

## **Estudio experimental del comportamiento de las rocas del yacimiento de Los Humeros, Puebla, ante soluciones ácidas**

**Georgina Izquierdo Montalvo<sup>1</sup>, Magaly Flores Armenta<sup>2</sup>, Miguel Ramírez Montes<sup>2</sup>, Pablo García Manuel<sup>1</sup> y Aldo Azoños Figueroa<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, México. Correo: [gim@ie.org.mx](mailto:gim@ie.org.mx). <sup>2</sup>Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Comisión Federal de Electricidad, México. <sup>3</sup>Instituto Tecnológico de Ciudad Madero, Ingeniería en Geociencias, Cd. Madero, Tamaulipas.

### **Resumen**

En México recientemente se ha empleado la estimulación ácida en los campos geotérmicos de Los Azufres, Mich., y de Las Tres Vírgenes, BCS, para tratar de mejorar la producción de los pozos, y a corto plazo se espera utilizarla también en pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Por ello, y a fin de anticipar la respuesta ante soluciones ácidas de las rocas del yacimiento de este campo, se diseñó un experimento para caracterizar las condiciones petrofísicas, químicas y mineralógicas de fragmentos de núcleos de los pozos antes y después de ser expuestos a dos soluciones ácidas comúnmente utilizadas para estimular pozos geotérmicos: una es HCl diluido al 10% y la otra una mezcla de HCl al 10% y de HF al 5%. Las pruebas se realizaron a presión atmosférica y a temperatura controlada. Los resultados indican que la reacción de la roca depende de su composición, del tipo de mineral secundario formado entre fracturas y oquedades y de la intensidad de la alteración. La calcita que se encontraba relleno oquedades, vetas y micro fracturas reacciona rápidamente dejando huecos y mejorando la permeabilidad. Otros minerales como el cuarzo y la epidota reaccionan lentamente a nivel superficial dejando gran parte de la matriz de la roca sin reaccionar. Las soluciones ácidas se conservaron por varios días sin detectarse precipitación de productos secundarios. La permeabilidad se incrementa notablemente como producto del tratamiento con la mezcla ácida.

### **Introducción**

La disminución de la producción es un proceso natural tanto en un yacimiento de petróleo como en un yacimiento geotérmico. Otra causa común que reduce la producción es la obstrucción de la formación rocosa y/o de las tuberías del pozo, sea por la acumulación de lodos y recortes de perforación, por depósito de minerales secundarios en fracturas y oquedades, o bien por incrustaciones tanto en las tuberías y en las paredes rocosas.

Para minimizar o eliminar los efectos de incrustaciones y restaurar o mejorar la permeabilidad, son varias las metodologías empleadas. Entre ellas están los tratamientos ácidos, el fracturamiento hidráulico, el fracturamiento térmico y la estimulación química.

Entre los tratamientos ácidos se conocen tres tipos: lavado ácido, acidificación matricial y fracturamiento ácido. El primero se refiere simplemente a la limpieza del pozo para eliminar incrustaciones. La acidificación matricial se refiere a la inyección de soluciones ácidas por debajo de la presión de fracturamiento. El fracturamiento ácido es el bombeo de una solución ácida arriba de la presión de fracturamiento de la formación.

La acidificación o estimulación ácida de pozos es la técnica de estimulación más antigua que sigue empleándose en la actualidad. Los primeros tratamientos, y la mayoría de ellos, se han realizado con

muy buenos resultados en campos petroleros. En sistemas geotérmicos su aplicación es reciente. Durante la última década esta metodología se ha llevado a cabo en algunos campos geotérmicos en el área de Salton Sea (EUA), Filipinas, Indonesia y América Latina. En México recientemente se han estimulado algunos pozos del campo de Los Azufres, Mich. A diferencia de la mayoría de los yacimientos de petróleo, estos yacimientos están contenidos en rocas ígneas básicamente de composición andesítica.

La acidificación matricial se ha aplicado en calizas y areniscas, donde es común el depósito de calcita. Teóricamente los ácidos fluyen a través del sistema de poros de la roca formando canales llamados “wormholes”. El ácido penetra en la roca más allá de la zona cercana al pozo mejorando la producción. Esta técnica se extendió con éxito a la industria geotérmica en pozos cuya producción se ha reducido sea por obstrucción en los poros y fracturas o por formación de incrustaciones. Las soluciones comúnmente empleadas son HCl al 10 % y, para disolver silicatos y sílice, una mezcla de HCl al 12 % y de HF al 3 % (Malate *et al.*, 1998; Sandrine *et al.*, 2009).

