activas y tienen mayor distribución. Se infiere que un plano de fractura a profundidad (congruente con la alineación de las descargas) funciona como conducto termal desde el reservorio.

Palabras clave: Mineralogía hidrotermal, alteración argílica, silicificación, sínter, petrografía, Huingo, Los Hervideros.

Reconnaissance of mineral alterations and hydrothermal deposits associated to Araró's hot springs activity, Michoacán

ABSTRACT

In the Araró zone, east of Lago de Cuitzeo, Michoacán, there are several superficial manifestations of geothermal interests, highlighting those of Huingo and Los Hervideros. This work presents a preliminary assessment of the geothermal potential based on mineralogical associations and alterations identified in the surface. This research has been funded by the CEMIE-Geo's Project P02: *Map of geothermal provinces of Mexico using fluid geochemistry and aquifer distribution*. The characterization of the minerals was carried out by using reflected- and transmitted-light microscopy, and to complement the identification of some minerals some other techniques were used, like X-Ray diffraction, short-wave infrared and electron spectroscopy. The Araró's geological features include acidic pyroclastic rocks and andesitic flows affected by normal faulting of E-W and NW-SE trending, related to the Cuitzeo graben

structure. These faults control the presence of hot springs. Hydrothermal alteration is restricted to the vicinity of hot springs; it involves a mineral association of opal, zeolites and illite-montmorillonite clay minerals. This mineralogical suite comprises argillic alteration and silicification. Deposits exhibit thin lamination, of colloform and stromatolitic shape. Mineral associations of the deposits allow to classify the thermal manifestations as active and fossil. Active ones match with thermal discharges (Huingo zone and Los Hervideros) and have minor volume. Fossils manifestations are wider and distributed in a NW-SE pattern, located at west of the actives ones. A fracture plane at depth (related to discharge orientation) is inferred to act as a thermal pathway from the reservoir.

Keywords: Hydrothermal mineralogy, argillic alteration, silicification, sinter, petrography, Huingo, Los Hervideros.

1. Introducción

Al norte del campo geotérmico de Los Azufres, ubicado en la porción noreste del estado de Michoacán y operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), existen varias manifestaciones termales con potencial geotérmico localizadas en los límites del Lago de Cuitzeo, entre ellas San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque y la zona de Araró (Figura 1; todas las figuras al final del texto). La zona de Araró es de especial interés geotérmico, a pesar de la escasa información existente. La geología de Araró ha sido brevemente descrita en informes internos de la CFE durante las primeras etapas de exploración en el país (Canul & Rocha, 1983); sin embargo, es en Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín, (2001, 2005) donde se presenta públicamente el marco geológico de una manera más amplia. Además se ha determinado un potencial de producción de 32 MW mediante el método de descompresión gradual (Hiriart *et al.*, 2011).

Araró se encuentra en el interior de una depresión tectónica de dirección general E-W conocida como Graben de Cuitzeo-Maravatío, ubicada en la parte oriental del sector central de la Faja Volcánica Transmexicana y dentro del Campo Volcánico Guanajuato-Michoacán. Esta depresión parece ser parte de una fosa tectónica más grande que se extiende desde Chapala, Jalisco, hasta Tepetongo, México. Las fallas más relevantes, denominadas como Falla Huingo y Falla Araró-Zimirao, presentan la misma dirección de rumbo y posiblemente actúen como conductos para el movimiento de los fluidos hidrotermales, mecanismo similar al que ocurre en el Parque Nacional Yellowstone, EUA (Fournier, 1989). Este mecanismo descrito se presenta de manera similar en el campo de Los Azufres (Molina, 2013). Las rocas que afloran en la zona pueden agruparse en tres unidades: andesitas-basaltos, tobas riolíticas y riolitas vítreas. Además, la actividad volcánica más reciente está representada por derrames lávicos y conos cineríticos de composición adesítica y basáltica.

2. Metodología

Para el estudio de la zona geotérmica de Araró se realizaron dos campañas de muestreo en los sitios con manifestaciones termales superficiales: manantiales activos, zonas con depósitos de sínter y regiones con alteración hidrotermal. En las dos campañas se hizo un reconocimiento geológico de la zona y se recolectaron muestras litológicas, de depósito y alteración hidrotermal. Se seleccionaron las muestras para analizar mediante petrografía de luz transmitida y reflejada, así como las que serían analizadas mediante otras técnicas analíticas, como difracción de rayos X (DRX), espectroscopía de infrarrojo de onda corta (SWIR) y microscopía electrónica de barrido (MEB).

