

## Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acoculco, Pue.

*Cecilia Lorenzo Pulido<sup>1</sup>, Magaly Flores Armenta<sup>1</sup> y Germán Ramírez Silva<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich. <sup>2</sup>Actualmente jubilado de la CFE. Correo: [cecilia-lorenzo@cfe.gob.mx](mailto:cecilia-lorenzo@cfe.gob.mx)

---

### Resumen

Los recursos geotérmicos de roca seca caliente (HDR: *Hot Dry Rock*), también conocidos actualmente como sistemas geotérmicos mejorados (EGS: *Enhanced Geothermal Systems*), han sido investigados de tiempo atrás. El concepto de HDR es muy simple. Los yacimientos más comunes se encuentran a unos 5000 m de profundidad y están formados por rocas impermeables que tienen una temperatura entre 150°C y 300°C, y no contienen ningún tipo de fluido. La temperatura es un criterio económico principal, ya que para la generación de energía eléctrica se requiere una temperatura inicial mayor a los 200°C. Para desarrollar el sistema se hacen dos perforaciones, en una de las cuales se introduce agua fría y en la otra se obtiene agua caliente. En Francia, desde junio de 2008 se encuentra en operación una planta de 1.5 MW como parte del proyecto *Soultz-sous-Forêt* financiado por el *European Deep Geothermal Energy Programme*. A fin de caracterizar los yacimientos HDR se llevó a cabo una recopilación de información multidisciplinaria referente a: (1) origen de la fuente de calor, (2) información cuantitativa de temperatura y mecanismos de transferencia de calor natural, (3) fallas y fracturas naturales, (4) esfuerzos locales, y (5) tipo de basamento. Esta información se aplicó a la zona geotérmica de Acoculco, Pue., explorada por el Departamento de Exploración mediante los pozos EAC-1 y EAC-2 para determinar la presencia de un yacimiento de alta temperatura (de 220°C a más 250°C). Esta zona presenta las siguientes características: (1) Origen de la fuente de calor: volcanotectónico; (2) Los registros de temperatura mostraron valores de 263.8°C y 307.3°C, a profundidades de 1900 y 2000 m, respectivamente, y el comportamiento de la curva de temperatura indica características de una roca impermeable caliente; (3) Los dos pozos exploratorios están en un estructura tipo graben, y a profundidad se observó en muestras de núcleo y ripios evidencias de fallas y fracturas naturales selladas total o parcialmente por minerales hidrotermales como epidota, cuarzo y pirita; (4) El análisis de esfuerzos establece los sistemas NW-SE y E-W locales como los principales en la zona geotérmica; y (5) El basamento está constituido por calizas que han sufrido metamorfismo de contacto debido al emplazamiento de un intrusivo (granito de hornblenda) que se identificó en la columna litológica de ambos pozos. Con base en todo ello, la zona geotérmica de Acoculco es candidata a ser desarrollada bajo un esquema de Roca Seca Caliente.

*Palabras clave:* Acoculco, roca seca caliente, fuente de calor, pozos exploratorios, geología estructural, EGS.

## Characterization of a hot dry rock reservoir at Acoculco geothermal zone, Pue.

### Abstract

Hot dry rock (HDR) geothermal resources, also called enhanced (or engineered) geothermal systems (EGS), have been researched for a long time. The HDR concept is simple. Most of the reservoirs are found at depths of around 5000 m and comprised of impermeable rocks at temperatures between 150 °C and 300 °C –lacking fluid. Rock temperature is a main economic criterion, since to generate electric energy initial temperatures above 200 °C are required. To develop a HDR system, two wells are drilled. Cold water is introduced in one well and hot water is obtained from the other well by passing the water through the hot rock. Since June 2008, a 1.5 MWe power plant has been operating in France, part of the Soultz-sous-Forêt project financed by the European Deep Geothermal Energy Programme. To characterize the HDR reservoir multi-disciplinary information was gathered regarding: (1) the heat source origin, (2) qualitative information on temperature

and transfer mechanisms of natural heat, (3) natural faults and fractures, (4) local stresses, and (5) the basement rock. The information was applied to a geothermal zone in Acoculco, Pue.. The zone was explored by the Exploration Department with wells EAC-1 and EAC-2, defining the presence of a high temperature reservoir (from 220 °C to more than 250 °C). The zone presents the following features: (1) heat source origin: volcano-tectonic, (2) temperature logs show values of 263.8 °C and 307.3 °C at depths of 1900 m and 2000 m, respectively, (3) the exploration wells are located in a graben-like structure, and the core and cutting samples show evidences of natural faults and fractures partially or completely sealed by hydrothermal minerals such as epidote, quartz and pyrite, (4) stress analyses indicate the local NW-SE and E-W systems are the main systems in the geothermal zone, and (5) the basement rock is composed of limestones with contact metamorphism due to the emplacement of intrusive rocks (hornblende granite), which was identified in the lithologic column from both wells. Based on all these features, the Acoculco geothermal zone is a candidate for development under an EGS scheme.

**Keywords:** Acoculco, hot dry rock, heat source, exploration wells, structural geology, EGS.

## 1. Introducción

La caracterización de un yacimiento de Roca Seca Caliente es la base para la planeación del desarrollo del mismo. Así mismo, se debe tener en cuenta que aunque presente características de un sistema de roca seca caliente, el campo no puede considerarse viable todavía. La identificación de las características en campo de los sitios HDR/HWR (roca seca caliente/roca húmeda caliente) son de gran utilidad durante la fase inicial del desarrollo de dichos campos, y aumentará la utilidad gradualmente durante cada etapa de desarrollo: perforación, creación de fracturas en el yacimiento, circulación y la extracción de calor.