Otros métodos empleados para mejorar la producción son:

Fracturamiento hidráulico. No se conocen muchos casos donde se haya tenido éxito; es considerado como una opción para mejorar la eficacia de los pozos que tienen pobre conectividad en el reservorio (Flores *et al.*, 2005).

Fracturamiento térmico. Se produce un choque térmico mediante la inyección de agua fría. Es un método bien documentado pero no adecuado para eliminar incrustaciones.

Estimulación química con agentes quelantes tales como el ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) o el ácido nitrilotriacético (NTA). Este procedimiento ha sido estudiado a escala de laboratorio como un método para “atrapar” el calcio de la calcita en yacimientos geotérmicos (Mella *et al.*, 2006). Se ha encontrado que la disolución de calcita no es tan rápida como cuando se usan ácidos minerales.

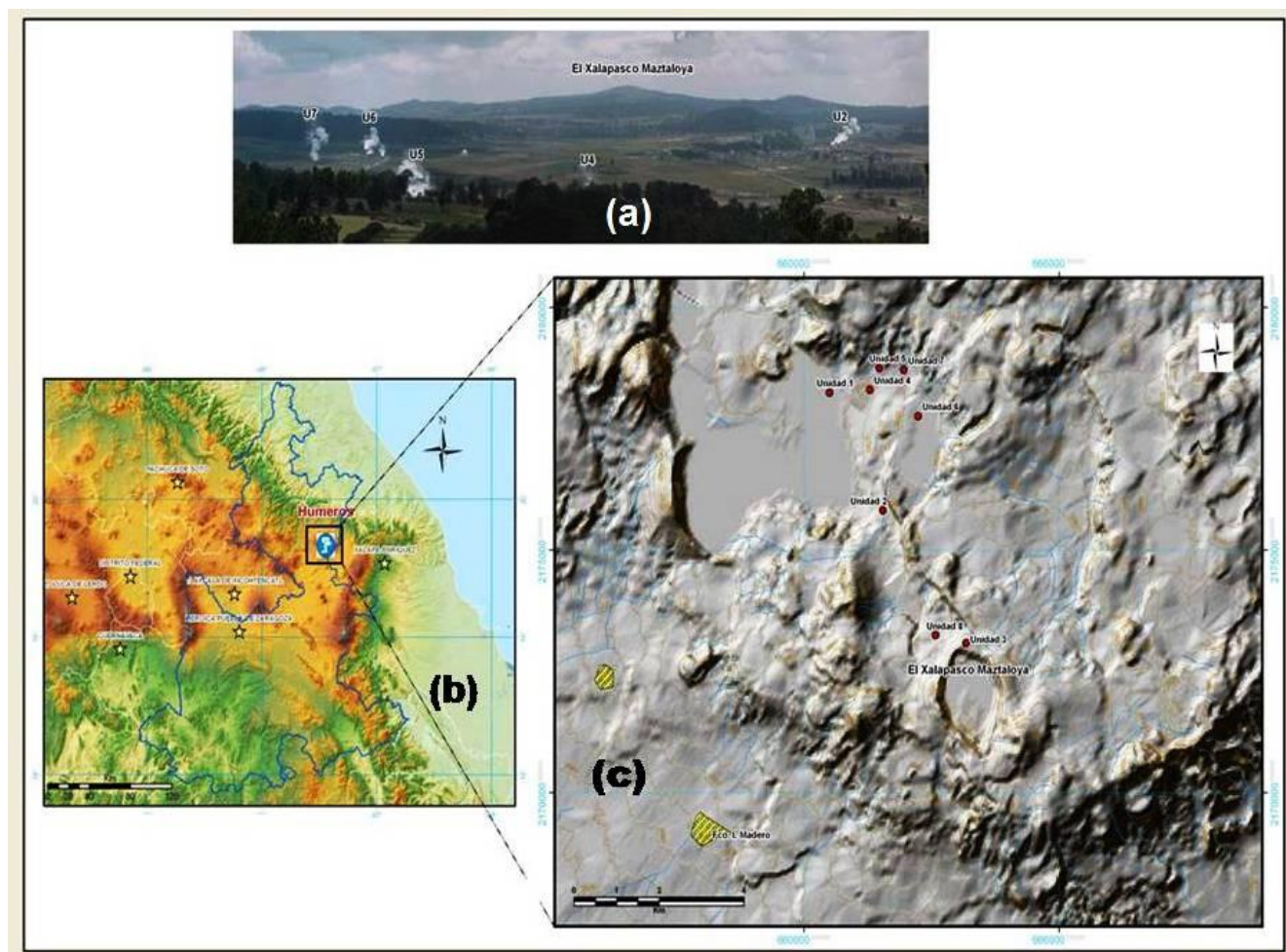
La estimulación ácida se ha aplicado exitosamente en varios campos geotérmicos. En México se ha realizado en los campos de Los Azufres, Mich., y de Las Tres Vírgenes, BCS, y más recientemente en Los Humeros y Cerro Prieto.

