

# GEOTERMIA

## REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

ISSN 0186-5897

Volumen 19, No. 2

Julio-Diciembre de 2006

### CONTENIDO

<b>Editorial</b>	1
<b>Mineralogía de la zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE) del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México</b> Georgina Izquierdo, Alfonso Aragón, Enrique Portugal, Víctor M. Arellano, Jesús de León y Julio Álvarez	2
<b>Monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-4 y LV-13 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, México</b> Saúl Venegas Salgado, Jesús Arredondo Fragoso, Germán Ramírez Silva, Magaly Flores Armenta y Miguel Ramírez Montes	13
<b>Modelado del flujo de masa y energía en chimeneas submarinas usando el método de elementos finitos</b> Mario César Suárez-Arriaga	23
<b>Regulación del vapor en caso de falla a unidades a contrapresión de 5 MW en el campo de Los Humeros, Pue., México</b> César Rosales-López	32
<b>Criterios para determinar la profundidad del intervalo productor en pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto, México</b> Jesús Saúl de León Vivar	39
<b>Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsistencia-<i>Creep</i>-Falla (PSCF) en la ciudad de Morelia, Mich., México</b> Jorge Alejandro Ávila-Olivera y Víctor Hugo Garduño-Monroy	50
<b>Foro</b>	60
<b>De la celebración del centenario de la industria geotermoeléctrica al desarrollo de la energía geotérmica en Italia en el siglo XXI</b> Rafaele Cataldi (Traducción de Julio C. Viggiano Guerra)	61
<b>Tendencias de las telecomunicaciones en México</b> Alejandro García Martínez	69
<b>El Mundo de la Energía</b> Información de Alfredo Mañón Mercado	73

La revista **GEOTERMIA** es un órgano virtual de información técnica publicado por la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), de edición semestral. Su Certificado de Licitud de Título es el número 2784 del 2 de octubre de 1985, y su Licitud de Contenido es el número 2514 del 1 de diciembre de 1986, ambos expedidos por la Comisión Calificadora de Publicaciones y Revistas Ilustradas de la Secretaría de Gobernación. **GEOTERMIA – REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA** es nombre registrado en la Dirección General de Derechos de Autor de la Secretaría de Educación Pública, con la Reserva 01.86. Reservados todos los derechos de reproducción del material publicado. Registro ISSN 0186-5897.

La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos no asume ninguna responsabilidad con relación a la veracidad o exactitud de los datos o conclusiones presentados en los artículos. Tampoco avala ni sugiere el uso de productos comerciales, los cuales son eventualmente citados sólo con fines descriptivos.

La autorización para citar fuentes ajenas a la Comisión Federal de Electricidad corre a cargo de los autores. Las opiniones vertidas son responsabilidad exclusiva de ellos y no reflejan necesariamente las opiniones, políticas o programas oficiales de la Comisión Federal de Electricidad.

## **EDITORES**

**Director:** José Luis Quijano León  
**Editor:** Luis C.A. Gutiérrez Negrín

### **Consejo Editorial:**

Alejandro Becerril Zavala  
Jesús de León Vivar  
Magaly Flores Armenta  
Serafín López Ríos  
Raúl Sánchez Velasco  
Jaime Vaca Serrano

### **Editores asociados:**

Alejandro Abril Gaspar (GPG)  
Víctor Arellano Gómez (IIE)  
Víctor Hugo Garduño Monroy (UMSNH)  
Susan F. Hodgson (Historiadora de temas geotérmicos y petroleros)  
Alfredo Mañón Mercado (Consultor)  
José Manuel Romo Jones (CICESE)  
César Suárez Arriaga (UMSNH)

### **Secretaría:**

Enedelia Calderón Ochoa  
**Responsable de sitio en página de la UMSNH:**  
Lucina Arce Ávila

### **Oficinas:**

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas  
Morelia, Mich., 58290  
Tel. (443) 322-7072  
Correo: [luis.gutierrez03@cfe.gob.mx](mailto:luis.gutierrez03@cfe.gob.mx)

## Editorial

**E**n este número continuamos la publicación de trabajos que fueron presentados en el Congreso Anual 2005 de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM), el cual se llevó a cabo en noviembre de 2005 como se informó en el número anterior (*Geotermia*, Vol. 19, No. 1, pp. 60-62).

Esos artículos son el de Georgina Izquierdo y colaboradores sobre la zona de sílice y epidota en el campo de Cerro Prieto, el de modelado matemático de César Suárez y el trabajo sobre la evolución de los criterios para terminar pozos productores en Cerro Prieto, preparado por Jesús de León. Con ellos prácticamente concluimos la publicación de los trabajos técnicos presentados en el congreso mencionado, y la revista queda preparada para difundir los que se presenten en el Congreso Anual 2006 de la AGM, que se realizará el 8 de septiembre según se indica en la circular que incluimos en las páginas finales de este número. Este congreso está planeado para que aquellos interesados en participar en la Reunión Anual del Geothermal Resources Council (GRC), que se verificará en San Diego, California, del 10 al 13 de septiembre, puedan asistir a ambos eventos prácticamente con un solo viaje.

También se incluyen en este número un par de artículos con trabajos técnicos que fueron presentados por personal de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE en el evento interno que se denominó como I Reunión Interna de Mejora Continua. Este evento se realizó en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., el 23 y 24 de febrero pasado, y se presentaron 26 trabajos de tipo técnico y administrativo con experiencias y propuestas tendientes a mejorar las actividades y el funcionamiento de la gerencia, como parte de la mejora que busca el sistema integral de gestión de reciente implantación. Ese sistema integral agrupa los sistemas de gestión de la calidad (norma ISO 9001:2000), de gestión ambiental (norma ISO 14001:2004) y de seguridad y salud en el trabajo (norma SAST-001:2000), y ha sido implantado en toda la Subdirección de Generación de la CFE, de la cual forma parte la GPG. Los trabajos que se incluyen en este número de la revista, son los de Saúl Venegas y colaboradores sobre el monitoreo sísmico en el campo de Las Tres Virgenes, BCS, y el de César Rosales sobre la regulación del vapor en algunas de las unidades geotermoeléctricas del campo de Los Humeros, Pue. En posteriores ediciones de la revista se publicarán otros trabajos de ese mismo evento cuyo tema y desarrollo así lo ameriten y lo hagan posible.

Nuestro número se completa con un trabajo técnico sobre los procesos combinados de subsidencia y deslizamiento que han ocurrido eventualmente en la ciudad de Morelia, Mich., sede nacional de la GPG, con un par de artículos en la sección del Foro y con la sección permanente *El Mundo de la Energía*. El artículo de Raffaella Cataldi, en particular, ofrece una prolija y bien documentada reseña sobre los diversos eventos que organizó la Unión Geotérmica Italiana (UGI), apoyada por diversos patrocinadores y colaboradores, para conmemorar el primer centenario de la industria geotermoeléctrica. Se incluyen finalmente las invitaciones al Congreso Anual 2006 de la Asociación Geotérmica Mexicana, y al Cuarto Congreso Internacional de Métodos Numéricos.

El Consejo Editorial espera que este número resulte de su interés y le envía un atento saludo.

*Luis C.A. Gutiérrez-Negrín*

# Mineralogía de la zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE) del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C., México

*Georgina Izquierdo<sup>1</sup>, Alfonso Aragón<sup>1</sup>, Enrique Portugal<sup>1</sup>, Víctor M. Arellano<sup>1</sup>,  
Jesús de León<sup>2</sup> y Julio Álvarez<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Av. Reforma 113, Palmira, Cuernavaca, Mor. 62490 México. <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26.5, B.C. México. Correo: [gim@ie.org.mx](mailto:gim@ie.org.mx)

---

## Resumen

Se determinó la distribución de minerales hidrotermales y las asociaciones paragenéticas y se realizó el estudio microtermométrico de inclusiones fluidas a partir de recortes de perforación de pozos de las distintas áreas del campo geotérmico de Cerro Prieto. Las muestras de recortes y núcleos de perforación estudiados provienen de la zona de producción a la que se le ha denominado Zona Mineralizada de Sílice-Epidota (ZMSE), que se encuentra en la parte profunda de la lutita gris con importantes horizontes de areniscas. En esta zona las asociaciones paragenéticas más comunes han mostrado tres intervalos de temperatura para la ZMSE: <200° C, 200-250° C, 250-300° C. El primer intervalo está caracterizado principalmente por arcillas, calcita y cuarzo; el segundo por cuarzo, epidota, clorita y micas, y el tercero por epidota, anfíboles, illita y clorita. El estudio de inclusiones fluidas en fragmentos de cuarzo autigénico mostró la presencia de inclusiones de dos fases (líquido + vapor) con puntos de fusión de hielo altos y bajos que corresponden a baja y alta salinidad del fluido. Las temperaturas de homogeneización (Th) para algunos pozos muestran buena concordancia con los registros de temperatura determinados a distintos tiempos de reposo.

*Palabras clave:* Campo geotérmico de Cerro Prieto, mineralogía hidrotermal, inclusiones fluidas.

## Mineralogy of the silica-epidote mineralized zone (SEMZ) in the Cerro Prieto geothermal reservoir, B.C., Mexico

### Abstract

The distribution of hydrothermal minerals, mineral assemblages and fluid inclusion data were taken from drill cuttings from the production zone of wells all over the Cerro Prieto geothermal field. The production zone has been termed the silica-epidote mineralized zone (SEMZ), and is located in the deep part of the gray shale where thick layers of sandstone are found. Common mineral assemblages show three temperature ranges in the SEMZ: <200° C, 200-250° C and 250-300° C. The first range is characterized by clays, calcite and quartz; the second by quartz, epidote, chlorite and mica, and the third by epidote, amphibole, illite and chlorite. The study of fluid inclusions in authigenic grain quartz has shown two-phase fluid inclusions (liquid + vapor) of different salinities. A wide range exists of homogenization temperatures (Th) and for some wells there is a good agreement between Th and direct temperature measurements.

*Keywords:* Cerro Prieto geothermal field, hydrothermal mineralogy, fluid-inclusions.

---

## 1. Introducción

El campo geotérmico de Cerro Prieto (CGCP) es un campo de líquido dominante, localizado en la parte noroeste de México cerca de la frontera con Estados Unidos (Fig. 1). Se encuentra en areniscas y lutitas del delta del Río Colorado. Es el campo productor más importante de la República Mexicana con 720 MW de capacidad eléctrica instalada. El campo alberga más de 200 pozos cuyas profundidades se encuentran entre 1250 y 3550 m; de ellos aproximadamente 160 son productores y 7 son inyectoros.

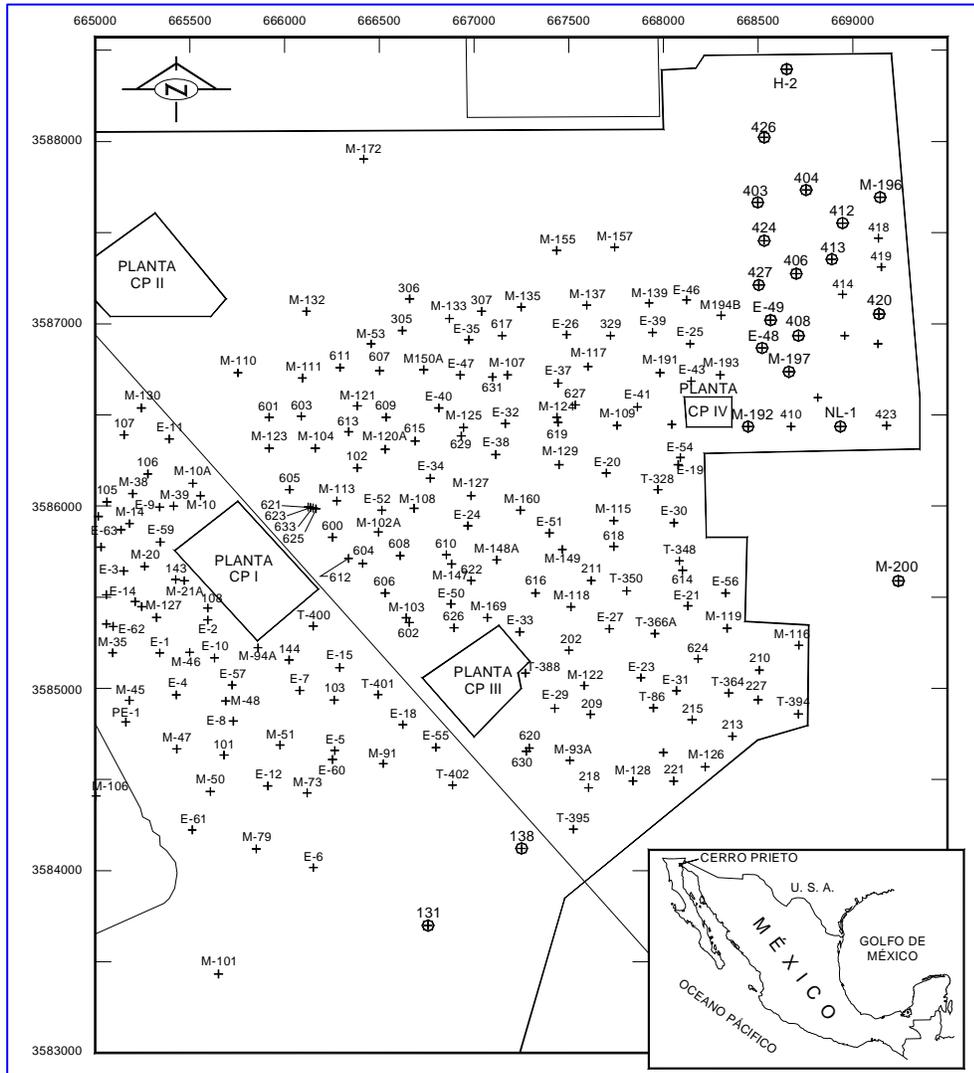


Fig. 1. Localización de pozos en el CGCP. El recuadro muestra la localización del campo dentro de la República Mexicana

Para facilitar la administración del campo, este se ha dividido en cuatro áreas conocidas como Cerro Prieto I (CP I), al oeste de la vía del tren; Cerro Prieto II (CP II) al sureste; Cerro Prieto III (CP III) en la parte noreste y Cerro Prieto IV (CP IV) al noreste de CP III.

De acuerdo con la localización de las áreas y la profundidad de producción, se ha inferido la existencia en el subsuelo de dos yacimientos en lutitas con intercalaciones de areniscas, que se alimentan de fluidos a través de fracturas (Lippmann *et al.*, 1991). El llamado yacimiento alfa está localizado en la parte oeste del campo. Es el más somero, fue el primero en explotarse y su profundidad media varía entre 1000 y 1500 m (CP I). El yacimiento beta, más profundo, se extiende debajo de toda el área que ocupa el campo (cerca de 15 km<sup>2</sup>), entre 1500 y 2700 m de profundidad, con temperaturas más altas que en el yacimiento alfa.

El yacimiento beta está localizado en areniscas permeables y de alta porosidad que subyacen a la unidad conocida como lutita café, de baja porosidad y relativamente impermeable.

En la actualidad Cerro Prieto es el campo geotérmico más desarrollado de México país y uno de los más estudiados del mundo. El conocimiento sobre su comportamiento es resultado de una enorme cantidad de estudios continuos realizados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y por investigadores de otras instituciones.

Desde el punto de vista mineralógico, el estudio de minerales de alteración como indicadores de condiciones físicas y químicas en Cerro Prieto ha recibido poca atención. Los trabajos realizados por Elders *et al.*, (1979, 1981) han sido tomados como referencia en la mayoría de las publicaciones y la representación gráfica de los minerales se ha usado como modelo en otros campos para indicar la mineralogía hidrotermal en función de la temperatura.

Izquierdo *et al.*, (2000, 2001) realizaron el análisis petrográfico y de difracción de rayos X de material de la ZMSE de pozos localizados en el área de CP IV. La alteración de las rocas con respecto a la mineralogía primaria es de 40% aproximadamente. La alteración es considerada de alto rango y moderada intensidad. Las rocas son terrígenas siendo las lutitas más abundantes que las areniscas.

Los minerales identificados por difracción de rayos X en la fracción arcillosa en pozos de CP IV son: Na-esmectita, Ca-esmectita, illita, clorita y escasos minerales interestratificados. Minerales como cuarzo, plagioclasas y anfíboles también fueron identificados. Al microscopio se identificó calcita, cuarzo, epidota, illita, clorita, esmectitas, wairakita, pirita, anfíboles y escasa pirita. Estos minerales ocurren en sistemas hidrotermales activos donde fluidos sódico clorurados de pH neutro a alcalino interactúan con las rocas del yacimiento.

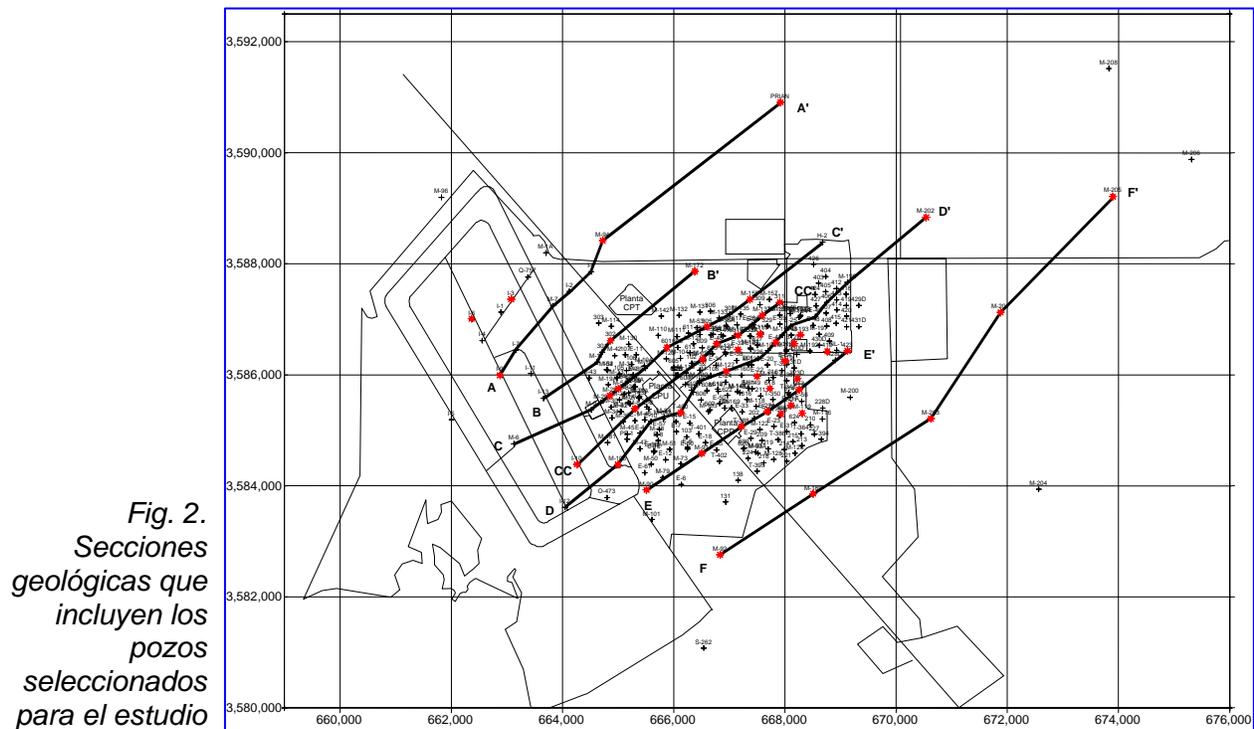
Dado el tamaño de los fragmentos conteniendo minerales secundarios, en el pasado casi no había sido posible llevar a cabo estudios microtermométricos de inclusiones fluidas. El estudio que se presenta a continuación ha proporcionado información acerca de la temperatura y la salinidad de los fluidos que circularon en la zona de producción (ZMSE) antes de la explotación del campo.

El propósito de este trabajo ha sido estudiar en detalle la mineralogía hidrotermal de la ZMSE, establecer asociaciones mineralógicas, proponer su posible temperatura de formación y realizar el estudio microtermométrico de inclusiones fluidas. Las muestras estudiadas provienen de la ZMSE de pozos incluidos en las secciones geológicas propuestas por la Residencia General de Cerro Prieto (ver Figura 2).