## 2. Características generales de los sistemas HDR/HWR

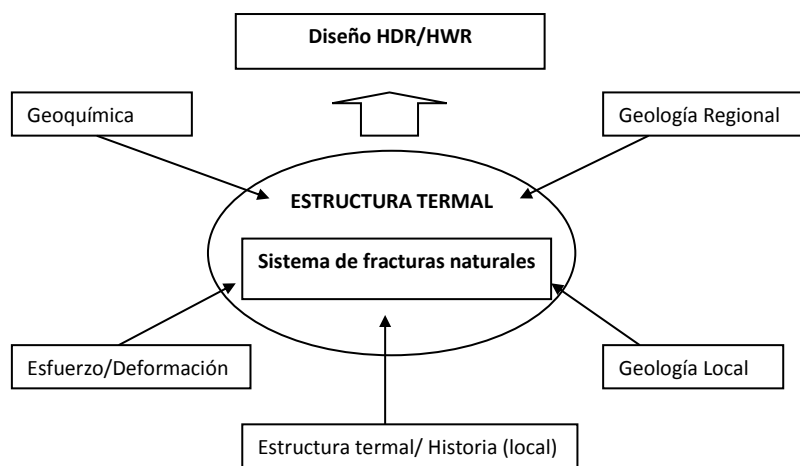


Fig. 1 Estructura de la caracterización de un sistema HDR/HWR.

En la Figura 1 se muestra la metodología para la caracterización de cualquier sistema HDR/HWR. La estructura termal de la roca caliente incluye algunas estimaciones del sistema de fracturas naturales, el cual será el objetivo final de la caracterización del campo.

### 2.1. Origen del calor

Es esencial una roca con alta temperatura para desarrollar un sistema HDR. El calor en la masa de la roca a una profundidad del orden de varios kilómetros puede ser asignado cualitativamente a tres fuentes:

- A. Área volcánica en zonas de subducción (choque de placas), donde el magma alimenta de calor a la roca circundante (Ej. Hijori y Ogachi en Japón).
- B. Áreas relacionadas con zonas de *rift*, caracterizadas por una estructura de graben continental (Kappelmeyer *et al.*, 1991; Armstead and Tester, 1987).
- C. Área donde la fisión nuclear natural de elementos trazadores mantienen la masa de roca caliente. Un ejemplo posible de este tipo de roca es el granito (Kruger *et al.*, 1992).

### 2.2. Temperatura

La temperatura es un criterio económico principal porque determina la profundidad de perforación de los pozos del yacimiento creado. Si el objetivo principal es la generación de energía eléctrica, la temperatura inicial de las rocas debe ser mayor de 200°C.

La alta temperatura en la masa de roca es la base para la evaluación de la factibilidad del desarrollo del sistema HDR/HWR.

El análisis detallado del estado natural de la transferencia de calor en el subsuelo es un aspecto importante en la historia termal del área, la cual define la creación de un modelo. Para ello se utilizan combinaciones de tecnología como datación avanzada y geología de los yacimientos minerales; además los métodos de exploración geofísica son también esenciales para modelar la superficie de las estructuras presentes.

Se requiere un número mínimo de pozos profundos para la caracterización del campo, lo cual depende de la complejidad de la geología del área y la aplicabilidad de los métodos sísmicos. La medición mientras se perfora (MWD) mide los parámetros de la formación (resistividad, porosidad, sónico de velocidad, rayos gamma), y su uso es importante para ese propósito, porque la tecnología convencional de perforación no cubre esta tarea en general.

Se requieren mejores instrumentos para el registro de temperatura de pozos con altas temperaturas mayores a los 200°C.

El propósito de los perfiles de temperatura en el sitio es obtener una serie de registros en pozos de prueba, los cuales darán información cuantitativa de la temperatura y las condiciones locales en subsuelo del mecanismo de transferencia de calor natural, ya que la transmisión del calor a través del sólido puede ser por convección, conducción o radiación. Por ejemplo, si el perfil de temperatura en un pozo presenta un incremento puede indicar un flujo de calor conductivo, correspondiendo a una roca caliente impermeable. Una distribución de isothermas a lo largo del pozo indica la existencia de flujo de calor conductivo y la presencia de conjuntos de fracturas conectadas. Si la temperatura decrece con la profundidad (inversión de temperatura) puede haber un flujo lateral de agua caliente. La energía de calor total es estimada con los perfiles de temperatura extrapolando los datos y el volumen objetivo del HDR/HWR necesario para tener un yacimiento de sistema HDR económicamente explotable.

### **2.3. Fallas y fracturas naturales (redes fracturadas)**

Un método avanzado para el modelado es la distribución de fracturas estocásticas en la masa de la roca, las cuales también se incorporan en los datos de distribución de fracturas del pozo. La probabilidad de conexión de estas fracturas y el tamaño de distribución de las mismas interconectadas es muy importante para la evaluación de la masa rocosa de un yacimiento HDR/HWR. El modelado fractal parece ser un candidato para este propósito en el futuro. La fiabilidad de estos modelos prototipo obtenidos de forma indirecta, podrían ser evaluados por un método directo. Los siguientes métodos son utilizados para este propósito.

- a) Observación de fracturas en afloramientos.
- b) Múltiples muestras de cortes de roca.
- c) Tomografía de rayos X utilizando un trazador como medio de contraste.
- d) Pruebas de permeabilidad en muestras de rocas.