La identificación de minerales y morfologías características de los depósitos de sínter y de rocas volcánicas alteradas se llevó a cabo por medio de la microscopía óptica de luz transmitida y reflejada, utilizando un microscopio Zeiss Axiolab del Instituto de Geofísica de la UNAM. Se capturaron

fotomicrografías de las asociaciones minerales, texturas y organismos mediante un analizador Carl Zeiss Axiocam Emulation.

Se eligió el método de SWIR ya que, además de ser un método relativamente nuevo en el campo de la exploración de recursos naturales como yacimientos minerales (Harraden *et al.*, 2013) y geotermia (Canet *et al.*, 2015), tiene la versatilidad de identificar en un corto tiempo minerales típicos de alteración hidrotermal como arcillas, sulfatos, carbonatos y minerales de amonio. La región de longitud de onda 1300-2500 es la que detecta los cationes y enlaces OH, H₂O, CO₃, SO₄ y NH₄ de los minerales que analiza (Thompson *et al.*, 1999).

Se empleó la técnica de DRX para verificar algunas asociaciones minerales, en particular para definir el tipo de ópalo presente en las muestras de sinter. Se utilizó una metodología convencional en polvo y para minerales de arcilla. Los análisis se efectuaron en un equipo de DRX Shimadzu CRD-6000 con un voltaje de 40kV y una corriente de 30 mA, utilizando radiación de CuK y un monocromador de grafito. Este equipo pertenece al Instituto de Geología de la UNAM. Adicionalmente, para denotar texturas y minerales en cantidades accesorias, se empleó la técnica de microscopía electrónica de barrido (MEB) de bajo vacío o tipo ambiental. La ventaja de este equipo es su facilidad de operación además de que las muestras no requieren una preparación extensiva para su análisis. El MEB utilizado es un Hitachi TM-1000 del Instituto de Geofísica de la UNAM.

3. Resultados

Al sur del poblado de Araró se estudiaron dos regiones con manantiales termales: Huingo y Los Hervideros.

La litología local se compone de andesitas-basaltos como las unidades más antiguas (Pleistoceno Temprano) que afloran en el área y corresponden a los escarpes de la Falla Huingo. Tobas riolíticas, con una edad proximada de 1.2 a 0.9 Ma, afloran en superficie de manera adyacente a las andesitas-basaltos (Casarrubias *et al.*, 1990). Una unidad de riolita vítrea aflora en escasos sitios al suroeste del área de estudio, pero se reportó su presencia en los pozos perforados por la CFE, a partir de los 36 metros de profundidad (Departamento de Exploración, 1989; Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín, 2001). Además, se presentan depósitos aluviales que corresponden al antiguo límite del Lago de Cuitzeo (Figura 2).

El manantial termal de Huingo presenta emanaciones difusas con descarga de líquido y gas desde un sustrato de sedimentos con una temperatura de descarga de 71°C y pH de 7.3. Dentro y alrededor del manantial termal se observaron sedimentos mineralizados, costras y agregados coloformes, y depósitos estromatolíticos. Los sedimentos se componen de partículas de granulometría fina (arena fina-arcillas) compuestas de silicatos y precipitados de minerales hidrotermales. Los precipitados minerales incluyen illita, esmectita, ópalo y pirita. Las costras y agregados coloformes están compuestos principalmente de ópalo, con laminaciones discontinuas de óxidos de hierro y calcita.

Los depósitos estromatolíticos son de tipo silíceo, con ocasionales bandas coloformes de carbonatos, que se encuentran distales de la zona de descarga principal y crecen a partir del sustrato rocoso o de las paredes de canales de descarga del agua termal hacia los baños de Huingo. Presentan una textura coloforme, propia de manantiales con temperaturas de ~100°C (Lynne, 2013), además de restos de plantas y organismos atrapados dentro de los mismos (Figuras 3 y 4). Asociados a estos desarrollos estromatolíticos se encuentran tapetes microbianos de colores verde y ocre, de textura musgosa; su mayor desarrollo se observa en los canales de descarga hacia el balneario.

