

## Análisis de la mineralogía hidrotermal y su relación con la cinemática en el Lago de Cuitzeo, Mich.

Addí Emanuel Maciel Rivera, Víctor Hugo Garduño Monroy y Mikhail Ostroumov

CeMIE-Geo e Instituto de Investigaciones en Ciencias de la Tierra, Universidad Michoacana de San

Nicolás de Hidalgo, Morelia, Mich. Correo: [addi\\_semi@hotmail.com](mailto:addi_semi@hotmail.com)

### RESUMEN

Para comprender la evolución estructural de una zona geotérmica es necesario entender las variaciones de los esfuerzos que la han afectado a través del tiempo, mismos que controlan la apertura y cierre de las fallas y fracturas que permiten la circulación de los fluidos en el probable yacimiento geotérmico. Desde el punto de vista tectónico, el Lago de Cuitzeo se localiza en la región perteneciente al límite sur de la zona de fallas Zacapu-Salvaterra, así como dentro del sector Este del sistema de fallas activas Morelia-Acambay, que tiene una orientación preferencial E-W y corta longitudinalmente la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). En las márgenes del lago se conocen unas cuatro zonas geotérmicas (Araró, San Agustín del Maíz, San Agustín del Pulque y Chucándiro). El objetivo del presente trabajo es definir la evolución de los sistemas geotérmicos presentes en la zona en función del sistema de fallas regionales, del campo de esfuerzos actual, y de la interacción con las estructuras más antiguas. Para ello se define la afectación estructural de fallas asociadas a distintos rellenos y la aparición de minerales neoformados durante las rupturas de las mismas. Además, por medio de la caracterización mineral (de relleno y neoformados) presente en las estructuras, así como de su fechamiento, se propone una evolución del termalismo relacionada con la cinemática en el área.

*Palabras clave:* Mineralogía, geología estructural, cinemática, campo de esfuerzos, sistemas geotérmicos, Cuitzeo.

### 1. Introducción

Reconocer las diversas alteraciones hidrotermales relacionadas con actividad hidrotermal-magmática reciente o en proceso es una parte fundamental de toda exploración geotérmica. Adicionalmente, la relación de las zonas de falla con la percolación de fluidos geotérmicos puede reflejarse en la distribución de las alteraciones en superficie, proporcionando información de las vías de flujo del sistema hidrotermal y las respuestas mineralógicas de las rocas ante los cambios ocasionados por la interacción agua-roca.

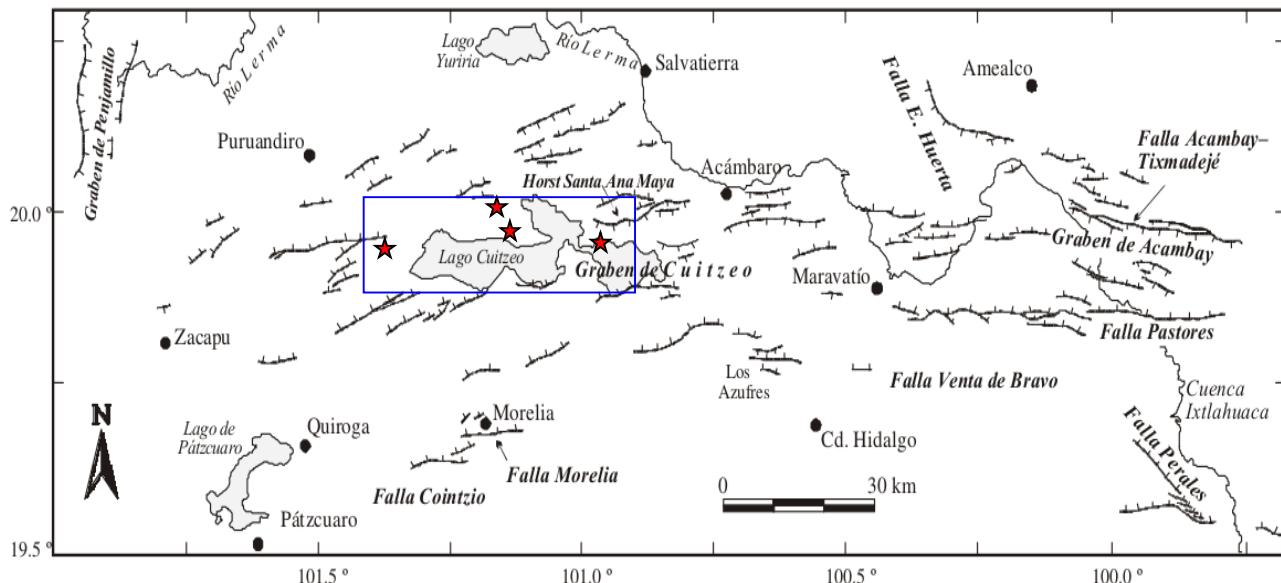
La alteración hidrotermal ocurre a través de la transformación de fases minerales, el crecimiento de nuevos minerales, la disolución y/o precipitación y las reacciones de intercambio iónico entre los minerales constituyentes de una roca y el fluido caliente que circuló por ella (Arenivar, 2012). El estudio de las alteraciones hidrotermales representa una base importante para reconocer las características de un sistema geotérmico. De su estudio se puede determinar la paragénesis de los minerales de alteración y sus características físico-químicas, temperatura y variaciones del fluido. De ahí la importancia de caracterizar los tipos de alteración hidrotermal asociados a un sistema geotérmico, lo que permite inferir la evolución del sistema termal a través del tiempo (Forero-Herrera, 2012).