### **2.4. Esfuerzos locales**

El régimen de esfuerzos tectónicos es otro factor crítico para la creación de un yacimiento. La dirección del yacimiento aumentará predominantemente en la dirección de las fracturas y su relación con la dirección del máximo esfuerzo principal.

## 2.5. Tipo de basamento

Históricamente el basamento cristalino ha sido el medio preferido (Duffield *et al.*, 1981; Milora and Tester, 1976), porque la idea original está en la pérdida de fluidos del sistema de circulación (condición que debe buscarse); esta puede estar limitada si la masa de roca caliente presenta porosidad y permeabilidad in situ insignificante.

Por lo expuesto, es evidente que en México un proyecto HDR/HWR puede ser caracterizado por sus condiciones tectónicas y su ámbito geológico regional, es decir, zonas de actividad volcánica, zonas de subducción, áreas relacionadas a *rift* continental y en batolitos graníticos.

## 3. Características de un yacimiento roca seca caliente

Los yacimientos más comunes se encuentran a unos 5000 m de profundidad y están formados por rocas impermeables con temperatura entre 150°C y 300°C. No contienen ningún tipo de fluido. Para extraer el calor se hacen dos perforaciones: se introduce agua fría por una de ellas y se obtiene agua caliente por la otra (Figura 2).

Los resultados obtenidos en la creación de este tipo de yacimientos geotérmicos “artificiales” han llevado a denominarlos como sistemas geotérmicos mejorados (EGS), en los que se engloba a todos los yacimientos creados o desarrollados por el hombre y en los que se utilizan técnicas desarrolladas en los campos de roca caliente seca para la creación y/o estimulación del yacimiento.

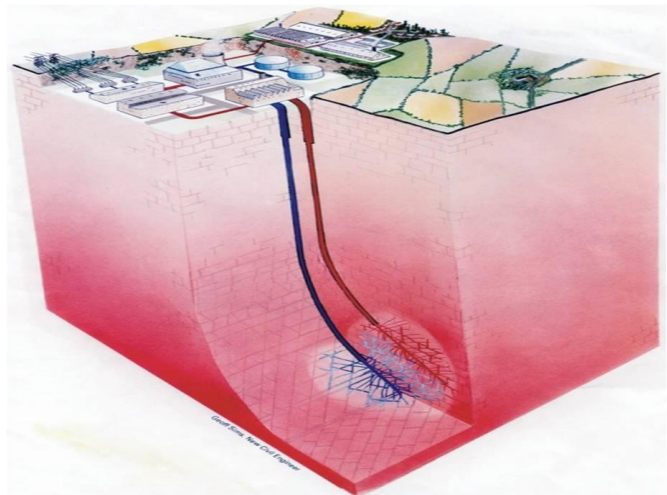


Fig. 2. Esquema de un yacimiento geotérmico de roca seca caliente.

En un sistema HDR el calor de la roca se extrae con el agua que se mueve desde el pozo o pozos inyectores hacia el pozo o pozos productores, pasando por una red de fracturas conectadas. El movimiento del agua a través de los intersticios entre los granos de los minerales en las rocas es definitivamente insuficiente para mantener una extracción de calor económicamente rentable en los pozos productores. La clave tecnológica para el desarrollo HDR es la introducción de vías artificiales para mejorar la extracción de calor por medio de fracturas hidráulicas. La investigación del fracturamiento hidráulico está centrada en el mecanismo de creación y extensión de fracturas homogéneas en rocas con poca permeabilidad, y también en rocas impermeables bajo la influencia de esfuerzos, tenacidad de fractura y la debilidad de la penetración de líquidos. A gran escala la masa de roca natural comprende diversos tipos de superficies discretas (grietas) denominadas hendiduras, diaclasas (*joints*), fracturas o fallas. Con excepción de las fallas, las grietas por lo general no crecen, y rara vez forman una red de fracturas naturales en el subsuelo que suministre la permeabilidad con suficiente agua para la extracción de calor.

## 4. Zona geotérmica de Aocolco, Puebla

### 4.1. Localización

La zona geotérmica de Acozulco, Pue., es un complejo volcánico localizado en forma regional en el sector oriental del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM) cerca de la Sierra Madre Oriental (Figura 3).

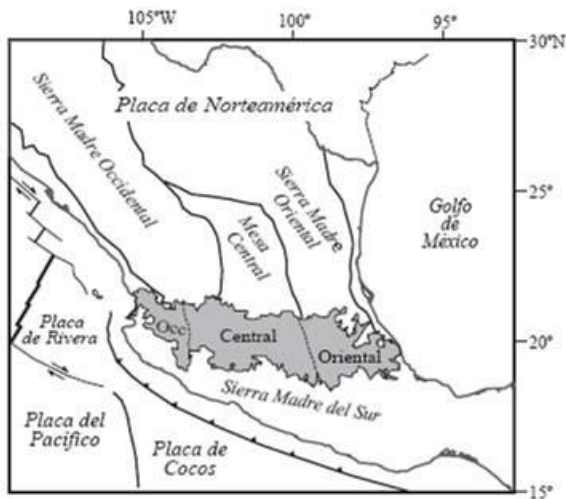


Figura 3. Ubicación del Cinturón Volcánico Mexicano (en gris) así como su división en tres sectores, las principales provincias geológicas de México y las placas tectónicas actuales (tomado de Gómez et al., 2005).