## 2. Marco geológico

Tectónicamente la depresión del Salto del área del Golfo de California es una zona de transición entre la zona de divergencia de la Trinchera del Pacífico Este y el sistema transformante de la Falla de San Andrés. El depósito de sedimentos deltaicos y abanicos aluviales en el basamento granítico del área de Cerro Prieto se inició durante el Terciario. A partir de datos petrográficos de más de 300 pozos se han identificado cinco unidades litológicas (Lira, 2005), que son de la más antigua a la más reciente:

Un basamento representado por rocas graníticas y metamórficas y por un intrusivo de composición basáltica que se localiza a profundidad. Esta unidad está representada en la superficie por rocas que conforman la Sierra de los Cucapá.



La lutita gris, que sobreyace al basamento, es la segunda unidad, formada por lutitas y areniscas interestratificadas en distintas proporciones. Juntas tienen un espesor promedio de 3000 m. Al oeste del campo la cima de esta unidad está a casi 400 m de profundidad; al este, en el pozo M-201, está a 2847 m. El espesor de la arenisca en la lutita gris varía de unos cuantos metros a 300 m. Las areniscas de esta unidad presentan su cementante original típicamente reemplazado por minerales hidrotermales, constituyendo así la llamada zona mineralizada de sílice-epidota (ZMSE). Esas areniscas alteradas son las que alojan a los fluidos geotérmicos, por lo que la ZMSE ha sido considerada como la zona productora del yacimiento. En esta unidad el flujo de los fluidos en el subsuelo ha sido descrito por Halfman *et al.* (1984) y por Lippmann *et al.* (1991), siendo en dirección general este-oeste, o más específicamente de la región este-sureste hacia la porción occidental, donde los fluidos descargan en lo que actualmente es la laguna de evaporación solar. Según Halfman y otros, el fluido asciende de zonas profundas a través de una falla importante (conocida como falla H), alcanzando la ZMSE. Una porción del fluido caliente se distribuye en las capas permeables siguiendo trayectorias horizontales. Ascensos verticales de fluido fueron identificados en el entorno del pozo M10A, lo cual ocurre por la ausencia o escasez de lutitas.

A la tercera unidad, depositada sobre la lutita gris, se le conoce como lutita café. Está compuesta de lutita, lodolitas y horizontes lenticulares de arenisca. La cima de esta unidad se localiza en el oeste a 600 m de profundidad y a 2500 m en el oriente (pozo M-205).

La cuarta unidad es una lodolita. Sobreyace irregularmente a la lutita café y a veces directamente a la lutita gris, con una distribución errática y presenta intercalaciones de arenas y gravas. Se localiza principalmente al este del campo.

La quinta unidad está conformada por sedimentos clásticos no consolidados compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas. Su espesor es variable, angostándose al oeste y ampliándose hacia el este. Esta unidad hospeda a un acuífero regional somero de agua dulce que se vuelve progresivamente salina en las cercanías del campo.

### 3. Parte Experimental

El estudio petrográfico se llevó a cabo en láminas delgadas de los recortes de perforación de cada uno de los pozos seleccionados.

El análisis mineralógico de la fracción arcillosa se realizó en láminas orientadas en un difractor de polvos Siemens D500 con radiación filtrada de cobre.

Las determinaciones microtermométricas se realizaron en una platina de calentamiento-enfriamiento Linkam THMSG600. La platina se calibró con patrones certificados (*synthetic fluid-inclusions samples*).

Ya que las inclusiones fluidas en las muestras del campo de Cerro Prieto son acuosas, sólo se determinaron dos parámetros: la temperatura de fusión del hielo ( $T_f$ ), la cual se convierte en salinidad expresada como porcentaje en peso equivalente de NaCl, y la temperatura de homogeneización ( $T_h$ ), la cual se considera como la temperatura mínima a la cual quedó atrapada la inclusión y es, por tanto, un buen indicador de la temperatura de formación del mineral en el que se encuentra la inclusión.

### 4. Interpretación

Se llevaron a cabo los análisis petrográficos y de difracción de rayos X en muestras profundas de la zona de producción de pozos localizados en las cuatro áreas del campo de Cerro Prieto. Dependiendo de la localización de los pozos y de la disponibilidad del material, las muestras se analizaron cada 200 o 250 m de profundidad pero siempre dentro de la ZMSE. Como una aproximación, se ha asignado una temperatura correspondiente a asociaciones mineralógicas semejantes en otros campos geotérmicos del mundo.

La epidota, como en otros campos, ha sido considerada como un buen indicador relacionado con temperatura, permeabilidad y composición del fluido (Browne, 1978; Reed, 1994; Reyes, 1990; entre otros). La presencia de epidota se ha reportado en sistemas geotérmicos activos a temperaturas < de 200° C pero es común y abundante entre los 230 y los 260° C (Bird y Spieler, 2004).

En las muestras estudiadas la intensidad de la alteración hidrotermal puede ser considerada como mediana a baja; pocas muestras presentan valores cercanos al 50% de alteración. En areniscas la alteración se presenta en el material cementante de los granos, aunque también algunos granos han sido alterados hidrotermalmente.

Al microscopio petrográfico, con luz transmitida se identificaron minerales como arcillas, minerales interstratificados, micas, clorita, calcita, cuarzo y epidota. En menor cantidad se observaron anfíboles (tremolita-actinolita, gedrita), vermiculita, anatasa y esfena. Los minerales opacos identificados fueron magnetita, hematita, pirita, calcopirita y esfalerita.

La mineralogía observada muestra asociaciones de minerales que se formaron por la interacción de la roca con fluidos calientes de pH neutro a alcalino. Aunque en la actualidad se tiene evidencia que algunos pozos, principalmente del área de CP IV, producen un fluido agresivo probablemente de naturaleza ácida, no se encontró evidencia de minerales formados en medio ácido. Tampoco se encontraron minerales como wairakita y prehnita, reportados en los trabajos de Elders *et al.* (1979, 1981).

Algunas de las asociaciones mineralógicas encontradas en la ZMSE y su correspondiente temperatura de equilibrio se mencionan a continuación:

Ep – Cl – Ca – Op	> 220° C
Ep – Cl – Ca – Sph	> 220° C
Ep – Cl – Anf	250 > 300° C
Ep – Qtz – Cl – Anf	250 > 300° C
Qtz – Ca – Cl – He	150 – 200° C
Qtz – Ca – Ep – Op	> 200° C
Qtz – Ep – Anf	> 300° C
Cl – Op	~ 150° C
Cl – Ca – Ep – Qtz – Op – Sph	200 – 250° C
Cl – Ill – Ca – Sph – Ep	200 – 250° C
Cl – Ep – Anf – Qtz – Ca – Es	250 – 300° C
Ca – Cl – Qtz	< 200° C
Ca – Sph – Op – Ep	> 200° C
Ca – Cl – Ep – Sph – Op – Anf	250 – 300° C

Donde: Ep = Epidota, Cl = Clorita, Ca = Calcita, Op = Opacos, Sph = Esfalerita, Anf = Anfíbolos, Qtz = Cuarzo, He = Hematita, Ill = Illita.

Dentro de la ZMSE y de acuerdo con la mineralogía hidrotermal se pueden inferir tres zonas termales, que dependen de la proporción de lutitas y areniscas, es decir que la permeabilidad y la temperatura del estrato son factores que influyen en la interacción agua roca y por tanto en la formación de ciertas asociaciones minerales. Estas zonas son: < 200° C, 200-250° C, 250-300° C. Pocos especímenes mostraron la presencia de anfíbolos, las cuales indicarían una temperatura superior a 300° C.

La primera zona termal, de temperatura menor a 200° C, para algunos pozos corresponde a una litología dominada por limolitas y lutitas cuya permeabilidad es baja y que podría considerarse como la frontera o el contacto con la ZMSE. La ZMSE parece ser una zona confinada donde circula el fluido hidrotermal alterando en mayor grado la arenisca.

Como ya se mencionó, las asociaciones de baja y de alta temperatura dependen de la composición del estrato estudiado y de su permeabilidad; se ha observado que algunos minerales hidrotermales de alta o baja temperatura pueden ser preservados en zonas relativamente impermeables (lutitas y lodolitas). En algunos pozos, como el M-105 a 996 m de profundidad, la muestra ha sido clasificada como lodolita-lutita (en un 65%) y arenisca (en un 35%). La asociación mineralógica a esta profundidad indica una temperatura menor a 200° C. A 1248 m de profundidad la muestra clasificada como arenisca (en un 98%) muestra la presencia incipiente de epidota, lo que sugiere que la temperatura podría ser mayor a 230° C. Finalmente, a 1587 m de profundidad la muestra corresponde a una lutita (en un 93%) y nuevamente la asociación mineralógica indica una temperatura < 200° C.

En la Figura 3 se representa la mineralogía hidrotermal de todo el campo. La wairakita es un mineral común en las rocas de pozos del área de CP IV, pero no en otras áreas del campo. La vermiculita es otro mineral poco abundante que se encontró en muestras profundas de la parte oeste del campo, pero no en la parte este.

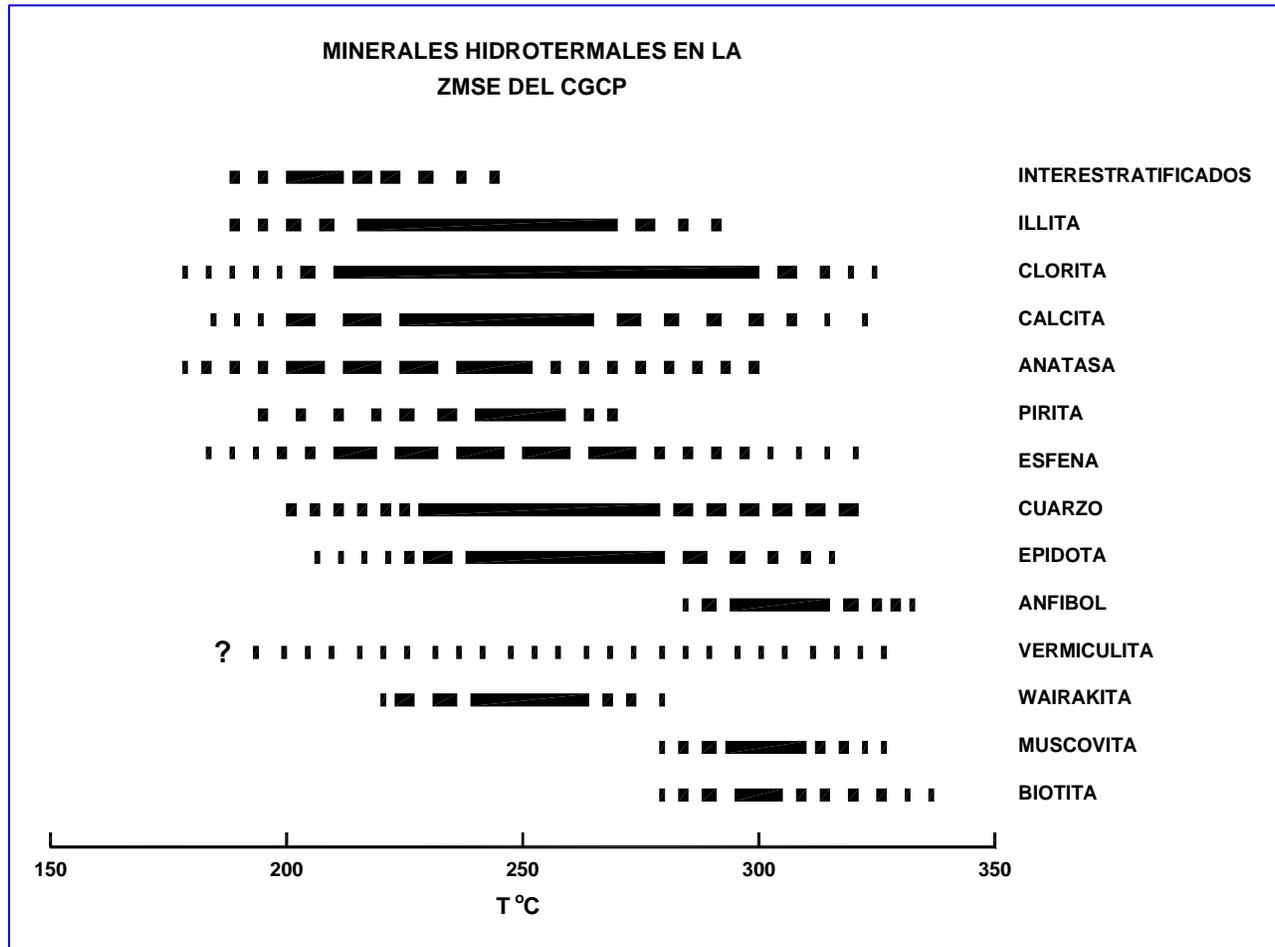


Fig. 3. Mineralogía de la ZMSE en el campo geotérmico de Cerro Prieto en función de la temperatura

El resultado de este estudio se representó en varias secciones geológicas en dirección NE-SW; cada sección incluye al menos siete pozos con la mineralogía de la ZMSE. La Figura 4 muestra una de estas secciones con la litología y la distribución de minerales hidrotermales de la ZMSE. La epidota está representada con un rombo, cuyo tamaño representa el porcentaje relativo de abundancia. En todas las secciones geológicas del campo la presencia de epidota indica interacción de la roca con fluidos calientes así como el perfil del horizonte permeable en la arenisca incluida en la lutita gris, destacando la zona permeable de la menos permeable. El mismo comportamiento de la epidota se observa en otras secciones del campo, presentándose otro ejemplo en la Figura 5.

Una mayor proporción de anfíbol a profundidad, por ejemplo en el pozo E22A, indica una temperatura superior a 300° C. La temperatura de homogeneización para este pozo entre los 2400 y los 2667 m de profundidad, está en el intervalo entre 302 y 336° C.

El estudio microtermométrico de inclusiones fluidas se llevó a cabo en cuarzo secundario, reemplazando al cementante de las areniscas o bien en pequeños cristales ocupando huecos en la matriz de estas rocas.

Las inclusiones fluidas analizadas son del tipo vapor + líquido con baja proporción de vapor. Las temperaturas de fusión del hielo indican fluidos con diferente salinidad. Todas las inclusiones estudiadas homogeneizaron a la fase líquida. Ya que las inclusiones analizadas vienen de la zona de producción (ZMSE), las temperaturas de homogeneización ( $T_h$ ) resultaron elevadas ( $> 250^\circ \text{C}$ ), excepto aquellas que provienen de pozos localizados en los márgenes del campo, como en el caso de los pozos I-3 y M-92.

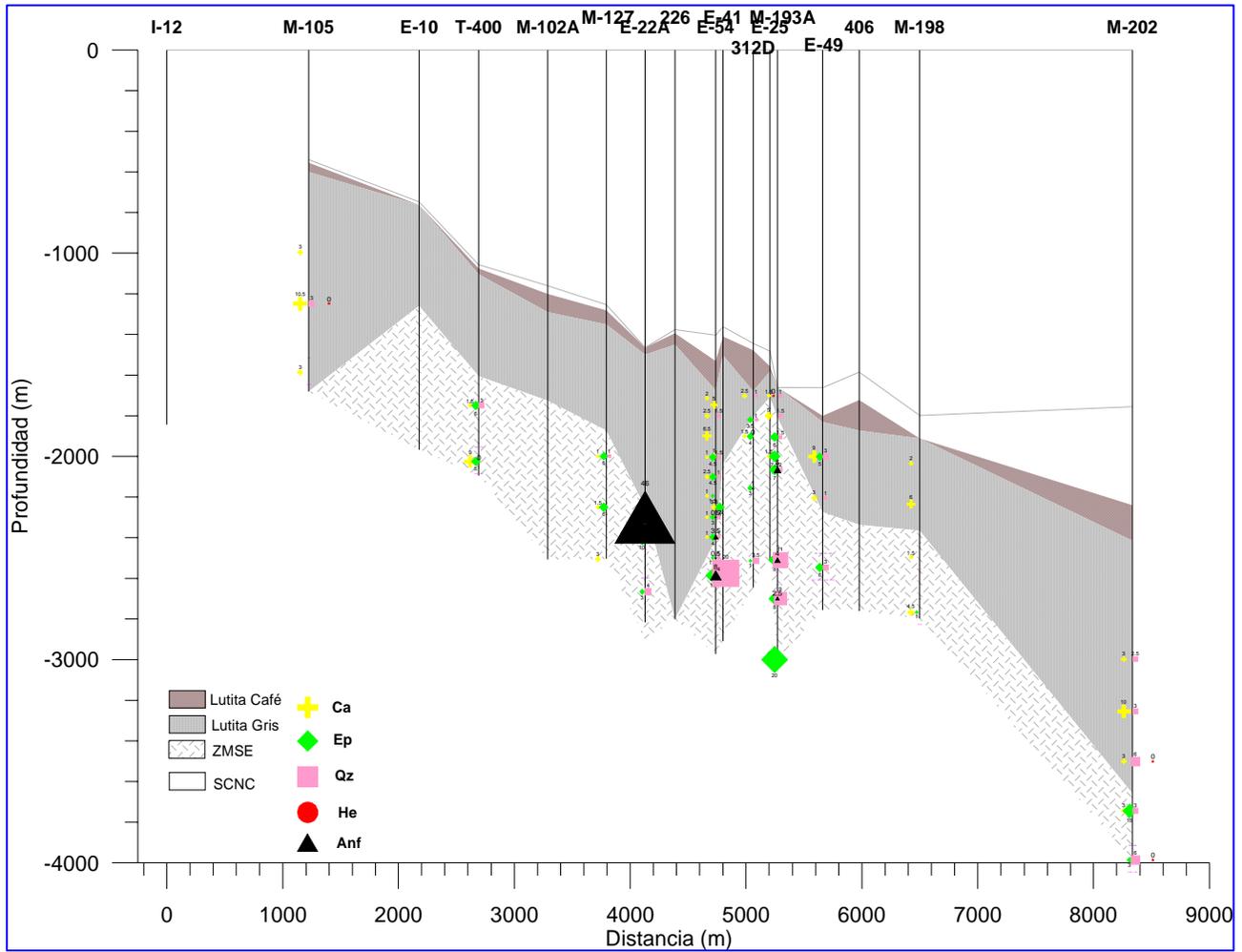


Fig. 4. Sección transversal NE-SW mostrando la ubicación de pozos, la litología y la distribución de minerales en la ZMSE.

La Tabla 1 contiene una selección de datos microtermométricos de muestras de pozos alineados en una sección transversal con dirección NE-SW. Se puede observar que, en el pozo E-49, para una misma profundidad la  $T_h$  es constante y la salinidad es variable; en otros pozos se observa lo opuesto, es decir una  $T_h$  variable y una salinidad constante. Esto podría indicar varios procesos en los que circularon fluidos de

Pozo	Prof. (m)	$T_h$ °C	$T_{fh}$ °C	% en P eq NaCl
I-3	1206.3	170	-1	1.16
M-202	3986	326	-0.4	0.66
M-198	2496	338	-0.1	0.16
M-198	2768	320	-5.7	8.78
E-49	2547	321	-5.3	8.24
E-49	2547	320	-9.0	0.82
T-400	2025	300	-0.1	0.17
M-105	1587	327	-3.7	6.08

Tabla 1. Datos microtermométricos de inclusiones fluidas en cristales de cuarzo de muestras profundas de pozos del campo de Cerro Prieto.

distintas características, pero para confirmarlo es necesario realizar el estudio microtermométrico de un mayor número de pozos.