Por su parte, los dos manantiales termales de Los Hervideros afloran en el cauce de un arroyo local. El primero es un manantial termal de líquido y gas con una temperatura de 92°C, con emanaciones a presión y una periodicidad cíclica de 45 segundos; el segundo es una poza de lodo con 90°C de temperatura y un pH de 8.12. Los depósitos asociados a ambos manantiales son sedimentos mineralizados y pátnas. Los sedimentos se componen de la asociación de illita, esmectita, ópalo, pirita y casiterita. Las pátnas ocurren alrededor de las emanaciones extendiéndose un par de metros, denotando la dirección del flujo de una descarga pasada. La asociación mineral de estos depósitos es illita, esmectita, halita y una fase de sulfatos, probablemente alcalinos (Figura 5).

Adyacente a los manantiales termales existe un desarrollo difuso de alteración hidrotermal de tipo argílica, denotada principalmente por la presencia de esmectita, que se distribuye de forma alargada y se relaciona con un probable lineamiento que favorece la descarga y mineralización. Los manantiales de Huingo, Los Hervideros y La Salud (al sur del área de estudio), presentan una alineación de NW30°, presumiendo la presencia de una falla que favorece la circulación de fluidos termales a la superficie. Esta circulación se evidencia en el crecimiento de los sínter, que reflejan una actividad termal pasada.

Las asociaciones minerales (illita, esmectita, ópalo y sulfatos y sulfuros) y el tipo de alteración detectada (argílica), son congruentes con las condiciones del fluido de descarga ($T < 100^{\circ}\text{C}$ y pH alrededor del neutro), tal como ocurre en otros campos geotérmicos (Browne & Ellis, 1970; Thompson & Thompson, 1996; Canet *et al.*, 2010; Canet *et al.*, 2015). La predominancia del ópalo con respecto a otras fases cristalinas de sílice (p.e. cristobalita), sugiere temperaturas por debajo de los 150°C y pH alrededor del neutro (White & Hedenquist, 1995) (Figura 6).

4. Conclusiones

Mediante el estudio de asociaciones minerales, como las de ópalo-esmectita-illita-sulfatos y sulfuros identificados en esta zona y resultantes de la actividad hidrotermal, se pueden determinar características fundamentales de los fluidos hidrotermales y del reservorio, tales como temperatura y actividad de la emanación (80 a 100°C con baja energía) y pH (cercano al neutro). El análisis de depósitos y alteraciones en un región con actividad geotérmica es un útil método inicial de exploración. Los pronósticos que se pueden realizar a partir de esta metodología coinciden en este caso con lo que se ha obtenido mediante la perforación del pozo exploratorio Z-3, realizada anteriormente por la CFE.

Referencias

- Browne, P. R., & Ellis, A. J. (1970). The Ohaki-Broadlands hydrothermal area, New Zeland; mineralogy and related geochemistry. *American Journal of Science* 269 (2), 97-131.
- Canet, C., Arana, L., González-Partida, E., Pi, T., Prol-Ledesma, R.M., Franco, S.I., & López-Hernández, A., 2010. A statistics-based method for the short-wave infrared spectral analysis of altered rocks: An example from the Acoculco Caldera, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Geochemical Exploration*, 1-10.
- Canet, C., Hernández-Cruz, B., Jiménez-Franco, A., Pi, T., Peláez, B., Villanueva-Estrada, R.E., & Salinas, S., 2015. Combinig ammonium mapping and short-wave infrared (SWIR) reflectance spectroscopy to constrain a model of hydrothermal alteration for the Acoculco geothermal zone, Eastern Mexico. *Geothermics*, 53, 154-165.
- Canul, D., & Rocha, V.S., 1983. Estudio geológico con fines geotérmicos en la región norte del Estado de Michoacán: Reporte 7/83, Departamento de Exploración, CFE. Inédito.