Localmente la zona geotérmica se ubica en el municipio de Chignahuapan en el estado de Puebla, a 85 km al NW de la ciudad de Puebla y a 65 km al SE de la ciudad de Pachuca Hgo., en las coordenadas geográficas  $19^{\circ} 47'$  y  $20^{\circ} 02'$  de latitud Norte y  $97^{\circ} 55'$  y  $98^{\circ} 20'$  de longitud Oeste (Figura 4).

## 4.2. Caracterización de la zona geotérmica de Acozulco como un sistema HDR

### 4.2.1. Origen del calor

La zona se localiza tectónicamente en el Cinturón Volcánico Mexicano, relacionado con la subducción de la placa de Cocos debajo de la de Norteamérica. El probable origen de la fuente de calor, con base en lo descrito en el inciso 2.1, es de un magma que alimenta de calor a la roca circundante, ubicada en un área volcánica en zona de subducción.

Desde el punto de vista tectónico, las evidencias geológicas reportadas hasta el momento señalan que el CVM se encuentra en buena medida bajo un régimen tectónico distensivo, aunque las fallas cuaternarias de la porción central del CVM tienen una pequeña y variable componente lateral izquierda. El régimen débilmente transtensional se explica considerando que la convergencia entre las placas de Cocos y de Norteamérica es ligeramente oblicua, y que existe una partición de la deformación en el límite de placa que hace necesario acomodar la componente de movimiento paralela a la trinchera (izquierda) en la placa superior. El CVM es el lugar más apropiado para acomodar esta componente lateral izquierda debido a que representa la principal zona de debilidad cortical al norte de la trinchera (Ego y Ansan, 2002). Diversos estudios han sugerido que la conspicua alineación de los grandes estratovolcanes mexicanos con una orientación general N-S debe estar relacionada con un sistema de fallamiento distensivo que sigue esa orientación (Cantagrel y Robin, 1979; Höskuldsson y Robin, 1993; Alaniz et al., 1998).

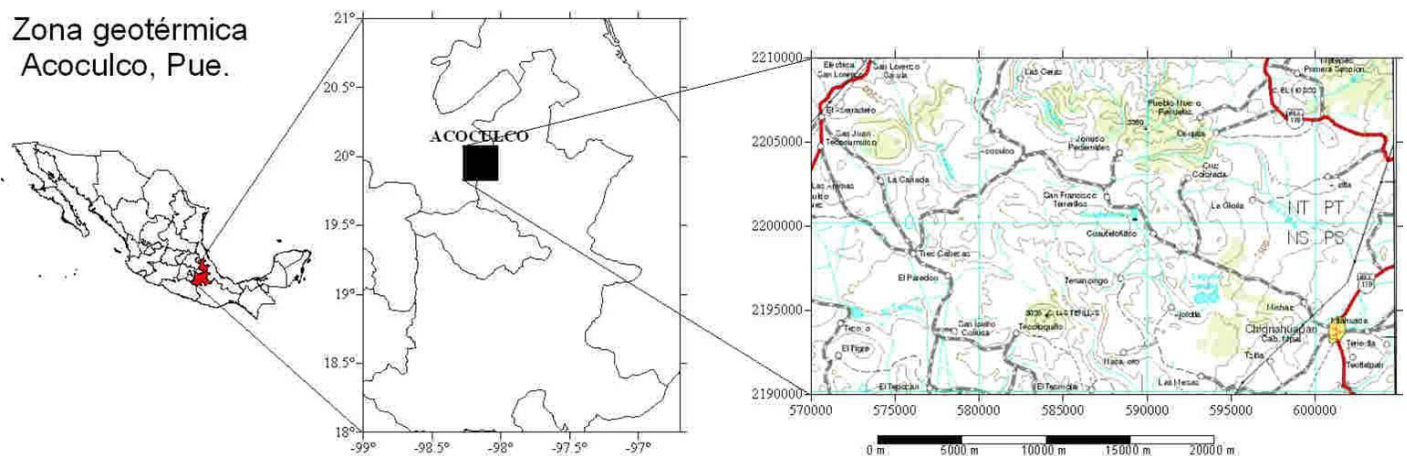


Fig. 4. Localización de la zona geotérmica Acozulco, Puebla (tomado de Rocha et al., 2006).

La mayor parte del terreno Guachichil consiste de sedimentos marinos del Jurásico Superior al Cretácico. Las rocas pre-mesozoicas del terreno Guachichil subyacen a rocas sedimentarias del Triásico al Jurásico que aparentemente fueron depositadas en grabens y semi-grabens de tendencia Norte-Sur y en menor proporción rocas volcánicas, estructuras aparentemente formadas durante el rompimiento (*rifting*) incipiente del Pangea a partir del Triásico Tardío. La deformación Laramide y la migración coetánea hacia el este de los sitios de arcos magmáticos puede haber sido causado por una subducción somera de litósfera oceánica. En la Provincia de la Sierra Madre Oriental el volcanismo post-laramídico y el tectonismo fueron mínimos. La Sierra Madre Oriental es un macizo montañoso o cordillera alargada, situado en el oriente de la República Mexicana y producto del levantamiento de rocas mesozoicas y de su basamento. Estas rocas fueron deformadas produciendo plegamientos regionales alineados en dirección NW-SE y vergencia al NE así como cabalgamientos, durante la Orogenia Laramide, en varias fases tectónicas y de reposo. Posteriormente fueron afectadas por el emplazamiento de cuerpos intrusivos tipo stocks y diques del Terciario Inferior, dando lugar a zonas de metamorfismo. La zona geotérmica de Aocolco está cerca de esta provincia, particularmente de su sector morfo-estructural del frente Huayococotla, consistente de una estructura de tipo anticlinorio de grandes dimensiones, amplio y orientado NNW-SSE (Rocha *et al.*, 2006).