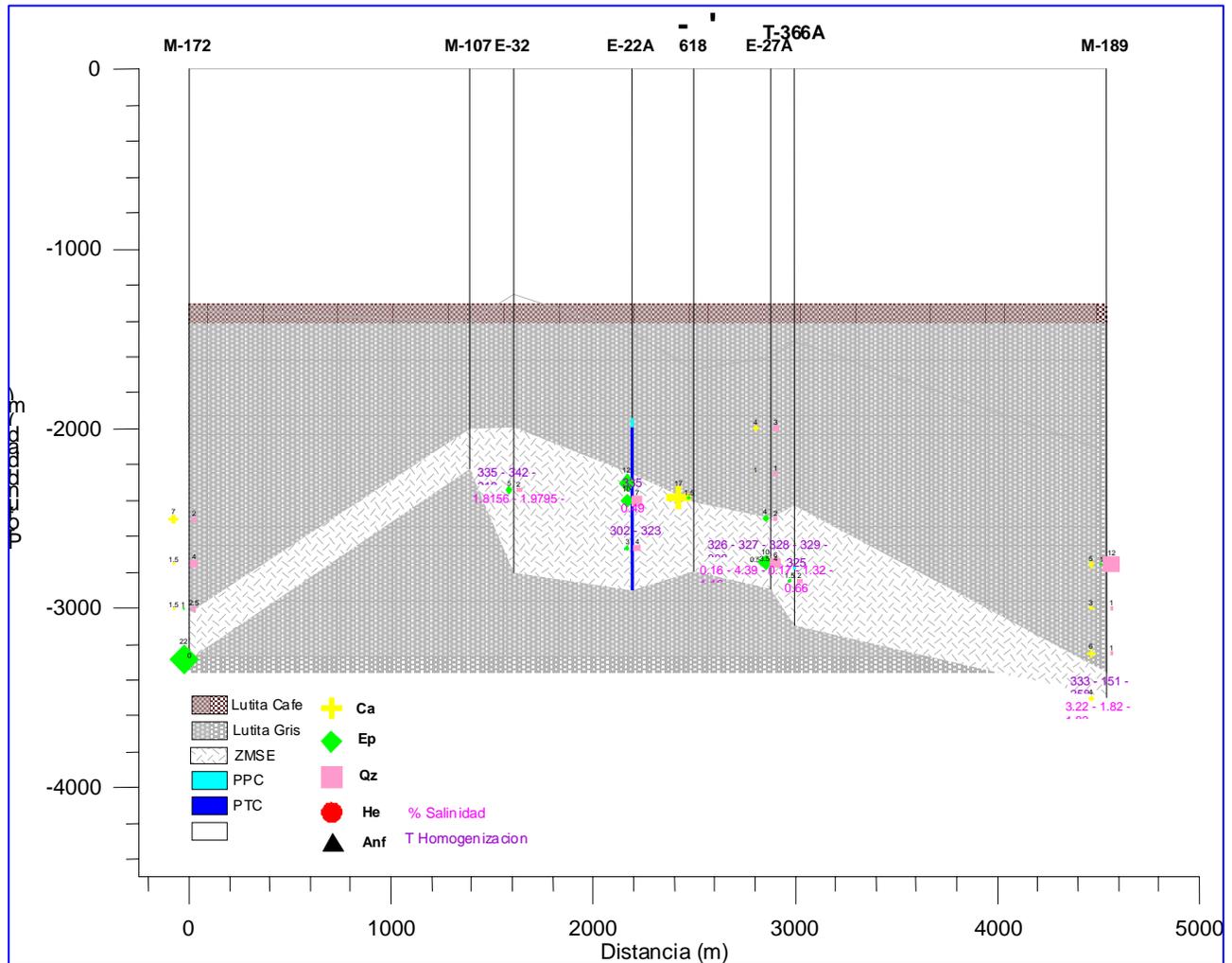


Fig. 5. Otra sección transversal NE-SW que incluye la litología, la mineralogía hidrotermal y datos microtermométricos para la ZMSE.

Para algunos pozos se encontró una buena concordancia con datos provenientes de registros de temperatura medidos a distintos tiempos de reposo (información proporcionada por la Residencia de Estudios de Cerro Prieto), por ejemplo para los pozos T-400, M-198 y M-105. En el primero la  $T_h$  obtenida en una inclusión proveniente de los 2025 m de profundidad resultó de  $300^\circ\text{C}$ , y un registro corrido con diez días de reposo midió una temperatura de  $318^\circ\text{C}$  a una profundidad de 2043 m. En el pozo M-198 la  $T_h$  obtenida en una inclusión a 2768 m de profundidad fue de  $320^\circ\text{C}$ , y de acuerdo con un registro de temperatura tomado con cinco días de reposo, la temperatura medida a 2700 m de profundidad fue de  $327^\circ\text{C}$ . La  $T_h$  para el pozo M-105 a 1587 m de profundidad fue de  $327^\circ\text{C}$ , mientras que a 1650 m y con ocho días de reposo el registro mostró una temperatura de  $322^\circ\text{C}$ .

## 5. Conclusiones

En el campo de Cerro Prieto el porcentaje total de alteración hidrotermal no es alto. Las muestras profundas de la ZMSE presentan menos del 50% de alteración. Sin embargo, dada la presencia de minerales como la

epidota y las anfíbolas es evidente que fluidos a temperaturas mayores de 250° C han estado en contacto con las rocas. Por lo tanto, por lo menos en algunas de las muestras estudiadas el bajo porcentaje de alteración total podría indicar un sistema hidrotermal relativamente joven.

Por analogía con otros campos geotérmicos se ha inferido la temperatura para algunas de las asociaciones mineralógicas comunes en la ZMSE. En un intervalo de profundidad relativamente corto se han reconocido tres zonas termales que dependen de la movilidad del fluido en estratos poco permeables (limolita-lutita) y en estratos con mayor permeabilidad (areniscas). Para algunos pozos la temperatura estimada no siempre es progresiva debido que las intercalaciones de areniscas en la lutita gris son muy variables.

Es claro que en Cerro Prieto la mineralogía formada depende de la temperatura y de la permeabilidad de las rocas. En la lutita gris los horizontes de espesor considerable de areniscas son el medio permeable donde la interacción fluido/roca se lleva a cabo dando lugar a la formación de minerales autigénicos. La epidota es un ejemplo de ello, y un buen indicador de temperatura. De hecho su presencia ha sido tomada como guía durante la etapa de perforación en este campo y en otros más.

Todos los minerales identificados son producto de la interacción de la roca con fluidos de pH neutro a alcalino. No se encontró evidencia mineralógica de la interacción con fluidos de pH ácido antes de que empezara la explotación del campo.

Dado el pequeño tamaño de los fragmentos de minerales autigénicos como el cuarzo, el estudio microtermométrico de inclusiones fluidas en Cerro Prieto no había sido posible anteriormente. Por tanto, los datos aquí presentados pueden ser considerados como los primeros. Sin embargo, se requiere más trabajo, pues los valores de salinidad y Th pueden dar mucha más información sobre el movimiento de fluidos antes de la explotación del yacimiento.

Para algunos pozos la temperatura de homogeneización corresponde con la temperatura deducida a partir de las asociaciones mineralógicas y con la temperatura medida en registros de pozos con distintos tiempos de reposo.

## **Agradecimientos**

Los autores expresan su agradecimiento a las autoridades de la Comisión Federal de Electricidad, en particular al Ing. Juan Manuel Wong Zúñiga, Residente General de Cerro Prieto, y al personal de la Residencia de Estudios por su apoyo y asistencia durante la realización de los estudios incluidos en este trabajo y que forman parte del contrato CFE 9400017183. Así mismo agradecemos al personal técnico de la Gerencia de Geotermia del Instituto de Investigaciones Eléctricas por su apoyo para efectuar el estudio.

## **Referencias**

- Bird, Dennis K., and Abigail R. Spieler (2004). Epidote in geothermal systems. *Rev. Miner. Geochem.*, Vol. 56, pp. 235-300.
- Browne, P.R.L. (1978) Hydrothermal alteration in active geothermal systems. *Annu. Rev. Earth Planet Sci.*, Vol. 6, pp. 229-250.

- Elders, W.A., J.R. Hoagland and S.D. McDowell (1979). Hydrothermal mineral zones in the geothermal reservoir of Cerro Prieto. *Geothermics*, Vol. 8, pp. 201-209.
- Elders, W.A., J.R. Hoagland and A.E. Williams (1981). Distribution of hydrothermal mineral zones in Cerro Prieto geothermal field of Baja California, Mexico. *Geothermics*, Vol. 10, Nos.3/4, pp. 245-253.
- Halfman, S.E., M.J. Lippmann, R. Zelwer and J.H. Howard (1984). Geologic interpretation of geothermal fluid movement in Cerro Prieto field, Baja California, Mexico. *The Am. Assoc. Petr. Geol. Bull.*, Vol. 68, No. 1, pp. 18-30.
- Izquierdo M., G., A. Aragón, E. Portugal, I. Torres y S. Antúnez (2000). Estudio de mineralogía hidrotermal, Cerro Prieto IV. Informe IIE/11/11891 01/F preparado para CFE bajo el contrato RGCP-CLS-004/2000. Inédito.
- Izquierdo, Georgina, Enrique Portugal, Alfonso Aragón, Ignacio Torres and Julio Álvarez (2001). Hydrothermal mineralogy, isotopy and geochemistry in the area of Cerro Prieto IV, Baja California, Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 25, pp. 353-356.
- Lippmann, M.J., A. Truesdell, S.E. Halfman-Dooley and A. Mañón (1991). A review of the hydrogeologic-geochemical model for Cerro Prieto. *Geothermics*, Vol. 20, Nos. 1/2, pp. 39-52.
- Lira H., Héctor (2005). Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, B.C. *Geotermia*, Vol. 18, No. 2, pp. 37-45.
- Reed, M.H. (1994) *Hydrothermal alteration in active continental hydrothermal systems*. Geol. Ass. Canada, Short Course Notes 11, pp. 315-337.
- Reyes, A.G. (1990) Petrology of Philippine geothermal systems and the application of alteration mineralogy to their assessment. *J. Volcan. Geothermal Res.*, Vol. 43, pp. 279-309.

# Monitoreo sísmico durante la estimulación ácida de los pozos LV-4 y LV-13 del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, México

*Saúl Venegas Salgado, Jesús Arredondo Fragoso, Germán Ramírez Silva, Magaly Flores Armenta y Miguel Ramírez Montes*

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos  
Alejandro Volta 655, Morelia, Mich., México, CP 58290. Correo: [magaly.flores@cfe.gob.mx](mailto:magaly.flores@cfe.gob.mx)

---

## Resumen

De septiembre a diciembre de 2004 se realizó un estudio de monitoreo sísmico en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, simultáneamente con las estimulaciones ácidas de los pozos LV-4 y LV-13. Se utilizó una red sísmica conformada por cuatro sismógrafos digitales, logrando registrar en la estación sísmica TV20 un total de 174 sismos locales, 131 sismos regionales y muchas más señales de tipo volcánico, durante el periodo del monitoreo de la estimulación ácida. Además, se localizaron un total de 37 sismos, de los cuales 22 se ubican dentro de la zona geotérmica de mayor importancia a profundidades del orden de 0.4 a 4 km y magnitudes pequeñas típicas (0.7 a 2.2 Md), lográndose definir dos zonas de importancia asociadas, la primera, al sistema de fallas El Volcán (Zona A) y la segunda al pozo inyector LV-8 (Zona B). En la zona A, el efecto de la inducción y puesta en marcha de los dos pozos estimulados con una mayor producción de vapor el 30 de octubre y 17 de noviembre de 2004, aumentó la actividad sísmica hasta un máximo de 12 sismos por día a principios de diciembre. En la zona B, el efecto del inicio del enfriamiento de los dos pozos cambió el número de sismos que se originan en ella, ya que se observó un aumento de 6 sismos por día el 2 de octubre, disminuyendo días después. Por otro lado, también se observó un aumento de la actividad sísmica después de la inducción y puesta en producción nuevamente de los dos pozos productores, registrándose un máximo de 11 sismos por día a fines de noviembre. Finalmente, de acuerdo a la distribución sísmica, se puede concluir que los sistemas de fallas más activos son los de El Volcán y El Viejo. Las nuevas propuestas de perforación de pozos productores en este campo geotérmico están apoyadas en estos resultados.

*Palabras clave:* Estimulación ácida, sismicidad, microsismos, pozos, campo de Las Tres Vírgenes.

## Seismic monitoring during acid stimulation of wells LV-4 and LV-13 at the Las Tres Vírgenes geothermal field, BCS, Mexico

### Abstract

From September through December 2004 a seismic monitoring in the Las Tres Vírgenes, BCS, geothermal field was carried out simultaneously with the acid stimulation of wells LV-4 and LV-13. The seismic network had four digital seismographs and recorded 174 local seismic events, 131 regional ones and many more volcanic signals at seismic station TV20 during the acid stimulation. Additionally, 37 seismic events were located, 22 of them inside the most important geothermal zone at depths between 0.4 and 4 km with typically low magnitudes (0.7 to 2.2 Md). Two relevant zones were determined: Zone A related to the El Volcán fault system and Zone B related to injection well LV-8. In Zone A the well-induction stage and the operation start of the wells LV-4 and LV-13 after acidification on October 30 and November 17, 2004, increased seismic activity to a maximum of 12 daily events in early December. When the two wells in Zone B were cooled before the acidification, the seismic events recorded there increased to a maximum of 6 daily

events on October 2, and then decreased. Also in Zone B the seismic activity increased after well-induction and the start of well production once they were acidified, recording up to 11 daily events in late November. According to the seismic distribution, we may conclude that the most active fault systems are El Volcán and El Viejo. New proposals for well locations in the field are supported by these results.

*Keywords:* Acid stimulation, seismicity, microseism, wells, Las Tres Vírgenes field.

## 1. Introducción

La Región del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes y por tanto del campo geotérmico, se encuentra ubicado en el extremo oriental de la península de Baja California Sur, entre las coordenadas 27.40° N a 27.59° N y -112.40° W a -112.67° W (Fig. 1).

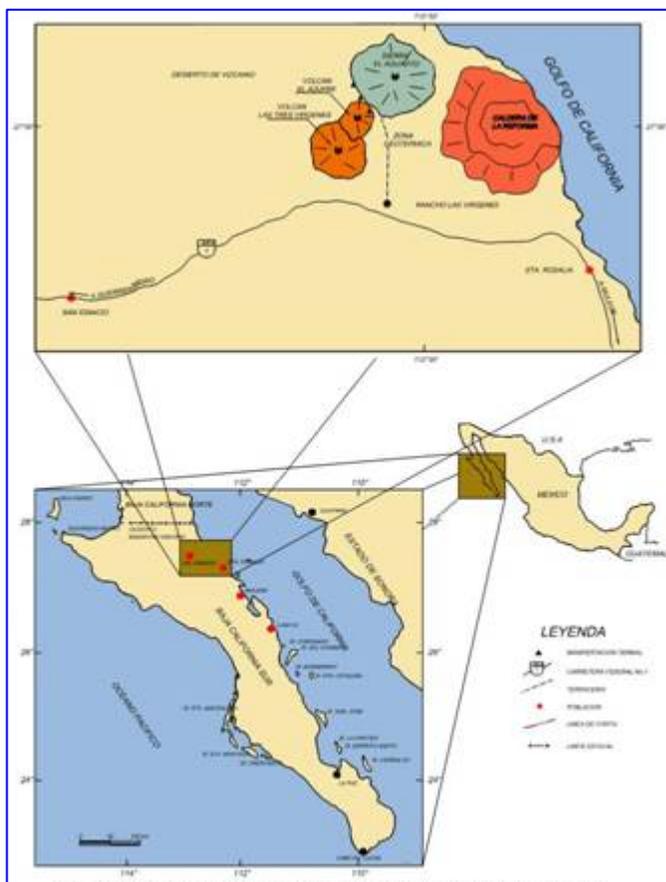


Fig. 1. Localización de Las Tres Vírgenes

Esta región presenta una geología y tectónica muy particular debido principalmente a la presencia del complejo volcánico compuesto de tres volcanes. El desarrollo de este complejo permitió la presencia de campos geotérmicos económicamente rentables como lo es actualmente el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes.

El estudio de la sismicidad en la región de Las Tres Vírgenes y sus alrededores empezó desde 1992 y ha continuado con interrupciones hasta 1999. Tanto los primeros trabajos (Guerrero-Guadarrama, 1997), como el último (Rodríguez, 2000) consideran a esta región como una zona de alta sismicidad. El trabajo reciente de Rodríguez (2000) logra registrar con la red permanente del campo geotérmico un total de 790 sismos en más de dos estaciones durante el periodo de enero-junio de 1999. De este total, Rodríguez asigna hipocentros a 70 sismos locales sobre el complejo volcánico de Las Tres Vírgenes. De estos selecciona los 14 eventos mejor localizados y los asocia a las trazas de las fallas de La Virgen y El Azufre.

En septiembre del 2003 el Instituto de Ingeniería de la UNAM y la CFE realizaron la instalación de 10 estaciones sísmicas (temporales y permanentes) alrededor de esta región.

Esta red sísmica registró 17 sismos, mismos que se distribuyen en los extremos y sobre las trazas de los sistemas de fallas presentes. En general, estos sismos presentan magnitudes  $M_d$  menores a 2.1 y profundidades del orden de los 5 km. La orientación de la fuente obtenida a partir de la polaridad de la onda P indica que estos sismos presentan mecanismos focales de tipo normal, inverso y transcurrente. En consecuencia, el análisis de la actividad sísmica en superficie, en profundidad y sus mecanismos focales han permitido realizar una interpretación y la posible configuración de la sismotectónica de la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes.

Por otro lado, se estableció la influencia de la variación de los gastos de producción e inyección de los pozos y la ocurrencia de los sismos. Los resultados mostraron que existe una gran probabilidad de que los gastos de inyección y producción de los pozos tengan influencia en la ocurrencia de los sismos locales, como ya se ha demostrado en el campo geotérmico de Los Humeros (Lermo *et al.*, 2001).

Por lo tanto, dada la relación de los pozos productores e inyectores con la sismicidad local se realizó un monitoreo para observar la distribución temporal y espacial de la actividad sísmica provocada por la estimulación ácida realizada a los pozos LV-13 y LV-4, entre septiembre y diciembre de 2004, y sobre todo para definir las fallas o sistema de fallas que se activan con esta estimulación ácida.

## 2. Estructuras y pozos en Las Tres Vírgenes

Además de los volcanes, la manifestación estructural predominante en el área es el conjunto de fallas con dirección NW-SE (Fig. 2). De éstas, la que está más hacia el NE es la Falla El Azufre, que en general corre a lo largo de la depresión topográfica entre el Volcán El Viejo al SW y el complejo Aguajito al NE. La falla más al SW es la Falla La Virgen, que pasa a través de la parte superior del Volcán La Virgen.

La anomalía térmica coincide en general con la intersección de este sistema de fallas de tendencia NW-SE con el Sistema Cimarrón de tendencia N-S (Teysier, 1990), que comprende la Falla Cimarrón además de otras varias fallas y/o fracturas con tendencia N-S (Fig. 2). Estas fallas han sido localizadas en detalle en mapas, sobre todo en las áreas de manifestaciones termales y en los pozos profundos del norte, aunque la mayor extensión de ambos sistemas de fallas está enterrada debajo de rocas volcánicas jóvenes. Según esto, muchas de las trazas de fallas son inferidas.