- Casarrubias, Z., Izunza, G., & Contreras, V., 1990. Estudio geológico de detalle de la zona geotérmica de Araró-Zimirao, Michoacán. CFE, Reporte interno No. 01-90. Inédito.
- Cepeda, J., & Henry, C., 1983. Oligocene volcanism and multiple caldera formation in the Chinata Mountains, Presidio County, Texas. *Bur. Econ. Geol. Rept. Inv.*, 135, 32.
- Departamento de Exploración, 1989. Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica de Araró, Mich. CFE, Reporte Interno No. 10-89. Inédito.
- Fournier, R., 1989. Geochemistry and dynamics of the Yellowstone National Park hydrothermal system. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 17, 13-53.
- Gutiérrez-Negrín, L., Maya-González, R., & Quijano-León, J., 2015. Present Situation and Perspectives of Geothermal in Mexico. *Proceedings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, 19-25 April 2015.
- Harraden, C., McNulty, B., Gregory, M., & Lang, J., 2013. Shortwave infrared spectral analysis of hydrothermal alteration associated with the pebble porphyry Copper-Gold-Molibdenum Deposit, Iliamna, Alaska. *Economic Geology*, 108, 483, 494.
- Hiriart Le Bert, G., L.C.A. Gutiérrez Negrín, J.L. Quijano León, A. Ornelas Celis, S. Espíndola e I. Hernández, 2011. *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía. México, DF, Mayo de 2011.
- Lynne, B., 2013. Siliceous sinter: an early exploration tool and direct link to geothermal reservoir. *38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, 11-13 February 2013.
- Molina, A., 2013. *Case history of Los Azufres-Conceptual modelling in a Mexican geothermal field*. Santa Tecla, El Salvador: UNI-GTP-LaGeo.
- Thompson, A.J., & Thompson, F.J., 1996. *Atlas of Alteration: A Field and Petrographic Guide to Hydrothermal Alteration Minerals*. Geological Association of Canada, Mineral Deposits Division, 120 p.
- Thompson, A., Hauff, P., & Robitaille, A., 1999. Alteration mapping in exploration: Application of short-wave infrared (SWIR) spectroscopy. *Society of Economic Geologists Newsletter*, 39, 16–27.
- Viggiano-Guerra, J.C., and L.C.A. Gutiérrez-Negrín, 2001. Characteristics of the Araró, Mich. (Mexico), Geothermal Zone. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 25, pp. 369-374.
- Viggiano-Guerra, Julio C., and Luis C.A. Gutierrez-Negrin, 2005. The geothermal system of Araró, Mexico, as an independent system of Los Azufres. *Proceedings of the World Geothermal Congress*, Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- White, N., & Hedenquist, J., 1995. Epithermal gold deposits: styles, characteristics and exploration. *Society of Economic Geologist Newsletter*, 23, 9-13.

FIGURAS

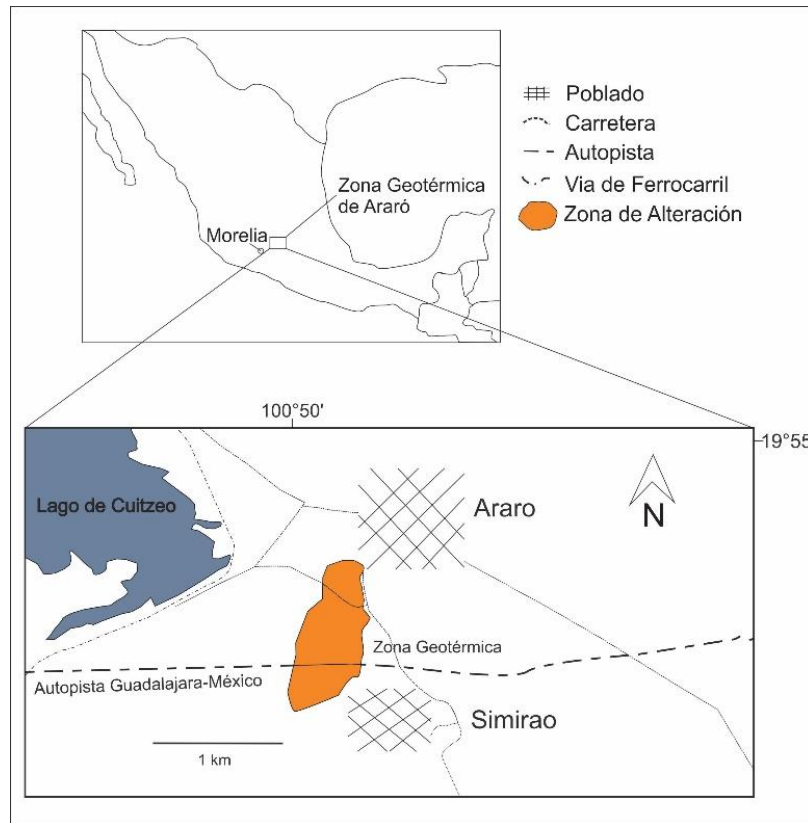


Figura 1. Localización del área de estudio. La región de Huingo se encuentra al SW del poblado de Araró.