De lo anterior puede concluirse que el origen del calor en la zona geotérmica es de tipo volcano-tectónico.

#### 4.2.2. Temperatura (pozos exploratorios)

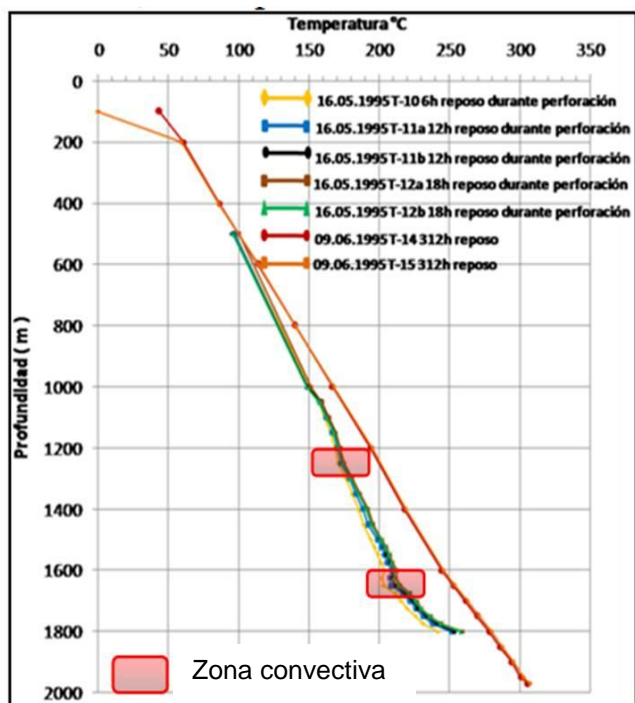


Fig. 5. Registros de temperatura y zonas convectivas en el Pozo EAC-1.

El pozo exploratorio EAC-1 fue perforado en 1995 en la localidad de Los Azufres de la zona geotérmica de Aocolco. Es un pozo vertical con una profundidad total final de 2000 m y agujero descubierto de 6" de diámetro hasta 1512 m y de 5 7/8" hasta 2000 m.

Durante su perforación hubo pérdidas de circulación someras en las dacitas, y algunas pérdidas pequeñas en el intervalo de agujero descubierto de 6" y 5 7/8" a las siguientes profundidades: 1369 m (2 m<sup>3</sup> por hora), 1736 m (6.4 m<sup>3</sup> por hora) y de 1909 a 1918 m (1.5 m<sup>3</sup> por hora) (Ramírez y García, 2006).

Después de terminado el pozo se tomó una serie de registros de temperatura hasta 1970 m de profundidad. En estos registros se observan zonas convectivas a 1250 y 1650 m (Fig. 5). Así mismo, al dejar al pozo en calentamiento (registros T-14 y T-15) se observó un incremento en la línea de temperatura indicando flujo de calor conductivo, correspondiendo a una roca caliente impermeable.

Por su parte, el pozo exploratorio EAC-2 fue perforado en 2008, al NE de las manifestaciones hidrotermales de la localidad de Los Azufres en la misma zona geotérmica. Es también un pozo vertical, con una profundidad total final de 1900 m. Tiene tubería de revestimiento de 7" hasta 803 m y continúa en agujero descubierto de 5 7/8" hasta 1900 m.

Durante su perforación se detectaron zonas de pérdida de circulación a los 344 m (35 m<sup>3</sup> por hora), en las andesitas, y a los 1842 m, en el agujero descubierto de 5 7/8" (de 10 a 20 m<sup>3</sup> por hora), de acuerdo a registros internos de la CFE, no publicados.

Después de su perforación se tomó una serie de registros de temperatura hasta la profundidad de 1900 m. En estos registros se observan zonas con cambio de pendiente a 1550 y 1850 m (Figura 6). Hasta la fecha no se han realizado registros de temperatura en fase de calentamiento, los cuales permitirían observar si el comportamiento de la temperatura es semejante al del pozo EAC-1.

En la Tabla 1 se muestran las temperaturas máximas registradas en ambos pozos (EAC-1 y EAC-2), para profundidades similares.

#### 4.2.3 Fallas y fracturas naturales y esfuerzos locales

En la recopilación e integración de datos de campo a detalle en la zona geotérmica de Acoculco, Rocha y Jiménez (2006) establecieron la presencia de cuatro sistemas estructurales en la zona de Los Azufres-Potrero Colorado y Alcaparrosa (Figura 7):

a) Sistema NW-SE. Echados tanto al NE (Falla Chignahuapan o Falla Acoculco) como al NW (Falla Alcaparrosa), constituyendo una estructura de tipo graben local, en cuyas fronteras conductoras emanan las manifestaciones termales de interés geotérmico con la presencia de manifestaciones termales ácidas alineadas.

b) Sistema E-W. Se manifiesta como pares conjugados de fallas.

c) Sistema N-S. De acuerdo con los datos de campo y con un análisis cuantitativo de densidad de estructuras con este rumbo, este sistema juega un papel importante en la conexión del termalismo de la zona de Los Azufres con la de Alcaparrosa. Presenta elementos cinemáticos de reactivación.