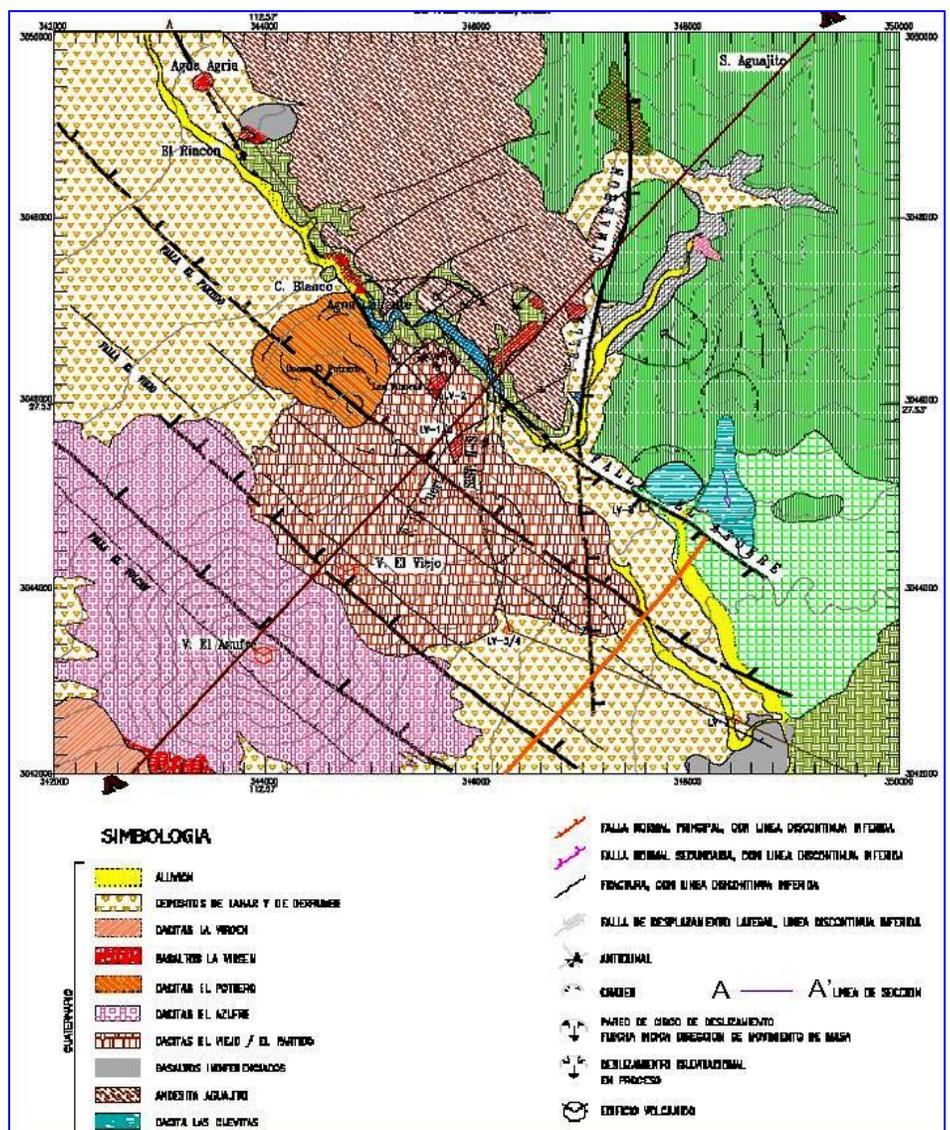


Fig. 2. Geología de Las Tres Vírgenes

El mayor desplazamiento en ambos sistemas de fallas tiene fecha anterior a la formación de Las Tres Vírgenes, y sólo pequeños movimientos han continuado durante tiempos más recientes. Algunos de estos desplazamientos cortan las Dacitas El Viejo, y quizás las rocas más jóvenes de los volcanes El Azufre y Las Tres Vírgenes. El sentido y magnitud del desplazamiento de las diferentes fallas es variable y no siempre bien conocido. Por ejemplo, la Figura 2 muestra que la mayoría de las fallas son normales, aunque en la Falla Las Víboras hay desplazamiento oblicuo y en varias fallas relativamente menores con tendencia N-S, en la vecindad de los pozos LV-1, LV-2 y LV-5, ocurren desplazamientos laterales.

Si bien los mapas de la geología superficial y los correspondientes cortes transversales no muestran estructuras importantes con tendencia NE-SW, interpretaciones de gravimetría han sugerido que la conexión tectónica entre la Falla El Azufre y la Falla La Virgen ha creado varias fallas con tendencia NE-SW que están enterradas debajo de la superficie volcánica. Probablemente estas fallas forman los linderos SE y NW del yacimiento geotérmico (ver Figura 2), y también puede ser que hayan creado parte de la permeabilidad por fracturamiento dentro del yacimiento (CFE, 1998b).

A continuación se describen las características de los pozos productores que se sometieron a acidificación y del pozo inyector LV-8.

#### **Pozo LV-4**

Este pozo se perforó direccionalmente al SW y fue diseñado para cruzar las fallas de tendencia NW-SE a profundidades superiores a 1,500 m. Hubo zonas de pérdida de circulación en la parte superior del basamento granítico y hasta 1,350 m, pero fueron aislados por la T.R. de 9 5/8" de diámetro. Otras pérdidas de circulación sucedieron entre 1,600 y 2,040 m y hubo una pérdida grande aislada aproximadamente a los 2,300 m. La falta de datos estables de temperatura por debajo de los 1,150 m impide determinar si este pozo pasa o no a través de la zona de inversión y llega a la zona con gradiente de incremento de temperatura como se observó en el pozo LV-3, que comparte la misma plataforma.

Durante 2003 el pozo LV-4 presentó una disminución en su producción de vapor a partir del mes de marzo, la cual fue aun menor en el mes de diciembre, por lo que fue necesaria su intervención.

#### **Pozo LV-13**

El pozo LV-13 fue perforado de octubre de 2000 a mayo de 2001 en la zona sur del campo, al este del volcán El Azufre. Es un pozo vertical, con una profundidad final de 2,414 m. Durante la perforación se presentó un problema de la sarta de perforación quedándose dentro del pozo tubería y herramienta de perforación con una longitud de 152 m (de 2,262 a 2,414 m). Tiene liner ranurado de 7" en el intervalo de 1,454 m a 2,262 m.

Se encontraron pérdidas de circulación cercanas a la parte superior de la granodiorita, entre 1,150 y 1,300 m, que fueron aisladas por la T.R. Más profundamente en la granodiorita, hubo pequeñas pérdidas a unos 1,800 m y se notaron pérdidas más grandes por debajo de los 2,050 m.

Este pozo fue estimulado con ácidos a finales de 2002, disminuyendo su producción por incrustación en los últimos meses de 2003, por lo que se sugirió también su intervención.

#### **Pozo LV-8**

El pozo LV-8 se perforó a 2 km al NW del LV-3/4 y a 2 km al SE del LV-1/5, para probar la extensión de la anomalía térmica e inyectar el agua extraída de los pozos de LV-3 y LV-4. Desviado al SW para cruzar la

intersección de la Falla Cimarrón con la Falla El Azufre a 1,700 m de profundidad, el pozo en su lugar encontró zonas permeables a varios intervalos entre 1,000 y 1,665 m.

### 3. Red sísmica y sismicidad

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes está instrumentado con cinco acelerógrafos autónomos marca Kinometrics para estudiar la actividad sísmica de la región y la relación que ésta guarda respecto al complejo volcánico y al patrón geológico-estructural, es decir para detectar cualquier sismo asociado a los sistemas de fallas (El Volcán, El Viejo, El Partido, El Azufre, etc.). Adicionalmente, como parte de este estudio se instalaron otros cuatro sismógrafos, los cuales se distribuyeron dentro de la zona del campo geotérmico, tratando de cubrir azimutalmente los pozos LV-4, LV-13 y LV-8. En la Figura 3 se muestra la distribución espacial de la red permanente (triángulos azules) y la red temporal (triángulos oscuros).

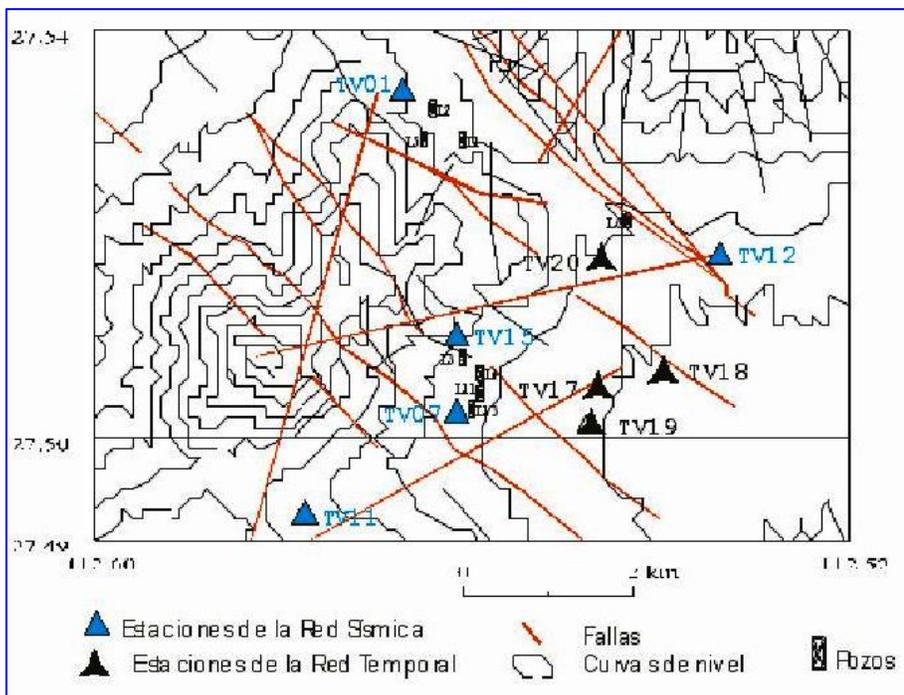


Fig. 3. Distribución de la red sísmica en Las Tres Vírgenes

Para identificar los diferentes tipos de eventos se utilizó la estación TV20 por tener un sensor de velocidad de mayor sensibilidad que los demás, y por tener un registro continuo a partir del 27 de septiembre (inicio de la estimulación ácida del pozo LV-13) al 23 de diciembre del 2004. Después de un análisis detallado en esta estación sísmica y en las demás estaciones, sólo se identificaron 20 sismos localizables. Si se agregan a estos 20 eventos los 17 sismos analizados por Lermo *et al.* (2003), se obtiene un total de 37 sismos locales dentro del campo geotérmico.

Con objeto de uniformizar la localización hipocentral de los 20 sismos identificados en este estudio

con los 17 analizados por Lermo y otros, se re-localizaron en conjunto los 37 sismos seleccionados.

En la Tabla 1 se presenta la localización hipocentral de esos 37 sismos locales. Los resultados muestran que la profundidad focal se encuentra entre 0.4 y 4 km. La magnitud varía entre 0.7 y 2.2 Md; es decir los eventos tienen una magnitud relativamente pequeña pero típica de sismos locales.

### 4. Zonas sísmicas

En la Figura 4, se presenta una distribución epicentral, simbolizados con un círculo oscuro seguido de un número, que corresponde a la Tabla 1. En esta misma figura, se han sombreado con color rojo, azul y amarillo, tres zonas sísmicas, las cuales se describen a continuación.

Nº	Fecha Año/Mes/Día	Hora Origen hh/mm/ss	Latitud Norte	Longitud Oeste	Prof. (km)	Magnitud (Md)
1	2003/09/20	05:25:10.2	27.523°	-112.546°	1.9	1.1
2	2003/09/20	22:47:51.8	27.523°	-112.546°	2.3	1.3
3	2003/09/22	20:08:39.5	27.447°	-112.552°	2.3	0.8
4	2003/10/02	02:00:56.9	27.352°	-112.511°	3.4	1.8
5	2003/10/02	03:03:41.8	27.366°	-112.495°	3.4	1.7
6	2003/10/02	09:00:29.6	27.363°	-112.522°	3.2	1.8
7	2003/10/04	15:39:37.6	27.408°	-112.523°	2.2	1.2
8	2003/10/14	07:33:16.1	27.386°	-112.488°	3.4	2.2
9	2003/10/18	11:53:27.2	27.507°	-112.585°	2.3	1.2
10	2003/10/18	11:56:53.1	27.505°	-112.587°	2.2	0.7
11	2003/10/24	06:15:39.8	27.523°	-112.570°	1.6	1.4
12	2003/11/25	23:18:37.8	27.520°	-112.543°	0.7	1.3
13	2003/11/02	23:20:26.7	27.526°	-112.576°	2.2	1.4
14	2003/11/05	17:35:18.6	27.466°	-112.617°	1.1	1.9
15	2003/11/05	17:35:52.4	27.457°	-112.616°	1.0	1.6
16	2003/11/05	18:51:01.9	27.530°	-112.570°	1.5	1.9
17	2003/11/13	00:51:52.5	27.427°	-112.579°	1.0	1.6
18	2003/11/17	13:44:22.4	27.405°	-112.486°	1.5	2.0
19	2003/11/19	20:22:51.5	27.394°	-112.469°	3.6	1.9
20	2003/12/13	00:59:02.1	27.378°	-112.614°	1.3	1.8
21	2004/01/25	19:45:34.4	27.391°	-112.570°	3.6	1.5
22	2004/07/14	19:13:05.4	27.505°	-112.589°	0.4	1.3
23	2004/08/07	21:21:05.2	27.514°	-112.589°	1.2	1.6
24	2004/08/08	08:20:54.3	27.515°	-112.590°	1.1	1.4
25	2004/08/12	01:19:39.8	27.537°	-112.611°	2.8	1.4
26	2004/08/30	07:30:49.0	27.549°	-112.551°	2.9	1.7
27	2004/09/29	07:34:28.0	27.564°	-112.570°	3.9	1.5
28	2004/10/02	17:53:11.6	27.392°	-112.552°	2.1	1.6
29	2004/10/07	12:12:54.6	27.491°	-112.560°	1.4	1.6
30	2004/10/07	17:14:04.1	27.490°	-112.568°	1.9	1.2
31	2004/10/08	08:46:32.0	27.494°	-112.583°	1.1	1.5
32	2004/10/13	11:15:50.5	27.421°	-112.508°	2.8	1.4
33	2004/10/24	03:26:55.0	27.510°	-112.576°	0.7	1.7
34	2004/10/31	04:26:42.3	27.582°	-112.536°	4.0	1.5
35	2004/11/01	06:28:59.5	27.498°	-112.565°	0.2	0.8
36	2004/11/01	20:48:36.4	27.524°	-112.553°	1.9	1.6
37	2004/11/27	16:01:15.9	27.517°	-112.551°	0.2	1.0

*Tabla 1. Parámetros de los hipocentros de los 37 sismos registrados*

## Zona A

Esta zona señalada en la Figura 4 se ha seleccionado porque existe una gran probabilidad que los 11 sismos locales que se encuentran en ella fueran originados en el sistema de Fallas El Volcán. También se observa que estos eventos se ocurrieron en esta zona antes (números: 9, 10, 22, 23, 24 y 25) y durante la estimulación ácida (números: 29, 30, 31, 33 y 35).

En la Figura 5 se muestra un detalle más preciso de la ubicación de estos 11 sismos, siendo posible identificar dos subzonas simbolizadas con un círculo rojo más intenso (A1) y otro con un círculo morado (A2), con el objeto de resaltar su relación con el periodo de la estimulación ácida.

## Zona B

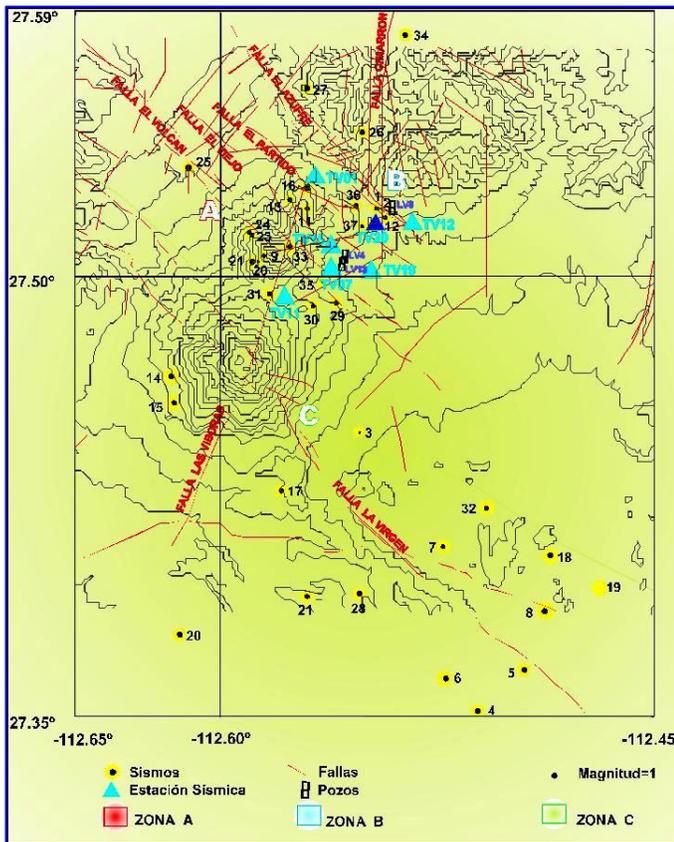


Fig. 4. Distribución de eventos sísmicos durante la estimulación ácida

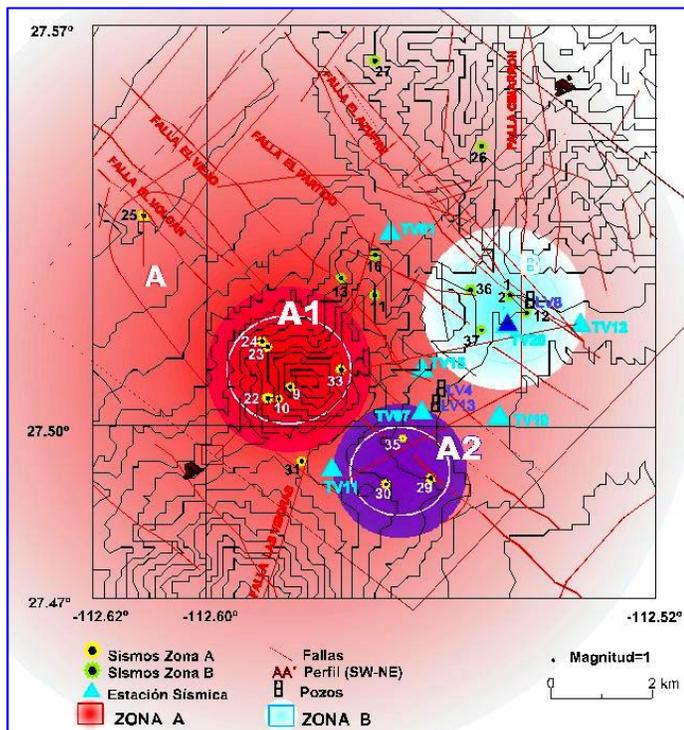


Fig. 5. Zonas de sismicidad asociadas a la estimulación ácida

Esta Zona B (Figuras 4 y 5) agrupa a los sismos localizados cerca del pozo inyector LV-8. Estos sismos que también han sido localizados antes (sismos con los números 1, 2 y 12, Tabla 1) y durante (números 36 y 37) la estimulación ácida, presentan en profundidad dos zonas bien delimitadas, denominadas como subzonas B1 y B2.

### Zona C

Esta zona (Fig. 4) está conformada por 15 sismos locales que se ubican de manera muy dispersa en ambos extremos del sistema de fallas La Virgen. Es probable que estos sismos puedan estar relacionados con la actividad de esta falla y que la distancia epicentro-falla sea debido a la cobertura de la red.

Por otro lado, los sismos localizados fuera de estas tres zonas (A, B y C), pueden estar asociadas a otras fallas. Por ejemplo los eventos 11, 13 y 16 que fueron analizados por Lermo *et al.* (2003) tienen una relación directa con el sistema de fallas El Partido, mientras los eventos 26, 27 y 34 pueden estar asociados a las fallas de El Azufre y El Cimarrón, respectivamente.

Finalmente, de acuerdo a la distribución sísmica de este monitoreo que abarca 16 meses (septiembre de 2003 a diciembre de 2004) se puede concluir que los sistemas de fallas más activos son el de La Virgen y El Volcán, este último probablemente asociado a la producción de los pozos LV-3, LV4, LV11 y LV13.

Con objeto de evaluar la relación entre la sismicidad y la estimulación ácida se seleccionó la estación TV20, la cual es de mayor sensibilidad y mayor capacidad de almacenamiento de información, para permanecer registrando de manera continua el periodo de la estimulación ácida en los dos pozos programados. Esta estación se encuentra cerca del pozo inyector LV-8.

Una vez cuantificados los tipos de señales que se pudieron observar en la estación TV20 durante el periodo de la estimulación ácida (del 26 de septiembre al 13 de diciembre), se correlacionó con las actividades resaltantes durante la estimulación.

En la Figura 6 se muestra la gráfica del número de

sismos contabilizados en cada una de las dos zonas más cercanas a la estimulación ácida (Zona A y Zona B), donde además se incluyeron las dos actividades relevantes en el proceso de estimulación en los dos pozos.