En yacimientos geotérmicos alojados en rocas volcánicas, la mayor parte de la permeabilidad es aportada por las fallas y fracturas interconectadas, las cuales facilitan el flujo del agua geotérmica a través de ellas; esto es así porque debido a sus características intrínsecas este tipo de rocas tiene una permeabilidad baja o nula (Barnicoat *et al.*, 2009, Tagami, 2012). Una vez identificados los minerales de origen hidrotermal en una zona geotérmica activa o extinta, se pueden fechar mediante diferentes

métodos que dependen de la especie mineral de la que se trate. Así, en algunos campos geotérmicos se han datado depósitos de travertinos mediante el procedimiento de uranio-torio (U-Th) (Brogi *et al.*, 2010). Con ello se puede obtener una edad probable para el inicio y el final de la actividad geotérmica (en campos extintos) así como de la actividad de fallas que ahí se encuentran.

El Lago de Cuitzeo se localiza en la región centro-norte del estado de Michoacán y sur del estado de Guanajuato. Tectónicamente se encuentra en la región perteneciente al límite sur de la zona de fallas Zacapu-Salvatierra, que se encuentra definida por un grupo de alrededor de 25 fallas con actividad cuaternaria en el área delimitada en el norte y este por el Río Lerma y al sur por el Lago de Cuitzeo (Suter *et al.*, 2001). También se encuentra dentro del sector oriental del sistema de fallas activas Morelia-Acambay, que tiene una orientación preferencial E-W y corta longitudinalmente la parte central de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM). El Sistema de Fallas activas Morelia-Acambay (Fig. 1) representa tectónicamente una de las estructuras más relevantes de la región. En su porción occidental, esta estructura presenta una inclinación al norte, basculando al sur a las secuencias volcánicas del Mioceno-Plioceno. Su parte oriental se caracteriza por una estructura tipo graben formado por las fallas Epitacio Huerta y Acambay-Tixmadejé, al norte, y las fallas Venta de Bravo y Pastores, al sur, que exhiben una pequeña componente lateral izquierda (Suter *et al.*, 1992; Suter *et al.*, 1995b, en Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

En las márgenes del lago existen cuatro localidades con manifestaciones hidrotermales, que son de oeste a este: Chucándiro, San Agustín del Pulque, San Agustín del Maíz y Araró (Fig. 1).