Pozo	Profundidad (m)	Temperatura (°C)	T (°C) calentamiento
EAC-1	1800	251.52	
EAC-1	1970		307.31
EAC-2	1900	263.77	

Tabla 1. Temperaturas registradas en los pozos.

d) Sistema NE-SW. Este sistema es consecuencia de la dirección de esfuerzos compresivos de la secuencia sedimentaria calcárea (calizas), pero afecta a los productos del CVM.

La descripción de las muestras de núcleo y canal del pozo EAC-1 y de canal del EAC-2, indica lo siguiente:

*Pozo EAC-1:* En los núcleos de este pozo se midieron fracturamientos con 80°, 84°, 75°, 70°, 74° de inclinación, y estratificaciones de 48°, 54°, 50°, 56°, y 45°, todos con referencia a la vertical del pozo (Rocha *et al.*, 2006). A la profundidad de 300-303 m los fragmentos de caliza presentan fracturamiento muy intenso pero totalmente sellado por calcita; de 600 a 603 m se presenta un fracturamiento bajo con una inclinación preferencial de 37°, sellado; de 850-853 m hay fracturas y micro-fracturas rellenas por calcita y pirita muy compactas (Gama *et al.* 1995).

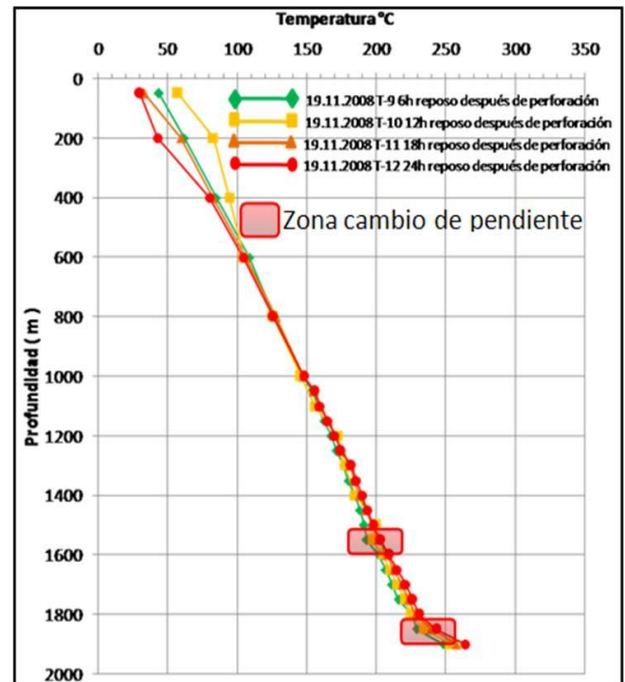


Fig. 6. Registros de temperatura y zonas con cambio de pendiente en el Pozo EAC-2.

**Pozo EAC-2:** Se identificaron varios intervalos con presencia de fracturamiento: 1520-1560 m parcialmente sellado; 1570-1950 m abierto con presencia de cristales de epidota; 1828-1842 m evidencia de falla y fracturamiento relleno por cuarzo y pirita euhedral y cristales de epidota bien formados; 1834-1836 m se observó el cruce de dos fallas con movimiento lateral izquierdo en una de ellas.

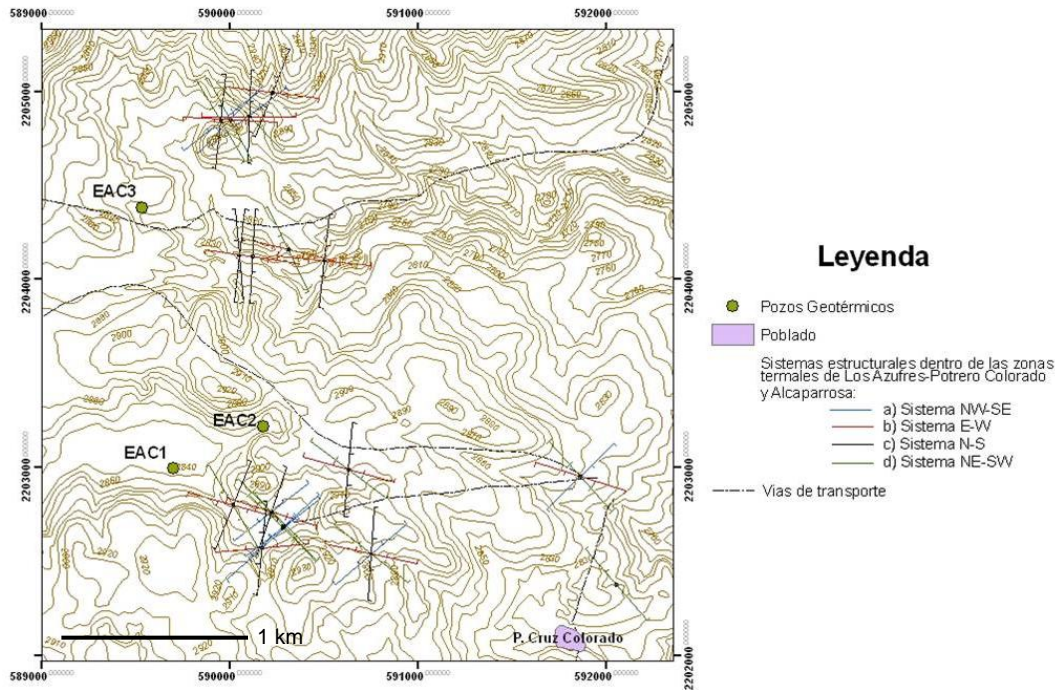


Fig. 7. Estructuras locales en la zona geotérmica Acoculco, Pue.