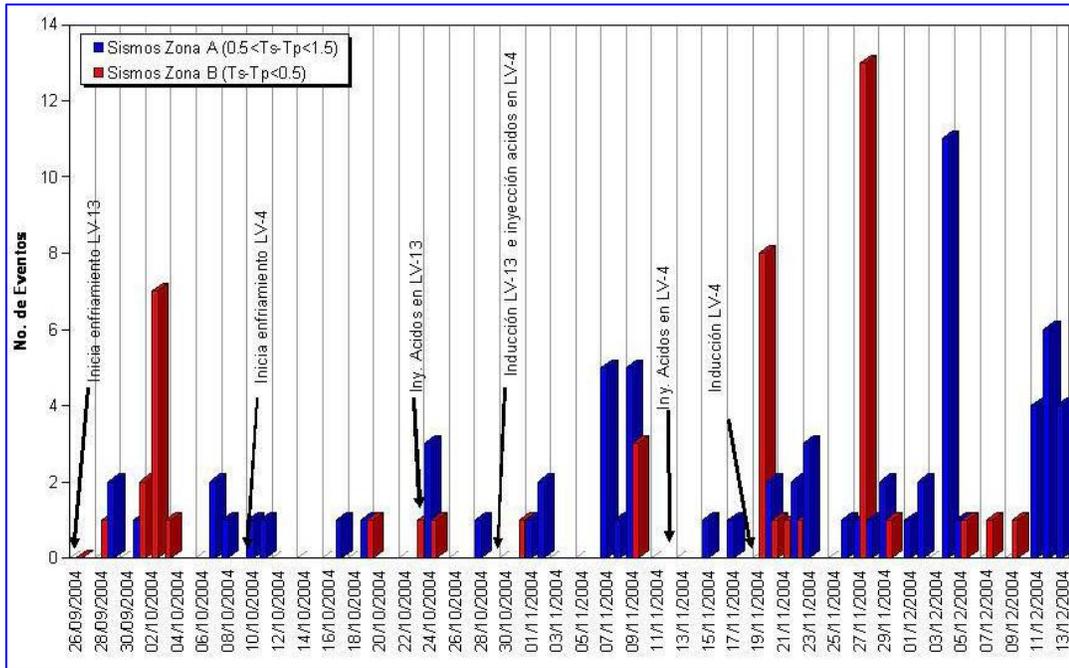


Fig. 6. Eventos sísmicos durante la estimulación ácida

De lo observado en esa Figura 6 se puede interpretar lo siguiente:

En la Zona A (sismos con grandes probabilidades de tener su origen en el sistema de fallas El Volcán) el efecto del inicio del enfriamiento de los dos pozos no cambió el número de sismos que se originan en esa zona (en esta zona ya había sismicidad antes de este proceso).

Sin embargo, el efecto de la inducción y puesta en marcha nuevamente de los dos pozos con una mayor producción, sí aumento la actividad en esta zona, teniendo un máximo de 12 sismos por día a principios de diciembre.

En la Zona B (sismos con grandes probabilidades de tener su origen en dos zonas del pozo inyector LV-8) el efecto del inicio del enfriamiento de los dos pozos sí cambió el número de sismos que se originan en esta zona, ya que se observa un aumento de 6 sismos por día el 2 de octubre, disminuyendo días después. También se puede ver otro incremento el 23 de octubre, días después del inicio del enfriamiento del pozo LV-4. Por otro lado, también se observa un aumento de la actividad sísmica después de la inducción y puesta en marcha nuevamente los dos pozos productores, teniendo un máximo de 11 sismos por día a fines de noviembre.

## 5. Conclusiones

Del estudio del monitoreo de la actividad sísmica en la región de Las Tres Vírgenes durante la estimulación ácida de los pozos LV-13 y LV-4 (septiembre a diciembre del 2004), se concluye lo siguiente:

- Se localizaron un total de 37 sismos de los cuales 22 se ubican dentro de la zona geotérmica de mayor importancia a profundidades del orden de 0.4 a 4 km y magnitudes pequeñas, típicas de sismos locales (0.7 a 2.2 Md), logrando definir dos zonas sísmicas de importancia. Una está asociada al sistema de fallas El

Volcán (Zona A) y la segunda al pozo inyector LV-8 (Zona B). También se reconocieron de manera preliminar dos subzonas en cada una de estas zonas relacionadas con la estimulación ácida.

- En la Zona A el efecto de la inducción y puesta en marcha de los dos pozos estimulados con una mayor producción de vapor el 30 de octubre y 17 de noviembre de 2004, respectivamente, aumentó la actividad sísmica hasta un máximo de 12 eventos por día a principios de diciembre.

- En la Zona B el efecto del inicio del enfriamiento de los dos pozos cambió el número de sismos que se originan en esta zona, ya que se observó un aumento de 6 sismos por día el 2 de octubre, disminuyendo días después. Por otro lado, también se observó un aumento de la actividad sísmica después de la inducción y puesta en producción nuevamente los dos pozos productores, registrándose un máximo de 11 sismos por día a fines de noviembre.

- Finalmente, de acuerdo a la distribución sísmica de este monitoreo de 16 meses (septiembre del 2003 a diciembre del 2004) se puede concluir que los sistemas de fallas más activos son los de El Volcán y El Viejo. Las nuevas propuestas de perforación de pozos productores en este campo geotérmico deberán estar apoyadas en estos resultados.

## Referencias

Capra, L, J. Macías, J. Espíndola, y C. Siebe (1998). Mapa geológico del complejo volcánico de Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, Mexico. Inst. Geof. UNAM. Rev. JVGR.

Chavacán, M., J. Lermo y L. Quintanar (2004). Determinación de una escala de magnitud para temblores corticales en la parte central del Cinturón Volcánico Mexicano.

Comisión Federal de Electricidad (1998a). Ingeniería de Yacimientos del Campo Geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S., México. Estado Inicial. CFE, informe interno No. JP-LTV-011-98. Inédito.

Comisión Federal de Electricidad (1998b). Proyecto Geotérmico Las Tres Vírgenes, B.C.S., Estado Actual. CFE, informe interno No. JP-LTV-012-98. Inédito.

Guerrero Guadarrama, J.L. (1997). Actividad sísmica registrada en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B.C.S., CFE, informe interno No. DEX-TV-023/97. Inédito.

López, A., G. García y F. Arellano (1995). Geological and geophysical studies at Las Tres Vírgenes, B.C.S., Mexico, geothermal zone. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 18, pp. 275-280.

Lermo, J., J. Hurtado, J. Soto y J. Flores (2000). Análisis de la sismicidad del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., Informe Técnico Final. CFE, informe interno No. DEX-HU-008/2000. Inédito.

Lermo, J., F. Romero, Y. Antayhua, I. Bernal, D. Veja y M. Chavacán (2004). Análisis de la actividad sísmica en el campo de Las Tres Vírgenes, B.C.S. Convenio 9400012354. Proyecto Interno 3539. Instituto de Geofísica de la UNAM. Inédito.

Rodríguez, M. (2000). Procesado e interpretación de datos sísmicos registrados en la zona geotérmica de Las Tres Vírgenes, B.C.S., en el periodo Diciembre 1995-Julio 1996. Informe elaborado para la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE. Inédito.

Teyssier, C. (1990). Geothermal Project Las Tres Vírgenes, Baja California, a Structural Geology Report. Department of Geology and Geophysics, University of Minnesota, Minneapolis. Inédito.

Wong, V., C. Rebolgar y L. Murguía (2001). Attenuation of Coda Waves at Tres Vírgenes Volcanic Area, Baja California Sur, México. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 91, 4, pp. 683-693

# Modelado del flujo de masa y energía en chimeneas submarinas usando el método de elementos finitos

*Mario César Suárez-Arriaga*

Facultad de Ciencias Físico Matemáticas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo – UMSNH, Edificio “B”, Ciudad Universitaria, Morelia, Mich., 58090, México. Correo: [msuarez@zeus.umich.mx](mailto:msuarez@zeus.umich.mx).

---

## Resumen

La circulación hidrotermal en las cordilleras profundas del mar es un proceso geológico fundamental que controla la transferencia de masa y energía desde el interior de la Tierra, a través de la litosfera oceánica, hacia la hidrosfera y hasta la atmósfera. Los reservorios geotérmicos submarinos contienen un potencial infinito de energía. Las propiedades y comportamiento de un sistema de tal complejidad no pueden ser explicadas completamente por el estudio aislado de cada uno de sus componentes. Estos sistemas actúan como un todo y no es posible entender su funcionamiento sin considerar las interacciones entre todas sus partes. La energía submarina profunda se relaciona con la existencia de aberturas y fisuras que surgen en muchos lugares a lo largo de los centros de dispersión entre las placas tectónicas. Esos lugares en la corteza oceánica tienen una longitud total de 65,000 km. Hay dos tipos de recursos: los profundos, localizados a más de 2000 m bajo del nivel del mar, y los superficiales, cerca de las plataformas continentales, entre 1 y 50 metros de profundidad. Ambos tipos existen en las costas mexicanas del Océano Pacífico.

El fluido hidrotermal submarino sale por fisuras profundas del piso marino a temperaturas entre 350° C y 400° C, con velocidades aproximadamente de 0.70 a 2.36 m/s, mezclándose con el agua del mar a 2° C. La depositación de minerales que acompañan al fluido provoca la formación de chimeneas submarinas que llegan a alcanzar más de 15 metros de altura. Los flujos termales convectivos medidos en algunas chimeneas van de 1 a 93 MW<sub>T</sub>. El valor promedio para un solo orificio es aproximadamente de 8 MW<sub>T</sub>. Con unos pocos datos medidos es posible estimar una altura correspondiente para la pluma formada de 370 m sobre el piso oceánico. Se han observado en el Océano Pacífico plumas con flujos mayores a los 1000 MW<sub>T</sub>. Tales megaplumas son el resultado impresionante de una descarga instantánea de flujo de calor en la fuente profunda correspondiente. También, en la Cordillera Meso-Atlántica se han observado chimeneas llamadas Fumadoras Blancas, más pequeñas y con temperatura moderada entre 250° C y 300° C. Con todos los datos disponibles, se estima una pérdida de calor promedio para la corteza oceánica de aproximadamente 1.5 W<sub>T</sub>/m<sup>2</sup>. El mismo parámetro predicho para las cordilleras está entre 2 y 100 W<sub>T</sub>/km (o sea, por unidad de longitud). Se estima que las descargas hidrotermales submarinas transportan aproximadamente el 30% del calor cedido por la corteza oceánica.

Las interacciones hidrotermales submarinas a temperaturas y presiones elevadas influyen la geoquímica, la composición de la corteza oceánica y a los océanos mismos. Este mecanismo produce campos de “ventilación hidrotermal” capaces de soportar comunidades biológicas extrañas y diversas. A partir de poblaciones microbianas que se alimentan de la energía de sustancias químicas disueltas con producción de carbono orgánico, se forman los primeros eslabones de una cadena alimenticia ligada a la energía geotérmica submarina. La comprensión de estas transferencias de masa y energía entre esos complejos subsistemas geológicos, químicos, geofísicos y biológicos, requiere el desarrollo de modelos integrados que incluyan las distintas interacciones entre ellos.

En este trabajo, además de una descripción actualizada de los procesos involucrados, se presenta una introducción al modelado de procesos hidrotermales submarinos utilizando el método numérico de

Elementos Finitos. Este estudio ha sido propuesto y aceptado como tema oficial de investigación por la Coordinación de la Investigación Científica de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

*Palabras clave:* Geotermia submarina, chimeneas oceánicas, modelado matemático, elementos finitos.

## **Modeling of mass and energy in submarine chimneys using the finite-element method**

### **Abstract**

Hydrothermal circulation along the deep ridges of the sea is a complex process controlling mass and energy transfer from the interior of the earth through the oceanic lithosphere, into the hydrosphere and then to the atmosphere. The system extends for about 65,000 km along the earth's oceanic crust and the deep, submarine energy is related to the hydrothermal vents found in many places along the oceanic spreading centers between tectonic plates. The properties and behavior of such a complex system cannot be thoroughly explained by an isolated understanding of each one of each component. The system acts as a whole and it is not possible to understand its operation without considering the interactions among its parts. There are two types of resources: the deep ones over 2000 m below sea level and those 1 to 50 m deep near the continental platforms. Both exist along the Mexican coast of the Pacific Ocean.

The hydrothermal fluid in the system at 350° C – 400° C exits the seafloor at velocities between 0.7 m/s and 2.36 m/s and mixes with seawater at 2° C. Many vent fields have vertical structures forming chimneys up to 15 m high built of materials precipitated from the heated vent fluid as it mixes with seawater. Thermal flows measured at these chimneys, called black smokers, range from 1 to 93 MW<sub>T</sub>, with an accepted average value for a single orifice of about 8 MW<sub>T</sub>. With these data it is possible to estimate a plume's height of about 370 m above the seafloor. Some plumes have been observed in the Pacific Ocean with thermal flows of about 1000 MW<sub>T</sub>. Such megaplumes could be the impressive result of an instantaneous and huge release of heat flow at the corresponding source. In the Mid-Atlantic Ridge, small, white smoker chimneys have been observed with measured temperatures between 250° C and 300° C. With the available data it is predicted that the average hydrothermal heat loss for the oceanic crust reaches about 1.5 W<sub>T</sub>/m<sup>2</sup>. The same parameter is predicted for the ridges between 2 and 100 MW<sub>T</sub>/km (per unit ridge length). It is estimated that submarine hydrothermal discharges remove about 30 percent of the heat lost from the oceanic crust.

Submarine hydrothermal interactions at high pressures and high temperatures influence the composition of the oceanic crust and oceanic chemistry. The mechanism produces hydrothermal vent fields able to support diverse biological communities, starting from microbial populations that feed on the energy of dissolved chemical substances with the production of organic carbons. These events form the first link of a feeding chain supported by geothermal energy. The understanding of the mass and energy flows among those complex geological, chemical, geophysical and biological subsystems requires the development of integrated interaction models.

This work presents an updated description of the processes involved and an introduction to the modeling of submarine hydrothermal mechanisms using the Finite Element Method. The proposed study has been officially approved as a research subject by the Coordinación de la Investigación Científica of the Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH).

*Keywords:* Oceanic geothermics, oceanic chimneys, mathematical model, Finite Elements.

---

## 1. Introducción

La circulación hidrotermal en las cordilleras profundas del mar es un proceso fundamental en el transporte de masa y energía desde el interior de la Tierra a través de la litosfera oceánica, hacia la hidrosfera y hasta la atmósfera. Las propiedades de un sistema tan complejo no pueden ser explicadas completamente por la comprensión aislada de cada uno de sus componentes. Estos sistemas actúan en conjunto y no es posible entender su funcionamiento sin considerar las interacciones entre todas sus partes. Las interacciones hidrotermales submarinas influyen la composición de la corteza oceánica y la química de los mares.

El fluido que circula en los sistemas hidrotermales marinos es alterado químicamente durante su paso a través de la corteza oceánica a elevadas temperaturas y presiones. Este mecanismo produce campos termobiológicos a partir de poblaciones microbianas que usan la energía de especies químicas disueltas para producir carbono orgánico, (Humphris *et al.*, 1995). El transporte de gases producto de la actividad hidrotérmica del océano hacia la atmósfera, extiende la influencia de esta actividad más allá de los océanos mismos. La comprensión de estos complejos flujos de masa y energía entre los subsistemas geológico, geoquímico, geofísico y biológico requieren el desarrollo de modelos integrados que incluyan las interacciones entre todos ellos. En este trabajo se presenta la primera parte de uno de ellos, usando el método de Elementos Finitos para simular el reservorio, acoplado a un modelo exacto para el cálculo de la distribución de temperatura y el flujo de calor en direcciones radial y vertical para la chimenea submarina.

## 2. Descargas geotérmicas submarinas, chimeneas y plumas

Desde el punto de vista de su posición vertical, hay dos tipos de sistemas hidrotermales submarinos: los recursos profundos, localizados en ciertos lugares a lo largo de las cordilleras entre las placas tectónicas de la corteza oceánica a más de 2000 m bajo del nivel del mar, y recursos poco profundos cerca de las plataformas continentales entre 1 y 50 metros de profundidad. Los manantiales calientes y los géiseres son equivalentes a las plumas localizadas en tierra firme. La mayoría de las fisuras conocidas en el mar están en las cordilleras meso-oceánicas (CMOs) del mar profundo (Damm, 1995). La cresta de las CMOs es el lugar donde se crea nueva litosfera a través de la actividad ígnea. Tales procesos magmáticos proporcionan la energía para la circulación hidrotermal de agua de mar a través de la corteza oceánica, originando interacción agua-roca a temperaturas entre 200° C y 400° C, (Grijalva, 1986; Mercado, 1990; Damm, 1995; Fornari y Embley, 1995). El mecanismo resultante da lugar a descargas geotérmicas en el océano, a profundidades entre 840 y 3600 metros, que contribuyen considerablemente al equilibrio del calor terrestre global. Los campos de fisura observados tienen típicamente decenas de metros de diámetro y cubren superficies cuyas áreas van de 4 a 800 m<sup>2</sup> (Hessler y Kaharl, 1995).

Las plumas son creadas por descargas de fluido en los sistemas termales del mar profundo (Fig. 1). La pluma en ascenso transporta fluido más salino, junto con la columna de agua, afectando la circulación termosalina de los océanos (Damm, 1995). Los orificios de descarga activos cubren sólo un porcentaje mínimo del piso marino, pero hay un rango enorme de escalas espaciales



Fig. 1. El nacimiento de la pluma en una chimenea a 3000 m de profundidad (BBC, 2004)

involucradas en estos procesos. La mezcla de fluidos formando la pluma puede subir cientos de metros y difundirse lateralmente decenas o miles de kilómetros. Las plumas son detectadas fácilmente por trazadores físicos y químicos. Por eso el estudio de las plumas es una herramienta útil en la exploración geotérmica submarina.

En 1986 se descubrió una mega-pluma en la región de la cordillera Juan de Fuca en el Océano Pacífico, teniendo una extensión aproximada de 20 km, 600 m de espesor y  $10^{11}$  MJ de exceso de calor incluido.

Los movimientos divergentes de las placas en el mar profundo producen fisuras, permitiendo el transporte vertical de calor magmático hacia el suelo del océano. Cuando el agua fría del mar entra en esas fisuras, se calienta y cambia químicamente durante su contacto con la roca. De esta manera la corteza oceánica se refresca significativamente por convección. Las áreas de recarga donde el agua de mar penetra la corteza son extensas y difusas (Alt, 1995). El mecanismo produce precipitación de minerales que van formando estructuras verticales en forma de chimeneas (Fig. 1). Los depósitos son compuestos de sulfuro de Cu-Fe acumulados a lo largo del cuerpo cilíndrico de la chimenea.

Las descargas de esas chimeneas pueden alcanzar temperaturas de hasta  $403^{\circ}\text{C}$  (Grijalva, 1986; Mercado, 1990; Hannington *et al.*, 1995). La primera fase consiste en precipitación en paredes porosas que contienen inclusiones finas de sulfuro. Esta fase ocurre cuando el fluido hidrotermal está a  $350^{\circ}\text{C}$  y el flujo alcanza velocidades de aproximadamente 1 m/s, mezclándose con el agua de mar a  $2^{\circ}\text{C}$ . Las velocidades medidas en las plumas a unos 5 centímetros sobre los orificios de chimeneas variaron de 0.70 a 2.36 m/s (Kingston, 1995). La pluma mostrada en la Figura 1 corresponde a un flujo de calor de aproximadamente  $60\text{ MW}_T$ , con un gradiente de densidad constante dado por la siguiente ecuación:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{d\rho}{dz} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ s}^{-2} \quad (1)$$

Donde  $g$  es la gravedad,  $\rho_0$  es la densidad local promedio,  $d\rho/dz$  es el gradiente vertical de densidad, cuyo valor en este caso es:  $d\rho/dz \approx 1.53 \times 10^{-4} \text{ kg/m}^4$ .  $N$  es llamada la frecuencia de flotación de Brunt-Väisälä. Turner (1973) estableció otra ecuación útil para estimar la altura máxima  $Z_M$  que alcanza una pluma en función del flujo de flotación  $F_0$  y la frecuencia  $N$ :

$$Z_M = 5 \left( \frac{F_0}{\pi} \right)^{\frac{1}{4}} N^{-\frac{3}{4}} \quad (2)$$

A partir de datos medidos por Lupton (1995), obtenemos  $F_0 = 0.17 \text{ m}^4 \text{ s}^{-3}$ . Usando la fórmula de  $N$ , es posible estimar la altura máxima de la pluma:  $Z_M \approx 370 \text{ m}$  sobre el piso oceánico. Según estos modelos, una pluma de 750 m corresponderá a un flujo de calor de  $1000 \text{ MW}_T$  (Figura 2).