**Figura 1. Mapa con la localización de la zona de estudio (recuadro azul), las fallas cuaternarias activas del sistema Morelia-Acambay, y la ubicación localización de cuatro zonas geotérmicas (estrellas) (modificado de Suter *et al.*, 2001).**

El objetivo del presente trabajo es definir la evolución de los sistemas geotérmicos presentes en la zona en función del sistema de fallas regionales, del campo de esfuerzos actual, y de la interacción con las estructuras más antiguas. Para ello se define la afectación estructural de fallas asociadas a distintos rellenos y la aparición de minerales neoformados durante las rupturas de las mismas. Además, por

medio de la caracterización mineral (de relleno y neoformados) presente en las estructuras, así como de su fechamiento, se propone una evolución del termalismo relacionada con la cinemática en el área.

## 2. Metodología

La metodología a seguir para la elaboración del presente trabajo incluyó trabajo de gabinete, de campo y de laboratorio. Durante el primero se realizó la revisión bibliográfica correspondiente y se identificaron las zonas con evidencias morfológicas de fallas y fracturas cercanas a las zonas geotérmicas, para lo cual se generaron modelos digitales de elevaciones, modelos de sombras y se analizaron imágenes aéreas.

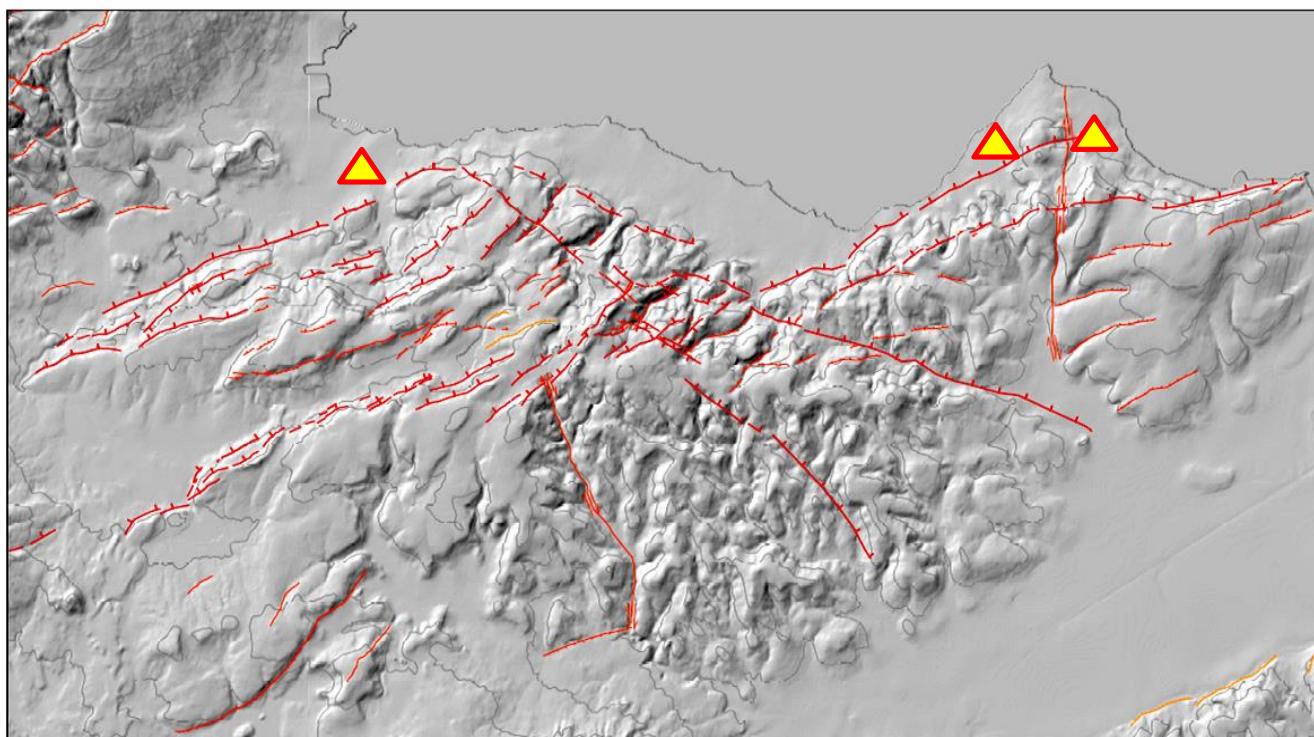
El trabajo de campo comenzó por la identificación de indicadores cinemáticos que evidencian el desplazamiento de las fallas, confirmando así las estructuras identificadas en el trabajo de gabinete. Así mismo se identificaron y muestraron las fallas con relleno mineral, tomando los datos estructurales de dichas fallas, coordenadas, fotografías, descripción litológica y notas sobre superposición de estructuras y rellenos (en caso de haberlos). Una vez obtenidas las muestras se procedió al trabajo de laboratorio comenzando con la limpieza e identificación mineralógica visual de cada muestra, para posteriormente pulverizar las muestras hasta la fracción de arcillas, preparándolas para análisis de difracción de rayos X (DRX) y electroscopía infrarroja (EIR). Estos análisis se realizaron en las instalaciones de la UMSNH, por el Dr. Mikhail Ostromov. Una vez que se caracterizaron los minerales procedentes de cada muestra, se procedió a definir el ambiente de formación de cada mineral por medio de sus características físico-químicas, así como la relación de la actividad geotérmica con la actividad de la falla en que se recolectó cada muestra.