#### 4.2.4 Tipo de basamento

No se ha definido un basamento en el sentido estricto de la palabra, pero la roca que haría esa función se determinó a partir de las columnas litológicas obtenidas con los pozos exploratorios EAC-1 y EAC-2 (Figuras 8 y 9). El “basamento” está constituido por un skarn calcáreo (que varía a hornfels en el pozo EAC-2) originado por un proceso de metamorfismo de contacto de la caliza causado por el

emplazamiento del granito de hornblenda. Tanto el skarn como el hornfels y el granito presentan permeabilidad prácticamente nula. En este caso, por sus características hidrogeológicas, ambas unidades funcionarían como el “basamento”, en donde se podría desarrollar el HDR.

En el pozo EAC-1 el skarn aparece a partir de los 790 m de profundidad y presenta variaciones texturales importantes así como telescopio de minerales de metasomatismo, con dos horizontes de mármol a 1200-1290 m y a 1600-1660 m (Fig. 8).

El granito de hornblenda se observa de 1660 a 2000 m. Los minerales esenciales son ortoclasa (50-65%), cuarzo (18-27%), y pertita (3-7%). A lo largo de todo el granito se identificó ilmenita primaria en cantidades de hasta 2%. Se identificaron trazas de biotita y clorita, esta última como producto de alteración de la hornblenda.

En el pozo EAC-2, el hornfels calcáreo fue cortado en el intervalo de 450 a 1560 m de profundidad, presentándose a continuación el granito (Fig. 9).

Así, con base a la información obtenida por los pozos EAC-1 y EAC-2, puede concluirse que el basamento del área está constituido por calizas que han sufrido un metamorfismo de contacto debido al emplazamiento de un intrusivo (granito de hornblenda) dando origen a rocas metamórficas calcáreas (skarn y hornfels).

## 5. Conclusiones



Con base en toda la información interdisciplinaria obtenida durante los estudios realizados por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos y otros, la zona geotérmica de Acoculco presenta las características siguientes en torno a la posibilidad de ser desarrollada como un sistema de roca seca caliente (HDR):

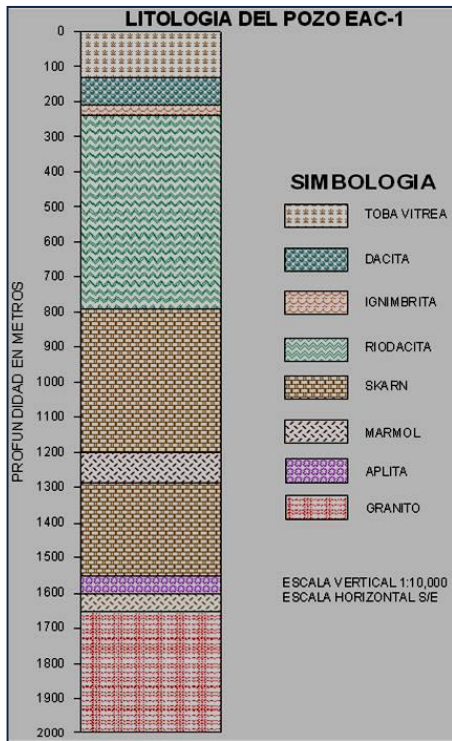


Fig. 8. Columna litológica del pozo EAC-1 (Torres et al., 1995).

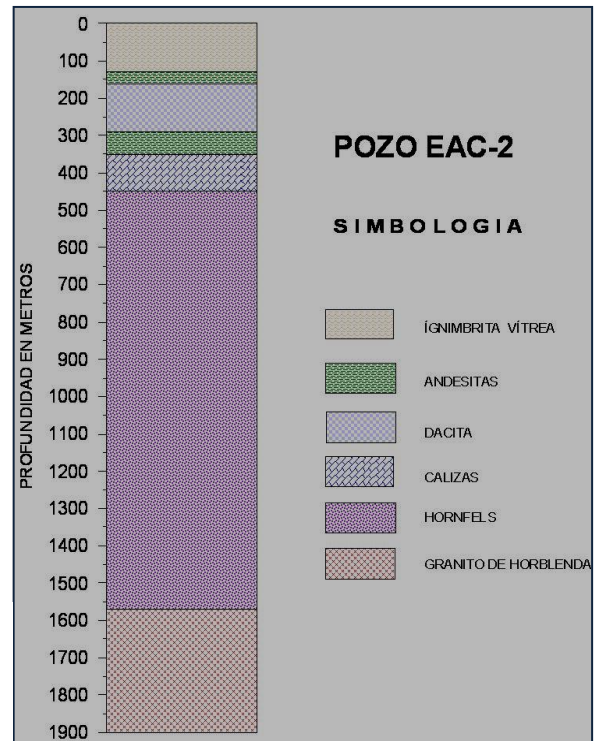


Fig. 9. Columna litológica del pozo EAC-2 (Viggiano et al., 2010).

- El primer elemento a definir en un yacimiento tipo HDR es el origen de la fuente de calor. Para Acoculco, el origen es de tipo vulcano-tectónico.
- El segundo elemento es la información cuantitativa de temperatura y mecanismos de transferencia de calor natural. De acuerdo con los registros de temperatura obtenidos en los pozos EAC-1 y EAC-2, y en particular en el primero, el perfil indica un flujo de calor conductivo, típico de una roca caliente impermeable. Las temperaturas máximas fueron de 307°C en fase de calentamiento en el pozo EAC-1 y de 264° C en el pozo EAC-2, después de 24 horas de reposo (ver Tabla 1).
- Otro elemento es la existencia de fallas y fracturas naturales. En la zona de Acoculco hay cuatro sistemas estructurales que incluyen un graben local. El pozo EAC-1 presenta fracturamiento y fallas sellados por minerales hidrotermales a diversas profundidades. El pozo EAC-2 presenta los rasgos estructurales que se reportan en la Tabla 2.