En este trabajo se presenta información sobre los cambios mineralógicos, químicos y petrofísicos en muestras de dos núcleos de rocas del yacimiento de Los Humeros, antes y después de interactuar con dos soluciones ácidas.

### **Campo geotérmico de Los Humeros**

El campo geotérmico de Los Humeros (CGLH) está localizado en el Centro-Este de México. En la Figura 1, la imagen 1a presenta una panorámica del campo (Xalapazco-Maztaloya), la 1b muestra la localización del campo y la 1c muestra un mapa topográfico. El campo está dentro de una caldera volcánica, localizada en el extremo oriental del Cinturón Volcánico Mexicano. En la actualidad el CGLH es uno de los cuatro campos geotérmicos que operan en México, con una capacidad instalada de 40 MW.

Los eventos geológicos en relación con la caldera de Los Humeros han sido descritos por varios autores. Gutiérrez-Negrín (1982) y Viggiano y Robles (1988) han realizado la descripción detallada de las unidades que se encuentran en el subsuelo, las cuales son, de menor a mayor profundidad:



*Fig. 1. Localización del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla.*

Unidad 1: Vulcanismo post-caldérico. Edad cuaternaria (>100,000 años). Está compuesta por andesitas, basaltos, dacitas, riolitas, flujos y tobas de ceniza, pómez, ceniza y material de erupciones freáticas.

Unidad 2: Vulcanismo caldérico. Edad cuaternaria (510,000-100,000 años). Esta unidad está compuesta principalmente por ignimbritas líticas y vítreas que ocasionaron dos colapsos caldéricos (Los Humeros y Los Potreros). Incluye pómez, tobas y algunas coladas de lava andesítica, así como domos riolíticos.

Unidad 3: Vulcanismo pre-caldérico. Edad terciaria (Mioceno-Plioceno, 10-1.9 Ma). Está compuesta por flujos de lava andesítica, con algunas intercalaciones de horizontes de tobas. El mineral accesorio característico de las andesitas superiores es la augita y el de las andesitas inferiores es principalmente la hornblenda. Ambos paquetes incluyen flujos locales y menores de basalto, dacita y eventualmente riolita. Esta unidad contiene los fluidos geotérmicos.



Unidad 4: Basamento. Edad mesozoica-terciaria (Jurásico-Oligoceno, 140-31 Ma). Está compuesta por calizas, lutitas subordinadas, pedernal, rocas intrusivas (granito, granodiorita y tonalita) y metamórficas (mármol, skarn, hornfels), y eventualmente algunos diques diabásicos a andesíticos más recientes (Mioceno).

## Trabajo experimental

Para conocer el comportamiento de las rocas del yacimiento de Los Humeros, el trabajo experimental se llevó a cabo en fragmentos de núcleos obtenidos en la perforación de dos pozos. Los fragmentos de núcleos provienen de la Unidad 3 que es considerada como la zona productora (Cedillo, 2000). Como muestra representativa de la andesita superior o andesita de augita se seleccionó un fragmento del pozo

H-13, y como muestra representativa de la andesita inferior o andesita de hornblenda se seleccionó un fragmento del pozo H-40.



Fig. 2. Imagen del fragmento de núcleo del pozo H-13.

El fragmento de núcleo del pozo H-13 se obtuvo de una profundidad de entre 1200 y 1203 m (Fig. 2). Esta roca de color gris se clasificó como andesita, su mineral accesorio característico es augita; se estima 60% de alteración hidrotermal. Los minerales identificados en el microscopio óptico y por difracción de rayos-X son: plagioclasas, cuarzo, augita alterada a clorita, calcita, epidota, hematita y un poco de zeolitas. La calcita se encuentra rellenando micro fracturas.



Fig. 3. Imagen del fragmento de núcleo del pozo H-40.

El fragmento estudiado del núcleo del pozo H-40 se obtuvo de una profundidad entre 1300 y 1303 m (Fig. 3). Esta roca de color gris se clasificó como andesita, cuyo mineral accesorio característico es la hornblenda; presenta textura micro cristalina con 80% de alteración. Los minerales identificados en el microscopio óptico y por difracción de rayos-X son clorita, epidota, hornblenda, calcita, cuarzo y mica (illita).