**Figura 2. Izquierda:** Fractura rellena con minerales hidrotermales. **Derecha:** Falla con dirección N-S identificada durante el trabajo de campo, la cual desplaza unidades andesíticas e ignimbriticas.

## 3. Resultados

Entre los resultados se obtuvo un mapa estructural de la zona suroeste del Lago de Cuitzeo, en el cual se evidencia el dominio estructural de las fallas este-oeste pertenecientes al sistema de fallas activas Morelia-Acambay, además de una serie de estructuras con dirección noroeste-sureste y las estructuras norte-sur. Las estructuras que se muestran en el mapa se localizan entre dos zonas geotérmicas: al oeste se ubica la zona de Chucándiro y al oriente la de San Agustín del Maíz. Al tener estas zonas geotérmicas activas e interactuando con las estructuras geológicas, se incrementa la posibilidad de localizar fallas con indicadores cinemáticos y rellenos de minerales hidrotermales.



**Figura 3. Mapa estructural de la zona suroeste del Lago de Cuitzeo. Los triángulos ubican las zonas geotérmicas de Chucándiro al oeste y de San Agustín del Maíz al oriente.**

En la Tabla 1 se presentan los resultados de los análisis de DRX y EIR para las muestras de las fallas con dirección preferencial Este-Oeste (E-O). Se observa que en las muestras pertenecientes a fallas normales sólo se identificó calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) como mineral de relleno. Sin embargo, en las muestras tomadas en la brecha de falla y en la falla lateral izquierda, que también tienen la misma dirección E-O, se observa como mineral común la saponita ( $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), identificada en ambos métodos, además de feldespatos, estos sólo detectados mediante DRX.

En la Tabla 2 se presentan resultados mineralógicos de las muestras pertenecientes a fallas secundarias y fallas normales con dirección preferencial N-S. En este caso, la saponita ( $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ) y los feldespatos, que son del grupo de las plagioclasas (Pl (Ab-An), Na( $\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ) - Ca( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ )) son los minerales en común para el material de relleno de ambas muestras, aunque estos sólo se identificaron mediante DRX.

Muestras	DRX	EIR
Falla normal E-O	Calcita: $\text{CaCO}_3$	Calcita: $\text{CaCO}_3$
Brecha de falla E-O	Celadonita-1M: $\text{KFe}^{2+}\text{AlSi}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2\text{KFe}^{2+}\text{Fe}^{3+}\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ Saponita: $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Feldespatos: PI (Ab-An), Na( $\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ) - Ca( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) y Sanidina K( $\text{AlSi}_3\text{O}_8$ )	Saponita: $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Celadonita-1M: $\text{KFe}2+\text{AlSi}4\text{O}10(\text{OH})2-$ $\text{KFe}2+\text{Fe}3+\text{Si}4\text{O}10(\text{OH})2$
Falla lateral izquierda E-O	Paligorskita (“piel de roca”): $(\text{Mg}, \text{Al})_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}) \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Saponita: $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Feldespatos: PI (Ab-An), Na( $\text{AlSi}_3\text{O}_8$ ) - Ca( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ) y Sanidina K( $\text{AlSi}_3\text{O}_8$ )	Saponita: $\text{Ca}_{0.3}(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_3(\text{Si}, \text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$