Profundidad (m)	Descripción
1520-1560	Fracturamiento parcialmente sellado.
1570-1950	Fracturamiento abierto con presencia de cristales de epidota.
1828-1836	Evidencia de falla (estrías, fragmentos con superficies planas y brecha hidrotermal, una fractura de 6 mm).
1834-1836	Cruce de dos fallas con movimiento lateral izquierdo en una de ellas.
1836-1838	Fracturas rellenas por cuarzo y pirita con caras planas.
1838-1839	Estrías y planos de falla con presencia de cristales de cuarzo y epidota bien formados.
1839-1841	Fracturas con cristales de epidota bien formados.

Tabla 2. Descripción estructural megascópica del pozo EAC-2.

- La última característica es el tipo de basamento. Para la zona de Acoculco el basamento está constituido por un intrusivo granítico que afecta a rocas calcáreas (calizas) dando lugar a rocas metamórficas (hornfels y skarn)
- Los resultados obtenidos a la fecha permiten considerar a esta zona geotérmica como un prospecto viable para desarrollar un sistema geotérmico mejorado tratando de crear un yacimiento geotérmico artificial.

A la fecha, el proyecto “Creación de un sistema geotérmico mejorado en Acoculco, Pue.” ha sido registrado en el Fondo Sectorial Conacyt-Sener.

### Agradecimientos

Al Departamento de Exploración, disciplinas de Geología y Geofísica (Ing. Santiago Rocha López, Ing. J. Guadalupe Gómez López e Ing. Hugo Palma Guzmán), así como al Departamento de Yacimientos (Marcela Sánchez Luviano) por el interés y apoyo para realizar este informe.

### Referencias

- Alaniz, S.A., A.F. Nieto, and L. Ferrari, 1998. Effects of strain rate in the distribution of monogenetic and polygenetic volcanism in the Transmexican volcanic belt. *Geology*, 26(7), pp. 591-594.
- Armstead, C.H., and J.W. Tester, 1987. *Heat Mining. A New Source of Energy*. University Press, Cambridge, Mass., pp. 39-43, 190-193.
- Cantagrel, J., and C. Robin, 1979. K-Ar dating on eastern Mexican Volcanic rocks - Relations between the andesitic and the alkaline provinces: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 5, pp. 99-114.
- Duffield, R.B., G.J. Nunz, M.C. Smith, and M.G. Wilson, 1981. *Hot Rock Dry. Geothermal Energy Development Program*. Annual Report FY80, Los Alamos National Laboratory Report, LA-8855-HDR, July 1981, 211 p.
- Ego, F., and V. Ansan, 2002. Why is the central Trans-Mexican Volcanic Belt (102°-99°W) in transtensive deformation? *Tectonophysics*, 359, pp. 189-208.
- Gama, R., Martínez, I., y Cedillo, F., 1995. Reporte litológico-estructural megascópico de los núcleos cortados en el pozo exploratorio Acoculco No.1 ubicado en la porción noroccidental del Estado de Puebla. CFE, Informe interno No. DEX-AC-015/95. Inédito.
- Gómez, A., M.T. Orozco, y L. Ferrari, 2005. Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, Volumen conmemorativo del centenario, Tomo LVII, Núm. 3, pp. 227-283.
- Höskuldsson, A., and C. Robin, 1993. Late Pleistocene to Holocene eruptive activity of Pico de Orizaba, Eastern Mexico. *Bulletin of Volcanology*, 55, pp. 571-587.
- Kappelmeyer, O., A. Gerard, W. Schloemer, R. Ferrandes, F. Rummel, and Y. Benderitter, 1991. European HDR project at Soultz-sous-Forests. *Geothermal Science and Technology*, 2, pp. 263-289.

- Kruger, P., T.W. Hicks, and J. Willis-Richards, 1992. The potential for thermal energy extraction from Cornish granite. *Geothermal Resources Council Transactions*, 16, pp. 465-472.
- Milora, S.J., and J.W. Tester, 1976. *Geothermal Energy as a Source of Electric Power*. MIT Press, Cambridge, Mass.
- Ramírez, M., y J.M. García, 2006. Propuesta de caracterización del pozo exploratorio EAC-1 en la zona geotérmica de Acapulco, Pue., México. CFE, reporte interno de la GPG No. DINYAC-008-2006. Inédito.
- Rocha, S., E. Jiménez, y H. Palma, 2006. Propuesta para dos pozos exploratorios en el proyecto geotérmico de Acapulco, Pue. CFE, informe interno de la GPG No. OGL-ACO-03/06. Inédito.
- Torres, V., E. González, y P. Birkle, 1995. Estudios petrográficos y de alteración hidrotermal de muestras de ripio y núcleos de pozos exploratorios en el campo geotérmico de las Derrumbadas-Acapulco, Puebla. Informe interno del IIE/11/10184/F. 248. Inédito.
- Viggiano-Guerra, J.C, M. Flores-Armenta, y G.R. Ramírez-Silva, 2011. Evolución del sistema geotérmico de Acapulco, Pue., México: un estudio con base en estudios petrográficos del pozo EAC-2 y en otras consideraciones. *Geotermia*, Vol. 24, No. 1, pp. 13-23 (este volumen).