Cada núcleo se dimensionó cubriendo los requerimientos para los ensayos físicos, químicos y mineralógicos. Cada espécimen se caracterizó antes y después de ser

sometido a las soluciones ácidas. El trabajo experimental se llevó a cabo en recipientes resistentes a ácidos y a alta temperatura (polimetilpenteno), donde una pieza previamente pesada de núcleo fue colocada en cada solución ácida. Se prepararon dos soluciones ácidas empleadas comúnmente durante

los trabajos de acidificación matricial, que son una solución de HCl diluido al 10% y otra con una mezcla del mismo HCl diluido al 10% y de HF diluido al 5%. Los experimentos se llevaron a cabo a presión atmosférica en baño de temperatura controlada a 120°C durante 5 horas.

Después de cada tratamiento, las muestras se retiraron de las soluciones, se sumergieron en agua destilada y se secaron a temperatura ambiente. Una vez secas se registró el peso de cada espécimen. Para conocer cambios en la mineralogía, pequeños fragmentos fueron analizados en un difractómetro marca Ital Structures, modelo APD 2000 PRO, con radiación filtrada de Cu. Para estimar cambios en la concentración de elementos mayores en las rocas, otros fragmentos se analizaron en un espectrómetro de emisión atómica (ICP-OS) marca Thermo Scientific, modelo iCAP 6300.

La permeabilidad Klinkenberg se determinó en el mismo espécimen antes y después de cada tratamiento ácido, mediante la medición de la permeabilidad absoluta por medio de la técnica de estado estable a 24°C y presión media del gas desde 0.5 hasta 6 kg/cm<sup>2</sup> usando nitrógeno como fluido de trabajo.

## Resultados

Después de la interacción de las rocas con las soluciones ácidas el primer cambio aparente a la vista fue la variación del color de las rocas y su textura al tacto. El efecto del HCl diluido al 10% es notable en los especímenes del pozo H-13 donde la calcita que ocupaba huecos y micro fracturas se disolvió desde el primer contacto con el ácido, dejando finalmente espacios vacíos del tipo de huecos o conductos (“wormholes”). Lo mismo ocurrió con la mezcla de ácidos, además que por la acción del HF las cloritas se vieron afectadas.

En la parte inferior de la Figura 4 se muestra un espécimen del núcleo del pozo H-13 antes de la interacción con la mezcla ácida, mientras que en la parte superior se muestra el mismo espécimen después de su interacción, notándose la penetración del HCl y HF en la roca por el efecto de disolución de calcita y posiblemente clorita.

Otros especímenes del pozo H-40 se trataron bajo las mismas condiciones, mostrando después del tratamiento notable cambio de color. Puesto que la alteración de la andesita profunda es principalmente cuarzo y epidota relleno de fracturas y oquedades, el efecto de los ácidos es superficial. Posiblemente la mezcla ácida no fue suficiente para disolver a los minerales silicatados.



*Figura 4. Efecto de la mezcla de HCl y HF en un espécimen del núcleo del pozo H-13 (parte superior). En la parte inferior el espécimen antes de la interacción con la solución ácida.*

En la parte superior de la Figura 5 se muestra un fragmento de la andesita de hornblenda, observándose el anfíbol característico. En la parte inferior el espécimen de la misma roca presenta el efecto de la mezcla ácida, consistente en una leve disolución de epidota y del cuarzo en fracturas.



*Fig. 5. Especimen del pozo H-40. En la parte superior antes del tratamiento con la mezcla de HCl y HF, y en la inferior después del tratamiento.*

El análisis por difracción de rayos-X de los especímenes tratados con las mezclas ácidas, muestra para el H-40 la misma mineralogía que la roca original. Esto significa que el ácido reacciona disolviendo los minerales con los que hace contacto, dejando gran parte de la matriz de la roca sin tratar. En el caso del H-13 la mineralogía es la misma con la notable disminución de la calcita.

El análisis de elementos mayores de los especímenes tratados muestra una disminución de la concentración de Si, Na, Ca, Mg y Fe., con respecto a las rocas sin tratamiento. Este cambio es una indicación de la disolución de calcita, cloritas y posiblemente plagioclasas.

Los cambios en la concentración elemental de las rocas están en función de la composición de la solución ácida y del tiempo de interacción roca-ácido. Los

especímenes del pozo H-13 muestran una notable disminución de Ca debido a la disolución de calcita. La mayor pérdida de peso se observó en el pozo H-13 debido a esa disolución.