Otros flujos termales medidos en chimeneas del Océano Pacífico, varían entre 1 y  $93 \text{ MW}_T$ . El valor promedio aceptado para un solo orificio es aproximadamente de  $8 \text{ MW}_T$  (Lupton, 1995; Bemis *et al.*, 1993). La débil dependencia de  $Z_M$  con respecto al flujo de calor efectivo en la fórmula de Turner, indica que la megapluma observada en 1986 en la región de Juan de Fuca pudo haber afectado una columna de agua de hasta 1000 m sobre el piso marino.

La existencia de megaplumas podría ser el efecto impresionante de gigantescas descargas instantáneas de calor en las fuentes correspondientes. Esto lleva a la conclusión de que el calor convectivo total emergiendo del océano se descarga en ambas formas: conducción continua estacionaria y megaplumas. Alt (1995) estimó que las descargas hidrotermales submarinas transportan aproximadamente hasta el 30% del calor terrestre

cedido por la corteza oceánica. El flujo de calor conductivo promedio en el Cinturón Volcánico mexicano es de unos  $0.10 \text{ W}_T/\text{m}^2$  (García, 2000). El flujo de calor submarino medido en algunos lugares del Golfo de California es del orden de  $0.34 \text{ W}_T/\text{m}^2$  a una temperatura media de  $330^\circ \text{C}$  (Mercado, 1990).



Fig. 2. Flujo de calor en una pluma (BBC, 2004).

Usando dos modelos distintos, Stein *et al.* (1995) predicen una pérdida de calor en la corteza oceánica de aproximadamente  $1.5 \text{ W}_T/\text{m}^2$ . El mismo parámetro para las cordilleras oscila entre 2 y  $100 \text{ MW}_T/\text{km}$  (por unidad de longitud). El valor mínimo es para un flujo lento conductivo y el último valor corresponde a una pluma con un flujo de  $1000 \text{ MW}_T$ . Así, las plumas transportan más calor que el flujo superficial estacionario de la litosfera.

### 3. El método de elementos finitos en reservorios submarinos

Elementos Finitos es un método de aproximación numérica para la solución aproximada de ecuaciones en derivadas parciales (EDP) en el dominio espacial considerado para el reservorio. El dominio se divide en varios elementos en número finito (EF), a lo cual se le llama creación de la malla. La EDP se transforma en una ecuación integral llamada forma débil. Leyes físicas apropiadas se aplican a cada EF. En el caso de los reservorios submarinos, son la conservación de la masa, de la energía y la Ley de Darcy. La geometría de cada EF es, *a priori*, muy simple como por ejemplo, un triángulo o un rectángulo. Una función continua de cada variable desconocida (presión, temperatura) se aproxima usando interpoladores, como por ejemplo funciones trigonométricas, o funciones lineales por pedazos en cada subdominio formado por los nodos del EF. Las incógnitas son los valores discretos de la variable de campo en esos nodos. Enseguida se ligan entre sí todos los EF en un proceso de ensamblado. Este procedimiento conduce a un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales válidas en todo el sistema o dominio que pueden resolverse fácilmente para aproximar finalmente a las variables de campo, por ejemplo la presión y la temperatura.

Una vez generada la malla, el sistema de ecuaciones simultáneas se formula usando distintos tipos de enfoques existentes: el de Hamilton o principio de la Energía Potencial Mínima, el Método de los Residuos Ponderados y el Método de Galerkin (Zienciewicz y Cheung, 1965). Para ilustrar brevemente la formulación y uso del MEF, consideremos la siguiente EDP que describe la distribución estacionaria de fluido a la temperatura  $T(x, y)$  en un reservorio geotérmico submarino que está ocupando una región  $\Omega$  del espacio. Sea el cambio de variable  $u = T - T_0$ , donde  $T_0$  es la temperatura del agua marina aproximadamente a  $4^\circ \text{C}$ :

$$\Delta u = f; \forall (x, y) \in \Omega; u = g \text{ en } \Gamma = \partial\Omega; f(x, y) \in \mathbf{R}; \text{ o equivalentemente:}$$

$$\left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) = f; \forall (x, y) \in \Omega; u = \bar{u} \text{ en } \Gamma_u; \frac{\partial u}{\partial n} = q \text{ en } \Gamma_n; \text{ donde } \Gamma_u \cup \Gamma_n = \Gamma \quad (3)$$

Sea  $v(x, y)$  otra función definida sobre  $\Omega$ , su producto escalar con  $u$  es:  $\langle u, v \rangle = \iint_{\Omega} u v \, d\Omega$  que satisface las mismas condiciones de frontera de la función incógnita  $u$ .

Sea  $\tilde{u}(x, y) = \sum_{j=1}^N \alpha_j \varphi_j(x, y); (x, y) \in \Omega$ , una función de aproximación a la solución del problema (3) definida

por funciones de interpolación  $\varphi_j$  y por los coeficientes desconocidos  $\alpha_j$  respectivos. Multiplicando por  $\varphi_j$  e integrando la EDP (3), mediante la aplicación del Teorema de Green:

$$\int_{\Omega} \bar{\nabla} u \cdot \bar{\nabla} \varphi_j d\Omega + \int_{\Omega} f \varphi_j d\Omega = \int_{\Gamma} \varphi_j \frac{\partial u}{\partial n} d\Gamma \quad (4)$$

Como la aproximación no es exacta, podemos definir una función residuo como el error dado por:

$$R(\tilde{u}) = \Delta \tilde{u} - f = \Delta \left( \sum_{j=1}^N \alpha_j \varphi_j \right) - f \quad (5)$$

El Método de Galerkin consiste en minimizar en cierta forma este residuo, haciéndolo ortogonal a las funciones base:  $\langle R, \varphi_i \rangle = 0, \forall i = 1, N$ . Aplicando esta condición a la ecuación (5) y sustituyendo en (4), encontramos que la solución aproximada a la EDP (3) es dada por un sistema lineal de ecuaciones algebraicas  $\vec{u} = \mathbf{A}^{-1} \cdot \vec{b}$ , donde los elementos de la matriz A son coeficientes integrales de la forma:

$$A_{ij} = \int_{\Omega} \bar{\nabla} \varphi_i \cdot \bar{\nabla} \varphi_j d\Omega \quad (6)$$

Considerando ahora las siguientes funciones de interpolación en la expresión  $\tilde{u}(x, y) = \sum_{j,k=1}^N \alpha_{jk} \varphi_{jk}(x, y)$ :

$$A). \varphi_{jk}(x, y) = \varphi_j(x) \varphi_k(y) = \text{Sen}\left(\frac{j\pi x}{a}\right) \text{Sen}\left(\frac{k\pi y}{b}\right) \quad (7)$$

Se encuentra que el método de Galerkin aplicado a cada una de estas funciones *base* proporciona las funciones de aproximación para cada caso. Para  $f = c$  (constante), los coeficientes son dados por la fórmula:

$$\alpha_{jk} = \frac{4c(1 - \text{Cos } j\pi)(1 - \text{Cos } k\pi)a^2b^2}{\pi^4 jk(a^2k^2 + b^2j^2)}. \quad (8)$$

Utilizando elementos finitos rectangulares con 4 nodos ( $u_1, u_2, u_3, u_4$ ) en los puntos de coordenadas respectivas:  $(-b, -c), (b, -c), (b, c), (-b, c)$  y funciones base o de interpolación bilineales de la forma:

$$u^e(x, y) = a_1 + a_2x + a_3y + a_4xy = \sum_{i=1}^4 u_i N_i(x, y) \quad (9)$$

Donde  $u^e$  es la solución aproximada en cada uno de los elementos finitos construídos. Las funciones  $N_i$  son completamente detalladas en las fórmulas básicas siguientes:

$$N_1(x, y) = \frac{(b-x)(c-y)}{4bc}, \quad N_2(x, y) = \frac{(b+x)(c-y)}{4bc} \quad (10)$$

$$N_3(x, y) = \frac{(b+x)(c+y)}{4bc}, \quad N_4(x, y) = \frac{(b-x)(c+y)}{4bc}$$

#### 4. Simulación de la anomalía térmica en una chimenea submarina con EF

Se aplicó el modelo numérico antes descrito a una chimenea hidrotermal con los datos disponibles y mencionados en párrafos anteriores. La distribución de temperaturas en la vecindad inmediata de la chimenea se muestra en la Figura 3, para un diámetro de descarga de 10 cm, expulsando fluido a 1 m/s y a 350° C de temperatura. La influencia de la anomalía y el gradiente térmico se aprecian en un radio de 30 cm donde la temperatura desciende hasta 250° C.

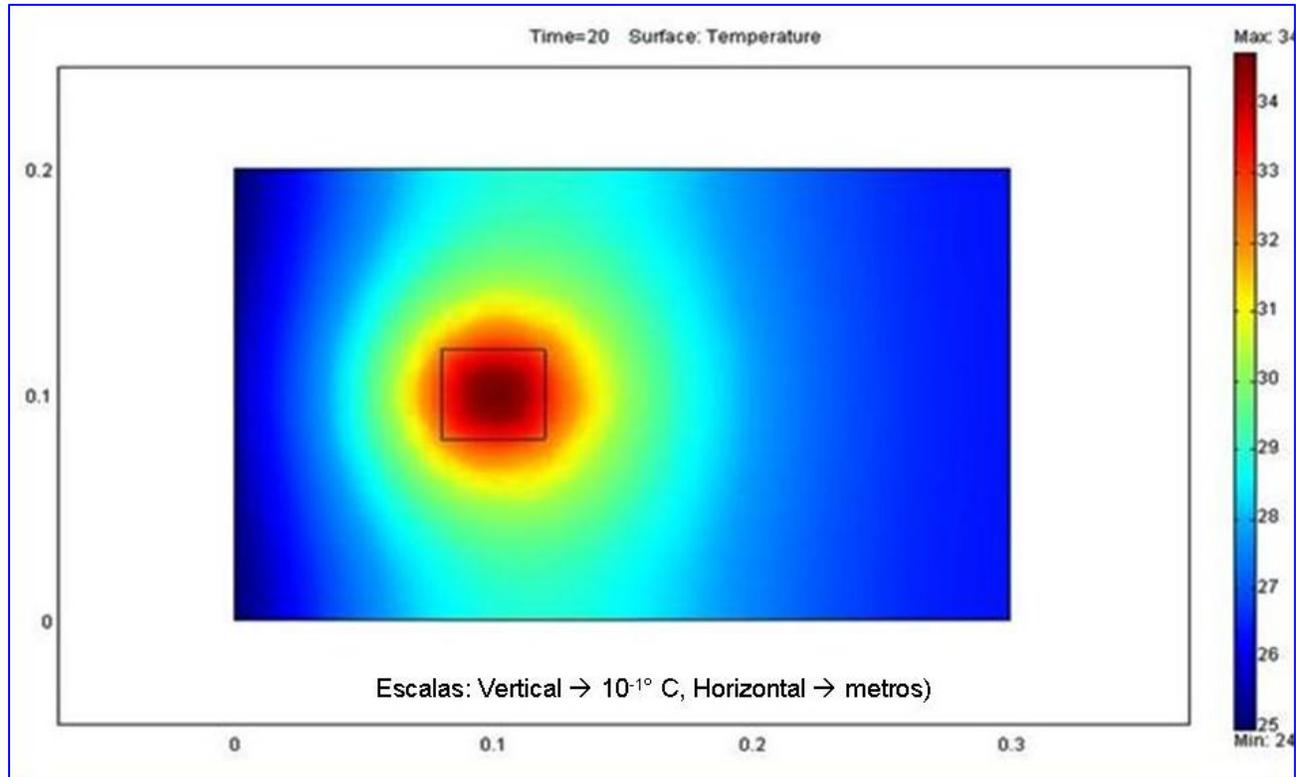


Fig. 3. Distribución de temperatura y gradiente en el plano (x, y) en una chimenea hidrotermal

## 5. Conclusiones

- Los recursos o reservas geotérmicas submarinas contienen un potencial prácticamente infinito de energía. Los procesos volcánicos y tectónicos controlan la actividad hidrotermal en las cordilleras y centros de dispersión meso-oceánicos influenciando todos los aspectos de la oceanografía. Esto incluye tanto a la circulación general del océano como a su geoquímica y a la atmósfera misma.

- El fluido hidrotermal difiere significativamente en su composición del agua marina, a causa de su continua interacción con la corteza oceánica. Las interacciones agua-roca en las zonas de recarga y de descarga determinan la naturaleza de la litosfera oceánica y de la química de fluidos hidrotermales emergiendo del fondo del mar. Las chimeneas naturales que se forman por depósito de minerales descargan flujos de agua y gases a temperaturas de unos 350° C a 2600-3000 m de profundidad en muchos lugares localizados en los océanos.

- Con los datos disponibles de fuentes diferentes se puede realizar una estimación preliminar de la cantidad de energía convectiva geotérmica contenida en los sistemas submarinos y que escapa a través de fisuras en el piso oceánico: los fluidos hidrotermales a temperaturas entre 350° C y 400° C son expulsados de las chimeneas a velocidades entre 70 cm/s y 236 cm/s, mezclándose con el agua marina profunda a 2° C. Los

flujos térmicos medidos en algunas chimeneas van de 1 a 93 MW<sub>T</sub>, con un valor promedio para un solo orificio de 8 MW<sub>T</sub>. Usando fórmulas prácticas es posible estimar la altura máxima de las plumas formadas en las chimeneas: 370 m corresponden a un flujo de calor de 60 MW<sub>T</sub>; una megapluma de 750-1000 m de altura, corresponde a un flujo de calor cercano a los 1000 MW<sub>T</sub>. Se predice una pérdida de calor promedio hidrotermal en la corteza oceánica de 1.5 W<sub>T</sub>/m<sup>2</sup>. Este mismo parámetro en las cordilleras oscila entre 2 y 100 MW<sub>T</sub>/Km. Se estima que las descargas hidrotermales submarinas transportan alrededor del 30% del calor total perdido en la corteza oceánica. Como una fuente primaria de energía, los sistemas geotérmicos submarinos son una inmensa esperanza para el futuro.

## Referencias

- Alt, J. (1995) Subseafloor Processes in Mid-Ocean Ridge Hydrothermal Systems. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, pp. 85-114.
- BBC (2004). *Blue Planet: A Natural History of the Oceans. The Abyss*. Video in DVD, No. 1. Folio and Tycoon Entertainment Group Eds.
- Bemis, K., R. von Herzen, and M. Mottl (1993). Geothermal Heat Flux from Hydrothermal Plumes on the Juan de Fuca Ridge. *Journal of Geophysical Research*, **98**, pp. 6351-6365.
- Damm, K. (1995) Controls on the Chemistry and Temporal Variability of Seafloor Hydrothermal Fluids. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, pp. 222-247.
- Fornari, D. and R. Embley (1995). Tectonic and Volcanic Controls on Hydrothermal Processes at the Mid-Ocean Ridge: An Overview Based on Near-Bottom and Submersible Studies. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, pp. 1-46.
- García G., H. (2000) Modelo del Estado Térmico Inicial del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México. Tesis de Doctorado, Instituto de Geofísica, UNAM. Inédito.
- Grijalva, N. (1986) Investigación de la Energía Geotérmica en la Depresión de Wagner en el Golfo de California. Latitud 31°00' al 31°15' y Longitud 113°50' al 114°10'. Reporte interno para la CFE. Inédito.
- Hannington, M., I. Jonasson, P. Herzig, and S. Petersen (1995). Physical and Chemical Processes of Seafloor Mineralization at Mid-Ocean Ridges. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, pp. 115-157.
- Hessler, R. and V. Kaharl (1995). The Deep-Sea Hydrothermal Vent Community: An Overview. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, pp. 72-84.
- Humphris, S.E., R.A. Zierenberg, L.S. Mullineaux, and R.E. Thomson, Editors (1995). Seafloor Hydrothermal Systems. Physical, Chemical, Biological and Geological Interactions. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, ISBN 0-87590-048-8, 466 pp.
- Kingston, M. (1995) Modeling Chimney Growth and Associated Fluid Flow at Seafloor Hydrothermal Vent Sites. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, pp. 158-177.
- Lupton, J. (1995) Hydrothermal Plumes: Near and Far Field. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, pp. 317-346.

- Mercado, S. (1990) Manifestaciones Hidrotermales Marinas de Alta Temperatura (350° C) Localizadas a 21° N, a 2600 m de Profundidad en la Elevación Este del Pacífico. *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, **6**, No. 3, pp. 225-263.
- Stein, C., S. Stein, and A. Pelayo (1995). Heat Flow and Hydrothermal Circulation. *Geophysical Monograph* **91**, American Geophysical Union, pp. 425-445.
- Turner, J.S. (1973) *Buoyancy Effects in Fluids*. Cambridge University Press, 368 pp.
- Zienciewicz, O. and Y. Cheung (1965). Finite elements in the solution of Field Problems. *Engineer*, Vol. 200, pp. 507-510.

# Regulación del vapor en caso de falla a unidades a contrapresión de 5 MW en el campo de Los Humeros, Pue., México

*César Rosales López*

Comisión Federal de Electricidad, Carretera Perote-Los Humeros, Campamento Maztaloya, Puebla. E-mail: [césar.rosales@cfe.gob.mx](mailto:césar.rosales@cfe.gob.mx)

---

## Resumen

Cuatro de las siete unidades de 5 MW a contrapresión que operan en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue., son alimentadas por un solo vaporducto que reúne el vapor de nueve pozos productores. Cuando ocurría una falla en alguna de estas unidades y se abría por completo la válvula de excedencia para desviar el vapor, se observaba una reducción en el flujo de vapor que llegaba a las otras tres unidades, lo que a su vez ocasionaba que la generación de electricidad se redujera notoriamente. En este trabajo se analiza y explica la causa de ello, mediante la comparación de este sistema interconectado de suministro de vapor con un circuito eléctrico, y se explica la solución que se encontró e implementó en el campo de Los Humeros para regular el suministro continuo y uniforme de vapor, con resultados satisfactorios a varios meses de su implementación en las cuatro unidades interconectadas.

*Palabras clave:* Suministro de vapor, unidades a contrapresión, falla, válvula de excedencia, circuitos eléctricos.

## Steam regulation for 5 MW back-pressure units when a failure occurs in the Los Humeros, Pue., field, Mexico

### Abstract

Four out of the seven back-pressure power units of 5 MW operating in the Los Humeros geothermal field, State of Puebla, Mexico, are fed by one steam pipe gathering the steam produced by nine wells. When a failure occurred in any of the units and the excedence valve had to be open to deviate the steam, a decrease in the steam flow for the remaining units was noted, along with lower electrical generation. The cause for that is analyzed and explained in this paper by comparing the interconnected steam supply system to an electric circuit. A way to maintain a uniform and continuous supply of steam in the Los Humeros field has been found. It was implemented several months ago and the problem has not reoccurred.

*Keywords:* Steam supply, back-pressure units, failure, excedence valve, electric circuits.

---

## 1. Introducción

El campo geotérmico de Los Humeros, localizado en los límites de los estados Puebla y Veracruz, es uno de los cuatro campos geotérmicos en operación en México. Operan en él siete unidades a contrapresión de 5 MW de capacidad, cuatro de las cuales (las números 1, 4, 5 y 7), ubicadas en la zona norte, se encuentran interconectadas por medio de un vaporducto conocido localmente como vaporducto anillo. El vapor requerido por estas cuatro unidades es suministrado por nueve pozos productores que se encuentran en su periferia.

Aunque el personal que opera los pozos y vaporductos del campo y el que opera las unidades turbogeneradoras es de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), pertenece a áreas diferentes de la misma. El campo es operado por la Residencia de Los Humeros, que es parte de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG), mientras que las unidades están bajo la responsabilidad de la Superintendencia de la Central Los Humeros, que es parte de la Gerencia Regional de Producción Sureste. Para efectos del sistema integral de gestión que se aplica en ambas áreas, la Superintendencia de la Central se considera como el cliente de la Residencia en el subproceso de suministro de vapor.

Cuando existía una falla en la operación de alguna de esas unidades, que ameritara la apertura total de la válvula de excedencia, en las unidades restantes se presentaba un decremento en su generación que incluso llegaba a ocasionar el disparo de la unidad por baja presión en la línea principal de vapor.