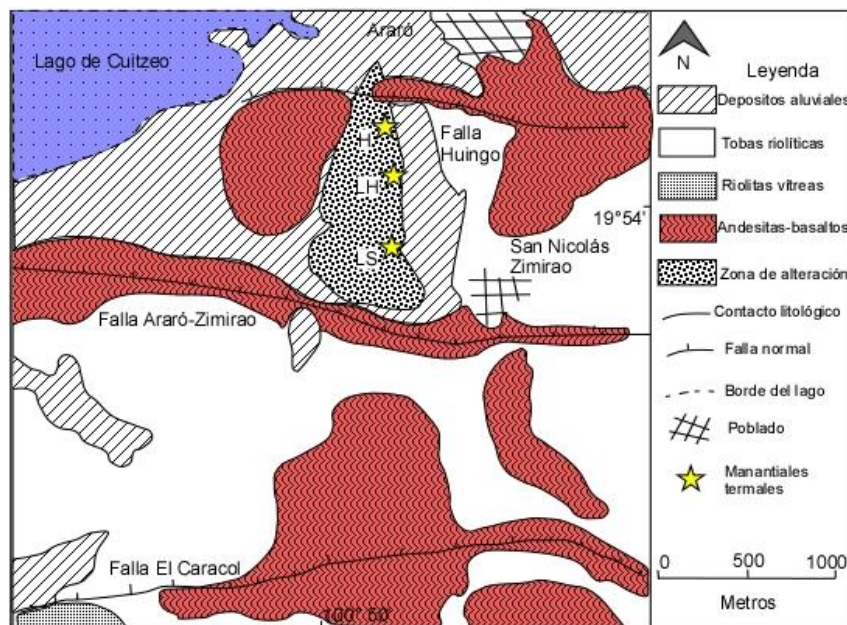


Figura 2. Mapa geológico generalizado de la región de Araró. H: Huingo, LH: Los Hervideros; LS: La Salud. (Modificado de Viggiano-Guerra & Gutiérrez-Negrín, 2005.)

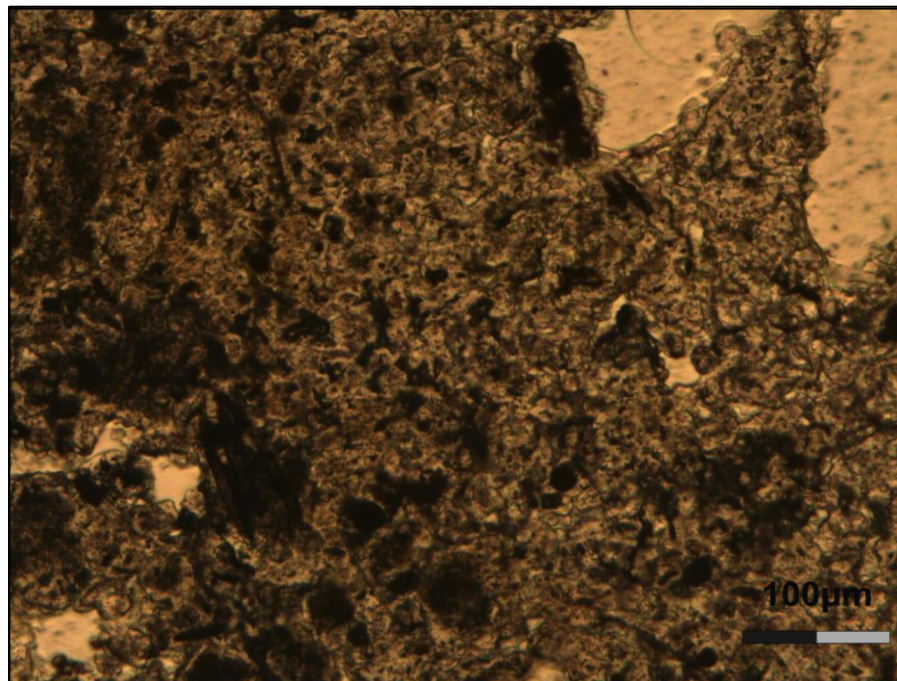


Figura 3. Fotomicrografía que muestra una textura predominante de tipo coloforme presente en los depósitos de sínter de los balnearios de Huingo. Muestra MAR-5, objetivo 10x, nicols paralelos.