La permeabilidad de Klinkenberg, determinada antes y después de la interacción con la mezcla de HCl y de HF, muestra un significativo aumento, particularmente en muestras del pozo H-13, donde varios conductos fueron abiertos por la acción de la solución ácida (Tabla 1).

Muestras de núcleo del pozo	Permeabilidad Klinkenberg (en milidarcys)	
	Antes del tratamiento ácido	Después del tratamiento ácido
H-13	0.004	6.66
H-40	0.035	6.52

*Tabla 1. Permeabilidad Klinkenberg antes y después de la interacción con la mezcla de HCl y HF.*

Las muestras se dejaron en las soluciones ácidas durante tres meses posteriores al tratamiento, a temperatura ambiente, a fin de observar si ocurría alguna precipitación o formación de minerales a partir de las soluciones ácidas. Sin embargo, no se observó formación, precipitación ni depósito alguno.

## Conclusiones

Se probó en laboratorio la posible acción de soluciones ácidas en las rocas que contienen al yacimiento de Los Humeros, siendo el cambio más notable un incremento en la permeabilidad de los especímenes tratados con la mezcla de ácidos clorhídrico (diluido al 10%) y fluorhídrico (diluido al 5%). Este incremento es de hasta tres órdenes de magnitud, lo cual es muy significativo para el objetivo de estimular la producción de pozos geotérmicos.

Puesto que no se reprodujo el posible efecto de la presión en el yacimiento, es de esperar que los resultados sean más notables a las condiciones reales del yacimiento.

La eficacia del tratamiento ácido depende de la composición de la roca y de la intensidad y tipo de alteración hidrotermal a la que ha estado sujeta.

La calcita reacciona rápidamente tanto con el HCl como con la mezcla HCl + HF, dejando fracturas y poros abiertos. Los minerales calco-silicatados, con excepción de la clorita, sólo reaccionan superficialmente al tratamiento ácido, dejando gran parte de la matriz de la roca sin afectar.

Bajo las condiciones experimentales de este trabajo, no se detectó la formación ni depósito de minerales debido al tratamiento ácido, lo cual no sería una consecuencia deseable.

Se recomienda trabajo adicional empleando otras mezclas ácidas diferentes a las experimentadas, sobre todo incrementando la concentración de HF, lo que podría disolver minerales silicatados como la epidota, el cuarzo y la clorita que son comunes en las rocas del yacimiento de Los Humeros rellenando oquedades y fracturas.

## Agradecimientos

Los autores expresamos nuestro agradecimiento a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la Comisión Federal de Electricidad, por su autorización para presentar en este trabajo parte de los resultados obtenidos durante la ejecución del contrato 9400046929 “Estudio para la determinación de parámetros mecánicos, físicos y químicos en muestras de roca de los campos geotérmicos de Los Azufres, Michoacán, y de Los Humeros, Puebla”, entre el Instituto de Investigaciones Eléctricas y la Comisión Federal de Electricidad.

## Referencias

- Cedillo R., F., 2000. Hydrogeologic model of the geothermal reservoirs from Los Humeros, Puebla, México. *Proceedings of the World Geothermal Congress 2000*. Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 1639-1644.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 1982. Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H-1 y H-2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE, Informe interno 23-82. Inédito.
- Flores, M., Davies, D., Couples, G. and Palsson, B., 2005. Stimulation of geothermal wells, can afford it? *Proceedings of the World Geothermal Congress 2005*. Antalya, Turkey.
- Malate, R.C.E., Austria, J.J.C., Sarmiento, Z.F., Di Lullo, G., Sookprason, P.A., and Francis, P., 1998. Matrix stimulation treatment of geothermal wells using sandstone acid. *Proceedings of the*



*Twenty-Third Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, Stanford, California.

Mella, M., Kovac, K., Xu, T., Rose, P., and McCulloch, J., 2006. Calcite dissolution in geothermal reservoirs using chelants. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 30, pp. 347-352.

Sandrine, P., Francois-David, V., Patrick, B.N.S., and André, G., 2009. Chemical stimulation techniques for geothermal wells: experiments on the three-well EGS system at Soultz-sous-Forêts, France. *Geothermics*, Vol. 38, pp. 349-359.

Viggiano, J.C., y Robles, J., 1988. Mineralogía hidrotermal en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. I: Sus usos como indicadora de temperatura y del régimen hidrológico. *Geotermia*, Vol. 4, No. 1, pp. 15-28.