En este trabajo se presenta el análisis realizado en el sistema de suministro de vapor para explicar por qué ocurría ese evento en las demás unidades cuando alguna fallaba, y se explica la solución encontrada. Así mismo, se informan los resultados alcanzados en la práctica después de implementar esa solución, a lo largo de los casi diez meses que han transcurrido desde entonces.

## 2. Antecedentes

Cuando la Superintendencia de la Central de Los Humeros (el cliente) instaló un sistema Delta V en las unidades interconectadas, a fin de registrar en tiempo real las variables de control del proceso de generación y enviarlas por fibra óptica, tuvo que realizar una serie de pruebas que llevaron a disparos de las unidades interconectadas por calibración de sensores o falsas alarmas, que terminaron en la apertura de la válvula de excedencia en alguna de las unidades.

Al analizar los datos previos y posteriores a la apertura de la válvula en una unidad, el cliente encontró una baja en la generación de las otras unidades interconectadas. Por ejemplo, al dispararse la Unidad 1 la generación horaria de las unidades 4, 5 y 7 resultaba afectada. Al continuar la realización de las pruebas de

disparo automático del sistema Delta V en otras unidades, las demás continuaron siendo afectadas.

Eso obligó a la Residencia a analizar qué estaba pasando, puesto que no había ningún decremento en la producción de los pozos ni salidas de sistema de alguno de ellos que pudiera explicar por qué no llegaba suficiente vapor a las otras unidades interconectadas con la que se disparaba.

Para explicar mejor el problema, en la Figura 1 se presenta la distribución de pozos y unidades

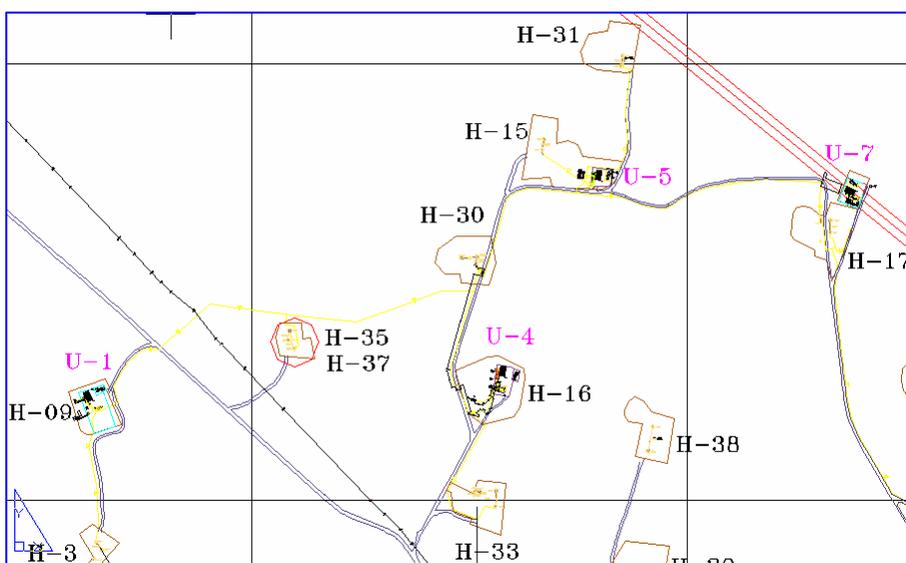


Fig. 1. Pozos y unidades en la zona norte del campo de Los Humeros (vaporkducto anillo en color amarillo)

en la zona norte del campo de Los Humeros, incluyendo el vaporducto, en color amarillo, que une a las unidades 1, 4, 5 y 7 y que se conoce como vaporducto anillo, con 16 pulgadas de diámetro.

La válvula de excedencia, por su parte, se ubica a la entrada de la turbina y tiene como función regular la cantidad de vapor que le llega. Está calibrada para dejar pasar el vapor necesario para generar 5 MW y para abrir parcialmente en caso de que llegue una cantidad mayor. Se controla por medio de una señal que registra la presión en la línea principal, aunque su apertura no es instantánea. También se acciona automáticamente a su apertura total en caso de falla en la unidad turbogeneradora, ya que se cierra la válvula de paro, y entonces desvía todo el vapor al silenciador de excedencia (Fig. 2)

Los pozos productores que alimentan al vaporducto anillo, así como su producción de agua y vapor y algunos otros datos, se presentan en la Tabla 1. Puede verse que la producción total de vapor promedio es de 300 toneladas por hora (t/h). En la Tabla 2 se incluye el vapor que llega a cada una de las unidades interconectadas, observándose que el total promedio es de poco más de 286 t/h, lo que implica una eficiencia en el suministro de vapor del orden del 95%. Es decir, en promedio el 95% del vapor producido se entrega a la central en este sistema interconectado.

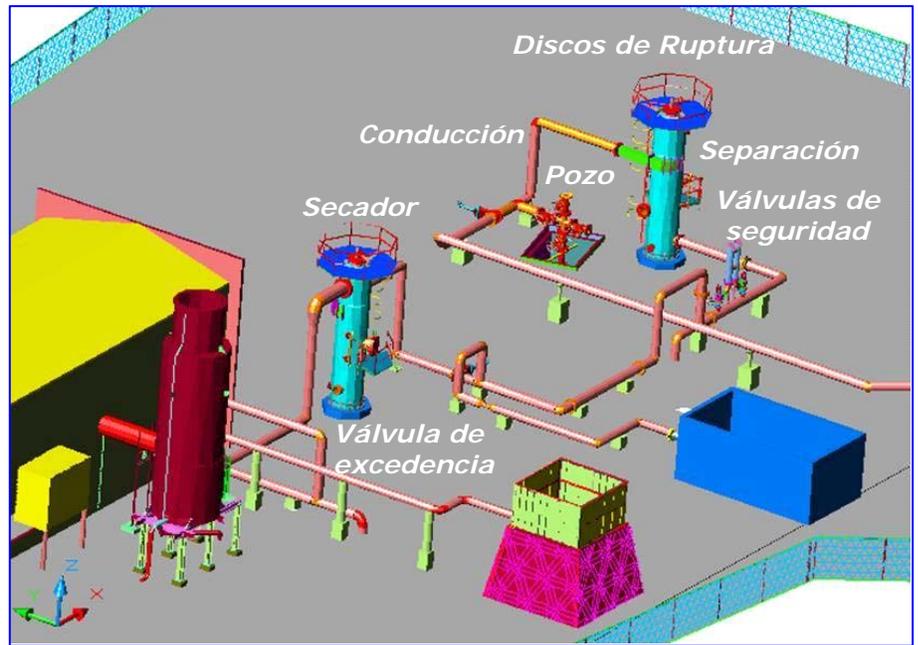


Fig. 2. Esquema con los elementos del sistema de suministro de vapor

Pozo	Diámetro de orificio (cm)	Presión de cabezal (MPa)	Producción (t/h)	
			Vapor	Salmuera
H-3	3.18	2.28	7.97	0.49
H-9	6.35	4.07	56.13	3.57
H-15	5.08	3.31	29.27	1.73
H-17	5.08	2.73	22.79	1.36
H-30	7.62	1.78	28.47	1.92
H-31	6.35	3.71	40.97	2.97
H-32	4.45	5.35	36.35	2.32
H-35	6.35	3.38	49.84	3.46
H-37	5.08	3.21	28.46	6.03
<b>Totales</b>			<b>300.25</b>	<b>23.85</b>

Tabla 1. Características de los pozos integrados al vaporducto anillo.

Unidad	Presión de admisión (MPa)	Vapor recibido (t/h)
1	0.800	72.59
4	0.800	71.65
5	0.800	73.30
7	0.800	68.92
<b>Total</b>		<b>286.46</b>

Tabla 2. Características de las unidades alimentadas por el vaporducto anillo.

## 2. Análisis del problema

Una manera de abordar el problema es hacer una analogía entre el sistema de suministro de vapor del vaporducto anillo y un sistema eléctrico interconectado. En éste hay unidades generadoras y cables que distribuyen la corriente eléctrica, voltajes, resistencia en los cables y carga para abastecer. Así, la unidad generadora podría compararse con el pozo geotérmico, la corriente eléctrica con el vapor, las líneas de conducción eléctrica con el vaporducto, el voltaje con la presión, la resistencia del cable con las pérdidas de conducción del vapor y la carga eléctrica con la contrapresión que ejerce la turbina para girar.

Los sistemas eléctricos se protegen de daños en las instalaciones debidos a altos y bajos voltajes con reguladores de potencial, y del corto circuito con interruptores. En el proceso de suministro de vapor las instalaciones se protegen de daños por alta presión con las válvulas de alivio o de seguridad y con los discos de ruptura; sin embargo, una baja presión en el vaporducto, que puede ser provocada por una ruptura del disco, actualmente no tiene protección. Una velocidad de transporte del vapor por encima de la normal, que puede compararse con la corriente de corto circuito, tampoco tiene protección en el sistema de suministro de vapor.

Por otra parte, debe tenerse en cuenta que tanto la corriente eléctrica como el vapor viajan hacia donde encuentren menos resistencia a su paso.

Aunque la interconexión real de los pozos en Los Humeros es mucho más compleja, en la Figura 3 se presenta un diagrama esquemático que la simplifica. En este diagrama se asume que hay tres pozos interconectados que producen exactamente la misma cantidad de vapor dando el mismo total que producen realmente los nueve pozos integrados al anillo (300.3 t/h, según la Tabla 1), y que alimentan a cuatro unidades con los flujos de vapor reales que recibe cada unidad, de acuerdo con la Tabla 2.

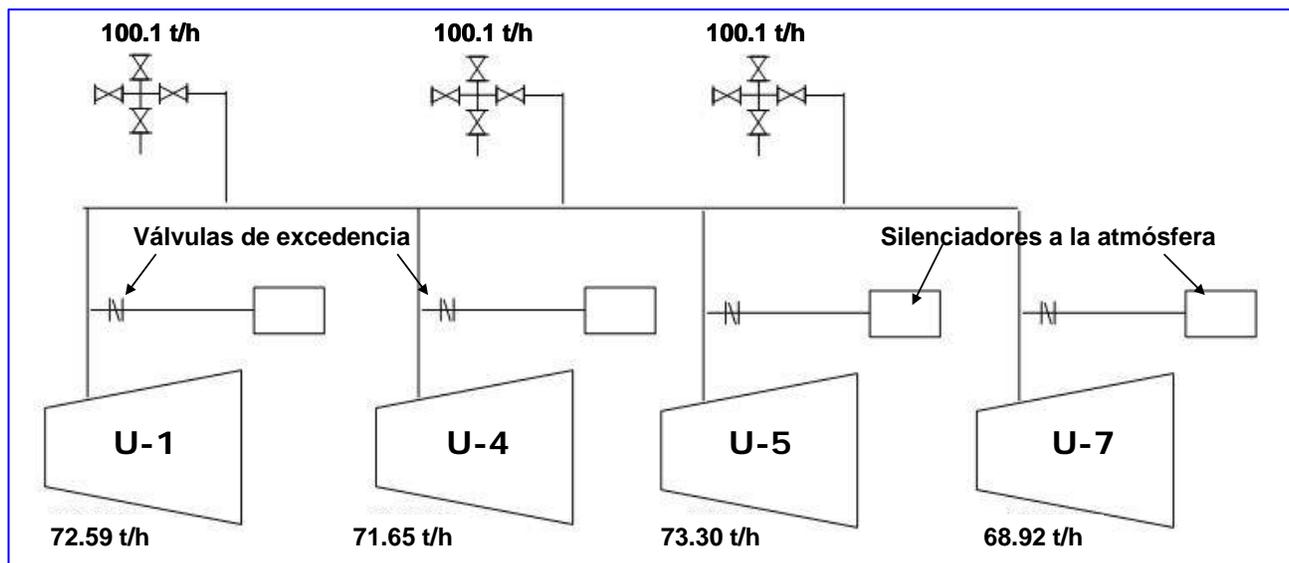


Fig. 3. Diagrama simplificado del suministro de vapor en el vaporducto anillo

Supóngase ahora que se cierra la válvula de paro de la Unidad 1 y, por tanto, se abre totalmente la válvula de excedencia. El vapor que se dirigía a la U-1, que trabajaba a una presión de admisión de 0.8 MPa, se dirige ahora hacia el silenciador que se encuentra a presión atmosférica. La presión en el interior del vaporducto tiende también a bajar hacia la presión atmosférica, ocasionando una despresurización en la toda la línea. Por lo tanto, el vapor que se dirigía antes a las otras tres unidades, que han seguido operando a la misma presión

de admisión de 0.8 MPa, también tenderá a dirigirse hacia la válvula de excedencia abierta en la U-1 y a salir a la atmósfera a través de ese silenciador. Es decir, el vapor tenderá a irse por donde menos presión encuentre. El resultado neto es que llegará cada vez menos vapor a las otras tres unidades mientras continúe abierta la válvula de excedencia de la U-1.

En los sistemas eléctricos este fenómeno es equivalente justamente a un corto circuito, en el cual el voltaje tiende a cero y la corriente al infinito, lo que puede causar daños al sistema, a los aislamientos, al cableado y a los componentes auxiliares. Para evitar o reducir el efecto del corto circuito, se aíslan los sitios del corto o se colocan protecciones como fusibles, derivadores, switches o interruptores. En estos sistemas el total de corriente de corto circuito que puede producirse está determinado por la cantidad máxima de potencia que puede aportar el sistema y por la resistencia del conductor.

En el sistema de suministro de vapor el vapor de “corto circuito” está determinado por la cantidad de vapor que pueda aportar el sistema, y lo que pueda detenerlo tiene relación con la resistencia que ofrezcan los tubos y accesorios al paso del mismo. Asumiendo que tal resistencia resulte insignificante, el vapor que pasaría por la válvula de excedencia podría ser, en el peor de los casos, el total del vapor del sistema, es decir las 300.3 t/h.

En condiciones normales, la velocidad del vapor en el punto de excedencia es de unos 129 km/h, considerando la presión de admisión de 8 MPa y el diámetro del vaporoducto (16 pulgadas). Pero al abrirse totalmente la válvula de excedencia, que tiene 8 pulgadas de diámetro, la velocidad puede llegar hasta unos 3900 km/h, considerando que se está descargando a presión atmosférica. Los actuales silenciadores de excedencia no están diseñados para absorber los esfuerzos mecánicos que provoca el paso de 300 t/h de vapor a esa velocidad. Esta es la razón que explica por qué una falla que ocurrió en la Unidad 7 en marzo de 1997, ocasionó la destrucción del silenciador y de algunas tuberías.

#### 4. Solución del problema

Conociendo la causa del problema, el paso siguiente fue decidir qué hacer para que el sistema continúe entregando vapor a las demás unidades pese a que la válvula de excedencia de una de ellas esté completamente abierta. Es decir, si en los sistemas eléctricos existen protecciones de fusibles o interruptores, ¿cómo hacer una protección equivalente en el sistema de suministro de vapor?

Si se toma en cuenta que lo que limita la producción de vapor de un pozo es un orificio de restricción, entonces la protección necesaria para el sistema de suministro de vapor es evidentemente colocar un orificio similar **después** de la válvula de excedencia, a fin de lograr que la cantidad de vapor que pasa por esta válvula cuando esté completamente abierta sea la misma cantidad que recibía la unidad cuando estaba generando, pero no más. Esto es, el orificio de restricción debería poder reproducir los 0.8 Mpa de la presión de admisión de las unidades.

El problema, entonces, fue cuál debería ser el diámetro de ese orificio a colocar después de la válvula.

Como las pruebas del sistema Delta V se prolongaron por más de seis meses, fue posible probar tres diferentes diámetros de orificios de restricción, de manera semejante al desarrollo que se lleva a cabo para evaluar la producción de un pozo nuevo. Las pruebas se realizaron en la excedencia de la U-4, la cual ejerce una pequeña contrapresión, ligeramente mayor que la presión atmosférica. Se abrió totalmente la válvula de excedencia y se midió la presión manométrica en un punto antes de ella, obteniéndose una lectura de 21.5 psi (0.148 MPa). Después se cerró manualmente la válvula lentamente hasta llegar a la presión que había en ese punto antes de la apertura, que era de 116.0 psi (0.8 MPa). Se repitió el procedimiento más adelante, después

de colocar placas con orificios de restricción de 7 y 6 pulgadas de diámetro, obteniéndose las lecturas respectivas que resultaron ser de 48.5 (0.334 MPa) y 98.0 psi (0.676 MPa). Con esos tres datos se construyó una gráfica de tendencia (Fig. 4).

De acuerdo con la tendencia, se obtuvo una ecuación de tipo logarítmico para la recta resultante, la cual también se incluye y se grafica en la Figura 4. Aplicando esta ecuación al valor de la presión de admisión buscado (0.8 MPa o 116 psi), se obtuvo que el diámetro óptimo del orificio de la placa a instalar después de la válvula de excedencia debería ser de 5.8 pulgadas.

La oportunidad de probar en la práctica la validez de la solución que se había encontrado se presentó poco después, cuando el cliente informó que realizaría una simulación de falla en la U-4, la cual culminaría con la apertura total de la válvula de excedencia. Por lo tanto, se instaló una placa con orificio de 5.8 pulgadas de diámetro después de la válvula de esa unidad. Al finalizar la prueba, el cliente informó que, de acuerdo con los registros obtenidos con el sistema Delta V, no se había registrado ningún decremento de vapor ni de generación de electricidad en las otras unidades interconectadas (U-1, U-5 y U-7). Por lo tanto, la solución funcionaba como se esperaba.

Habiéndose demostrado correcta la solución en la práctica, se procedió a implementarla en las unidades interconectadas restantes, instalándoles su respectiva placa con orificio de 5.8 pulgadas de diámetro después de la válvula de excedencia.

## 5. Conclusiones y recomendaciones

La solución obtenida para el problema del decremento en la generación de las demás unidades interconectadas cuando alguna debía salir de servicio y se abría la válvula de excedencia, ha venido funcionando adecuadamente desde su implementación hasta la fecha de escribir este documento.

Los orificios de las placas colocadas después de las válvulas de excedencia deben ser excéntricos e instalados de tal manera que permitan el paso de los condensados que se forman por falta de sello en esas válvulas, que usualmente son de tipo mariposa.

El costo de implementar esta solución se reduce a la manufactura e instalación de las placas, siendo mucho menor que el de reparar posibles daños el silenciador y las tuberías de la excedencia. Adicionalmente, ya no deja de generarse energía eléctrica en las otras unidades.

## Bibliografía consultada

Dehlaye, J.M. (1984). *Two Phase Flow*, Ed. McGraw-Hill Book Co., New York.

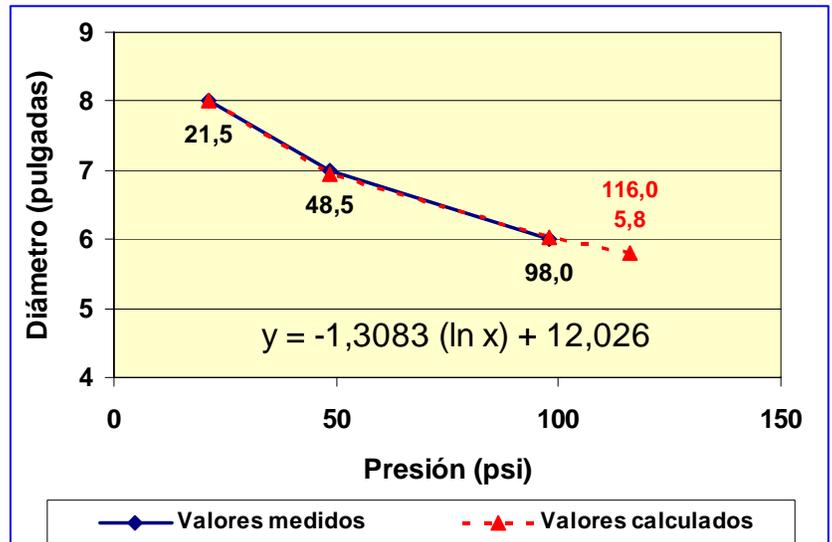


Fig. 4. Variación de la presión después de la válvula de excedencia con placas de diferente diámetro de orificio

Sánchez-Velasco, E. 1985. Conducción de flujo bifásico en el campo geotérmico Los Azufres, Mich. *Geotermia*, Vol. 1, No. 1, pp. 63-73.