**Tabla 1. Mineralogía identificada mediante los métodos de difracción de rayos X (DRX) y electroscopía infrarroja (EIR) en muestras tomadas en rellenos de fallas de dirección este-oeste (E-O) y brechas de falla.**

Para la falla normal con dirección preferencial este-oeste se observa una asociación mineralógica con características propias de una alteración propilítica, con rangos de temperatura de 200 a 250°C y resultado de la interacción de fluidos con pH neutro a alcalino. Por su parte la presencia de celadonita en la brecha de falla puede indicar que probablemente el depósito ocurrió lejos del yacimiento geotérmico (Tabla 1).

Las fallas secundarias (Tabla 2) se caracterizan por poseer minerales propios de una alteración argílica moderada, con rangos de temperatura de 150-200°C, así como un pH ácido, de entre 3 y 4. Por otro lado la mineralogía identificada en la falla normal se dirección N-S es más propia de una alteración propilítica, producto de una temperatura más elevada (200-250°C).

#### 4. Conclusiones

Los depósitos de calcita en las fallas normales del sistema este-oeste y de las fallas N-S, son producto de un régimen geotérmico con aguas ricas en carbonatos con rango de temperatura superior al de los depósitos hallados en el relleno de fallas laterales y de las brechas de falla de los sistemas tanto este-oeste como N-S. Esto parece indicar la existencia de al menos dos eventos de alteración hidrotermal,

que actuaron en diferentes tiempos, y que dieron lugar a depósitos diferentes en las fallas normales a los de las fallas laterales y secundarias.

Se considera necesario ampliar la zona de muestreo para comparar los minerales de relleno que fueron depositados en las cercanías de las demás zonas geotérmicas del Lago de Cuitzeo. Esto permitirá determinar las diferencias mineralógicas entre los mismos y la dilucidar mejor la evolución que ha tenido cada zona.

Muestras	DRX	EIR
Fallas secundarias	<p>Celadonita:  <math>KFe^{2+}AlSi_4O_{10}(OH)_2-KFe^{2+}Fe^{3+}Si_4O_{10}(OH)_2</math></p> <p>Saponita:  <math>Ca_{0.3}(Fe^{2+},Mg,Fe^{3+})_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O</math></p> <p>Goethita:  <math>FeO(OH)</math></p> <p>Halloisita:  <math>Al_2Si_2O_5(OH)_4</math></p> <p>Feldespatos:  <math>Pl(Ab-An), Na(AlSi_3O_8) - Ca(Al_2Si_2O_8)</math></p>	<p>Celadonita:  <math>KFe^{2+}AlSi_4O_{10}(OH)_2-KFe^{2+}Fe^{3+}Si_4O_{10}(OH)_2</math></p>
Fallas N-S	<p>Calcita:  <math>CaCO_3</math></p> <p>Saponita:  <math>Ca_{0.3}(Fe^{2+},Mg,Fe^{3+})_3(Si,Al)_4O_{10}(OH)_2 \cdot 4H_2O</math></p> <p>Montmorillonita:  <math>(Na,Ca)_{0.3}(Al,Mg)_2Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O</math></p> <p>Clinoptilolita:  <math>Ca_3(Si_{30}Al_6)O_{72} \cdot 20H_2O</math></p> <p>Feldespatos:  <math>Pl(Ab-An), Na(AlSi_3O_8) - Ca(Al_2Si_2O_8)</math></p>	<p>Calcita:  <math>CaCO_3</math></p>

**Tabla 2. Mineralogía identificada mediante los métodos de difracción de rayos X (DRX) y electroskopía infrarroja (EIR) en muestras tomadas en rellenos de fallas secundarias y fallas normales de dirección norte-sur (N-S).**

Con base en las fechas que se obtengan de los minerales de relleno, se elaborará un modelo de la evolución del sistema de esfuerzos que ha afectado a las zonas geotérmicas a través del tiempo, lo cual servirá, además para obtener una edad absoluta de la actividad tectónica en la zona.