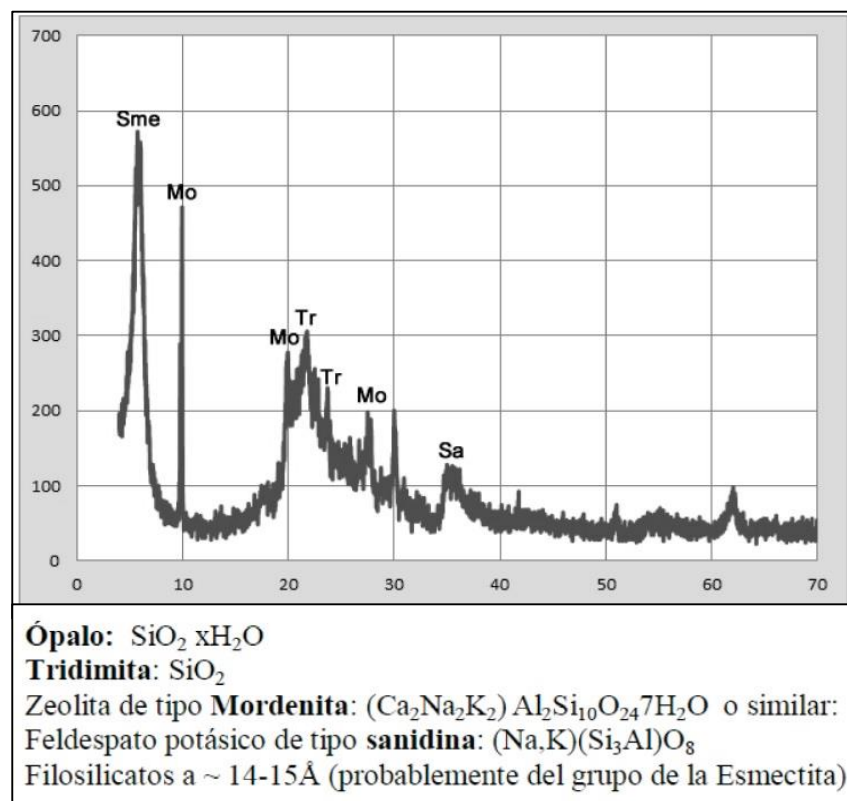


Figura 4. Resultados de análisis por DRX; muestra de sínter MAR-5 del área Huingo.

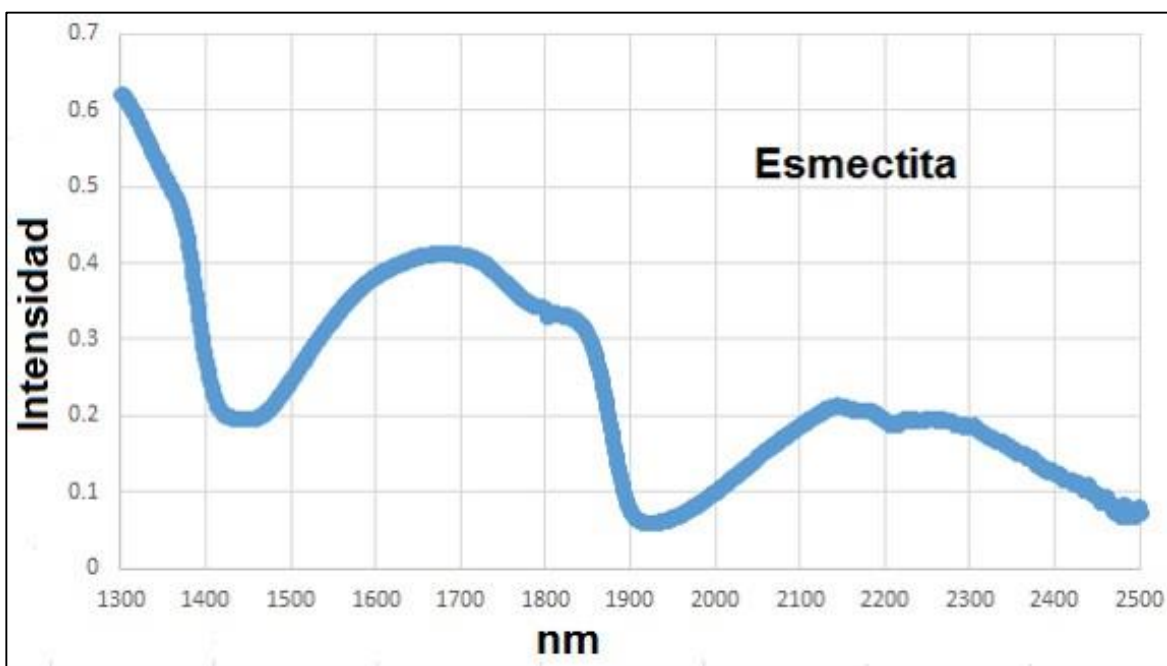


Figura 5. Mineral de esmectita detectado mediante análisis de SWIR en pátinas desarrolladas alrededor de las emanaciones de Los Hervideros.

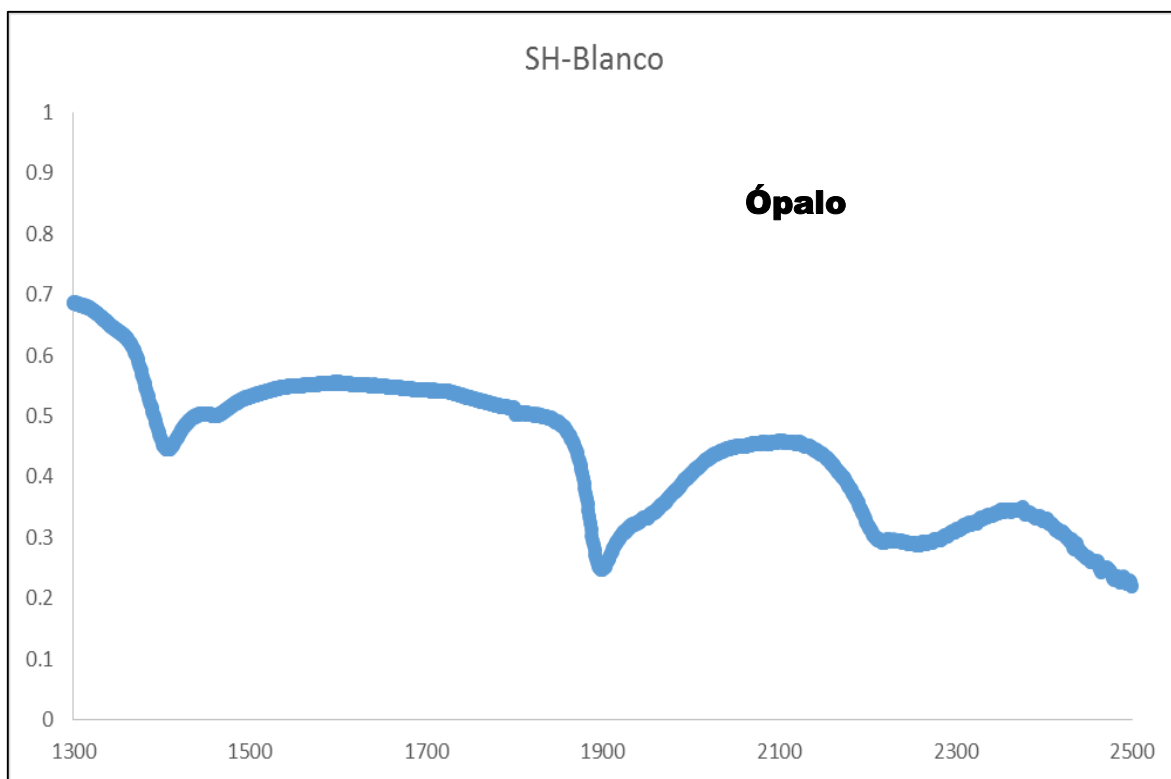


Figura 6. Espectro de SWIR en muestra SH. El patrón coincide con el mineral ópalo.