Sánchez-Velasco, R.A. y E. Sánchez-Velasco (1995). Laboratorio de flujo en dos fases en el campo geotérmico de Los Azufres. *Geotermia*, Vol. 11, No. 2, pp. 115-122.

Streeter, Víctor L. (1992). *Mecánica de los Fluidos*, Ed. McGraw-Hill, México.

# Criterios para determinar la profundidad del intervalo productor en pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto, México

*Jesús Saúl de León Vivar*

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto

E-mail: [jesús.deleon@cfe.gob.mx](mailto:jesús.deleon@cfe.gob.mx)

---

---

## Resumen

Los criterios para seleccionar la profundidad del intervalo productor o la terminación de los pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto han cambiado durante el desarrollo del mismo. De 1961, cuando se perforaron los primeros pozos, hasta mediados del 2005 se han perforado un total de 325 pozos. En el presente artículo se hará una breve revisión de cuáles han sido los criterios usados en el pasado y los que se han venido empleando en los últimos diez años. El yacimiento de Cerro Prieto ha sido clasificado como de líquido dominante, de alta temperatura, pero actualmente, después de 33 años de explotación comercial, ha sufrido una serie de cambios térmicos y geoquímicos en sus fluidos, por lo que ha sido necesario modificar los criterios para seleccionar la profundidad del intervalo productor de los pozos de acuerdo al comportamiento observado en el yacimiento. Los criterios actuales se dividen en cuatro: 1. Criterio térmico, 2. Criterio geológico, 3. Criterio geoquímico y 4. Criterio comparativo de los pozos vecinos. Cuando la mayoría de estos criterios son interpretados correctamente el éxito de la terminación del pozo está asegurado.

*Palabras clave:* Cerro Prieto, terminación de pozos, criterios, cambios en el yacimiento.

## Criteria to determine the depth of the production interval in wells of the Cerro Prieto geothermal field, Mexico

### Abstract

Ways to select the depth of the production interval or to complete wells in the Cerro Prieto geothermal field have changed during the development of the field. From 1961 when drilling began to the middle of 2005, a total of 325 wells were drilled. The paper compares the approaches used in the past with those of the last ten years. The Cerro Prieto system has been classified as being of liquid-dominated and high-temperature. Today, after 33 years of commercial exploitation, it has experienced a series of thermal and geochemical fluid changes making it necessary to modify the ways to select the depth of the well production intervals, according to the observed behavior of the reservoir. The new criteria include the thermal approach, the geological approach, the geochemical approach and a comparative approach with neighboring wells. If most of these criteria are interpreted correctly, the success of a well is ensured.

*Keywords:* Cerro Prieto, well completion, criteria, reservoir changes.

---

---

## 1. Introducción

Domínguez (1979) hace un recuento de los pozos perforados y de los criterios utilizados para la terminación de los mismos en esa época. Comenta que hasta esa fecha se habían perforado 55 pozos en 6 etapas. La primera etapa fue de 1961 a 1967 con 3 pozos exploratorios, la segunda de 1964 a 1965 con 4 pozos exploratorios, la tercera de 1966 a 1968 con 15 pozos productores, la cuarta de 1972 a 1974 con 2

exploratorios y 11 productores, la quinta de 1977 a 1978 con 5 exploratorios y 13 productores y la sexta en 1978 con 1 pozo exploratorio y 1 pozo productor. También establece que los criterios de terminación habían evolucionado. En los primeros pozos se utilizó la información que se obtuvo de registros eléctricos, de temperatura y de la columna litológica, por lo que varios pozos fueron terminados en estratos de baja temperatura. Aunque también se tuvieron éxitos, como en el caso del pozo M-35, cuyos contrastes térmicos en la serie de registros fueron determinantes, sobre todo al coincidir esta información con la zona de pérdidas de circulación, que en este caso fueron severas, con lo cual se tuvo una base sólida para la terminación de ese pozo, que llegó a producir 100 toneladas por hora (t/h) vapor.

Domínguez (1979) establece además que dado que los resultados de la terminación no siempre fueron tan satisfactorios como se esperó, se pensaron sistemas más refinados que los simples registros de temperatura y eléctricos, para poder concentrar las terminaciones en los estratos más permeables y calientes, decidiéndose así el uso de los siguientes parámetros: la columna litológica, el porcentaje de areniscas porosas y permeables de la zona caliente, los análisis mineralógicos por rayos X (para distinguir minerales cuya génesis está íntimamente ligada a las altas temperaturas), gráficas de temperatura de lodos de perforación a la entrada y salida del pozo y registros eléctricos (por lo menos tres registros de temperatura de las primeras 24 horas después de terminada la perforación).

Olivas y Vaca (1982) comentan que los criterios principales en la selección de ademes son el criterio litológico (basado en la columna litológica), los registros eléctricos y los problemas encontrados durante la perforación. Terrazas (1985) confirma los criterios antes expuestos por Domínguez, Olivas y Vaca.

Como se observa, los criterios mencionados eran suficientes para obtener pozos productores. Pero en 1986 empieza a aparecer una zona extensa de pozos con fluido en dos fases en el yacimiento (De León, 1988), con lo cual las condiciones del yacimiento comienzan a cambiar.

Después de 33 años de explotación, el yacimiento ha sufrido una serie de cambios térmicos y geoquímicos como se observa en la Figura 1. En el área de CP1 se ha notado una disminución de temperatura y, por lo tanto, una baja de entalpía. La concentración de cloruros ha disminuido, lo que indica una invasión de aguas de menor temperatura, la cual ya había sido reportada por Truesdell *et al.* (1978). Este efecto también se observa en la zona centro de CP3.

La parte noroeste de CP1 y CP3 ha disminuido su temperatura por la presencia de aguas de inyección, las cuales se caracterizan por tener altas concentraciones de cloruros, así como la zona centro de CP2, efecto causado por la inyección en el pozo E-6. En la parte norte de CP3 se tiene fluido con concentración alta de cloruros por efectos de la ebullición. En la zona de CP4 se han encontrado temperaturas de 300° C a 2400 m y 350° C a 2800 m de profundidad, y actualmente se tienen fluidos con entalpías mayores de 2000 kJ/kg, aunque en la parte central se localizan pozos con baja entalpía los cuales posiblemente son alimentados por aguas que penetran por la parte adelgazada de la cima de la lutita gris y la cima de sílice-epidota en la parte central de CP3.

En la parte sur de CP4 se han perforado pozos profundos que han producido fluidos de alta temperatura (350° C), alta entalpía, con pH bajos, y con alta presión, lo que ha ocasionado que las tuberías ranuradas sean erosionadas provocando roturas de las mismas. Estos pozos han debido ser cerrados y reparados dejándolos más someros, de 2300 a 2700 m. La zona norte de CP2 presenta también zonas con entalpías mayores a 2000 kJ/kg.

La zona sureste de CP2 es la más estable en la actualidad, manteniéndose el yacimiento en fase líquida. La zona centro de CP2 está siendo alimentada por una mezcla de aguas profundas del yacimiento.



perforación enfría al fluido del yacimiento y a la roca momentáneamente, pero después de un tiempo se recupera la temperatura del yacimiento.

Esta temperatura puede ser calculada durante la perforación por diferentes métodos (Horne, 1951; Roux *et al.*, 1980; Ascencio *et al.*, 1997; García *et al.* 2002) con registros de temperatura tomados con lodo de perforación con tiempos de reposo de 8, 12, 16 y 20 horas en agujero descubierto, antes de correr la tubería ranurada. Lo anterior es práctica común en la terminación de todos los pozos de Cerro Prieto, con lo cual se tiene una estimación de la temperatura del yacimiento, la cual es comparada con la esperada para el inicio del intervalo productor. La temperatura del yacimiento puede ser corroborada posteriormente cuando el pozo fluya, con registros de temperatura tomados en la etapa de calentamiento (Figura 2).

Para la selección de la profundidad del inicio del intervalo productor, la profundidad y temperatura del techo del yacimiento es una de las variables que se considera. Para determinar la profundidad final del intervalo productor sólo se considera la temperatura de yacimiento.

### 2.3 Fase del fluido del yacimiento

La temperatura y presión del yacimiento determinan la fase termodinámica en la que se encuentran los fluidos del mismo. La selección de la profundidad del intervalo productor puede influir en la fase en la que se quiera explotar el pozo: puede ser cerca de la temperatura y presión de saturación, para producir un fluido en dos fases desde el yacimiento, o bien dejar el intervalo productor inmerso en la fase líquida, con lo cual se tendría fluido en dos fases en la tubería del pozo. El propósito de esta variable a considerar, es tratar de que la relación agua/vapor que produzca el pozo sea la menor posible al ponerlo a producir. Con ello se logrará que la caída de presión del yacimiento sea menor debido a que la extracción de fluidos del yacimiento es también menor.

Tener una imagen clara del modelo geohidrológico del yacimiento es importante para manejar esta variable, debido a que dejar terminado un pozo con una relación agua/vapor menor de 1 es lo más recomendable, pues así se producirá más vapor que agua, aunque se podrían tener pozos cuya longevidad fuera muy corta pues podrían agotarse rápidamente por una falta de recarga de fluido. Por ello, hay que manejar con cuidado este criterio, dependiendo de la localización del pozo en el yacimiento.

## 3. Criterio geológico

El criterio geológico se subdivide en tres criterios particulares.

### 3.1 Modelo geohidrológico

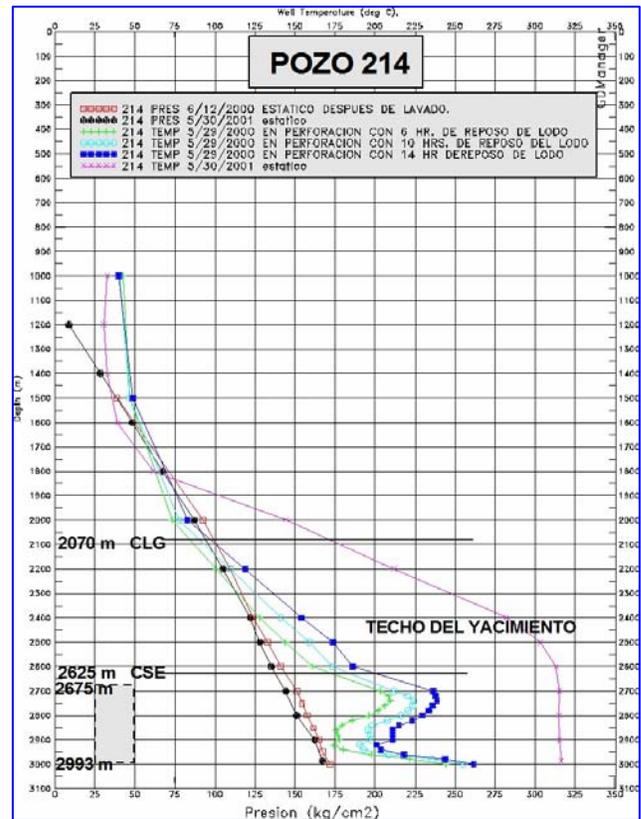


Fig. 2. Registros de presión y temperatura típicos de Cerro Prieto

Tener una imagen clara del modelo geohidrológico del yacimiento es muy importante, debido a que ello influye desde la selección del sitio donde se va a perforar el pozo hasta la selección de la profundidad del inicio y fin del intervalo productor. Es preciso conocer cuáles son las principales fallas del campo, cómo influyen en el movimiento de los fluidos, cómo se mueven estos en el yacimiento, cuál es la geología del subsuelo, a qué profundidad se encuentra la base de los sedimentos clásticos no consolidados, la cima de la lutita café, la cima de lutita gris y la cima de la zona de sílice y epidota. En la Figura 3, se muestra una sección en dirección general SW-NE que incluye el modelo conceptual del yacimiento de Cerro Prieto.

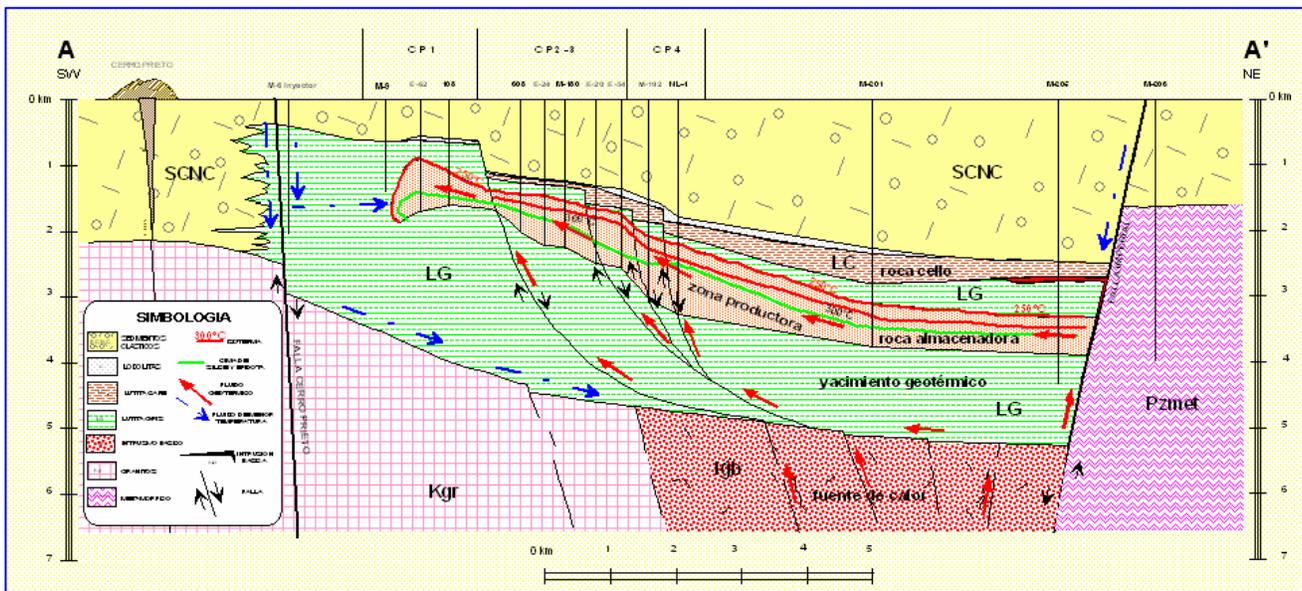


Fig. 3. Modelo conceptual del yacimiento de Cerro Prieto (Lira, 2005)

### 3.2 Cima de la lutita gris

La unidad de lutita gris sobreyace al basamento granítico, y su cima va desde los 398 m de profundidad al oeste del campo profundizándose hacia el oriente hasta los 2847 m, con un espesor promedio de 3,000 m. Dentro de esta unidad se presentan horizontes lenticulares de areniscas permeables, que son las que alojan a los fluidos del yacimiento (Lira, 2005).

Dentro de esta unidad se identifica una zona de mayor permeabilidad al registrarse la presencia de relices de falla, recortes en bloque y mineralización hidrotermal conocida como zona mineralógica de sílice y epidota (Corona, 1996). La temperatura de la cima de la lutita gris está entre 150 y 250° C.

Es importante conocer la profundidad de este estrato como referencia para la selección de la profundidad del intervalo productor.

### 3.3 Cima de la zona de sílice y epidota

La interacción de los fluidos geotérmicos de alta temperatura con las rocas sedimentarias ha provocado la alteración hidrotermal de los minerales primarios, dando como resultado la formación de minerales secundarios. Las areniscas resultantes de esa interacción presentan su cementante original reemplazado por arreglos de minerales de alteración hidrotermal. Uno de esos arreglos es en el que predomina la sílice y la epidota, dando lugar a una zona muy conspicua denominada justamente zona de sílice y epidota. La cima de

esta zona se localiza a partir de los 1400 m de profundidad y se profundiza hacia el este del campo hasta alcanzar los 3600 m.

Una de las primeras referencias que se utilizaron para la selección del inicio del intervalo productor en los pozos fue la cima de la zona de sílice y epidota, y actualmente, en los pozos de la parte central y sur de CP2, este criterio sigue funcionando. Una configuración de la cima de sílice y epidota del yacimiento se muestra en la Figura 4.

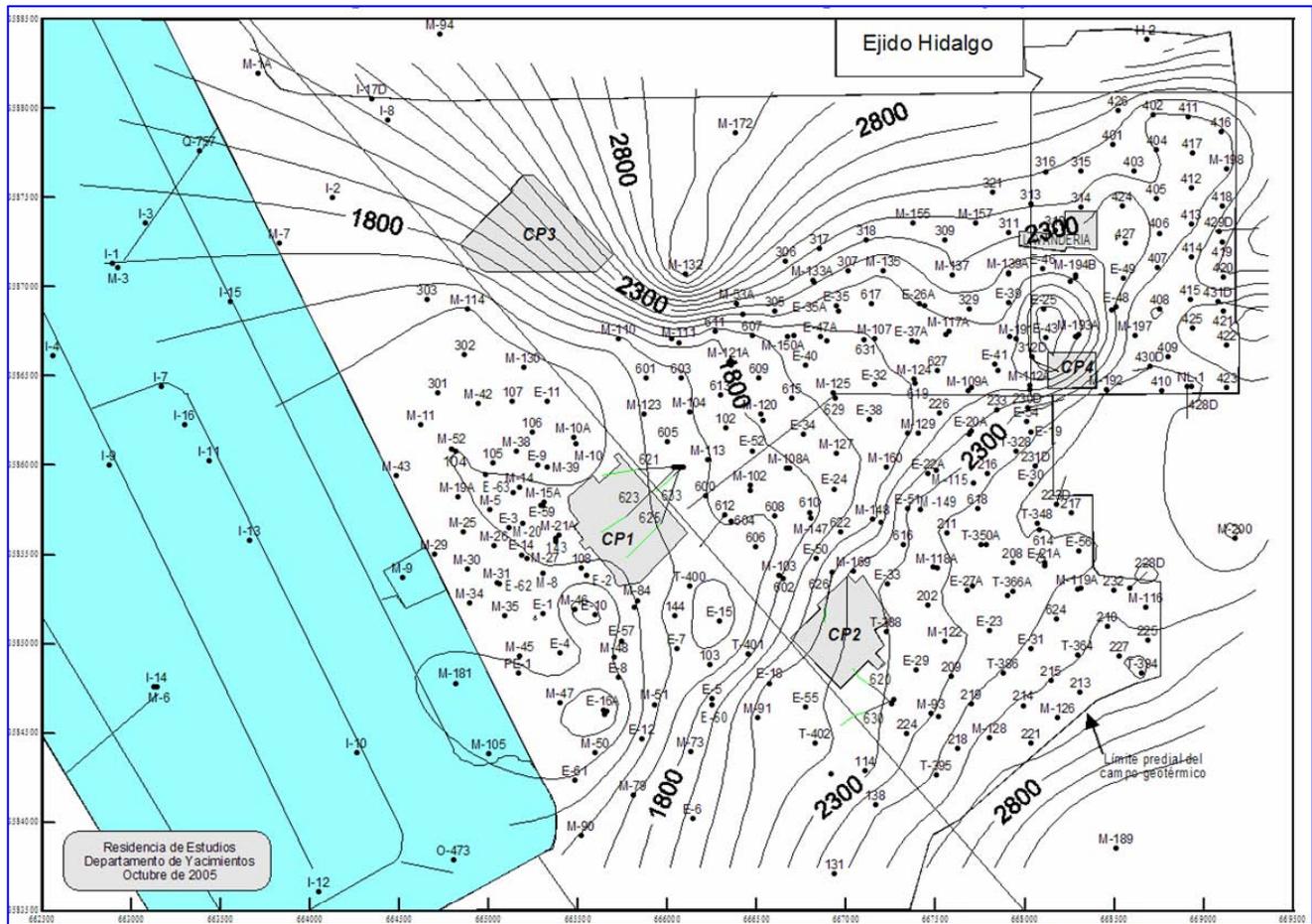


Fig. 4. Configuración de la cima de la zona de sílice y epidota

#### 4. Criterio geoquímico

El criterio geoquímico se divide en tres criterios particulares.

- 4.1 Geotermómetros
- 4.2 Concentración de Cloruros
- 4.3 Isotopía

##### 4.1 Geotermómetros

Las temperaturas calculadas con los geotermómetros de sodio-potasio-calcio (Na-K-Ca) y sílice son usadas como criterio. Como se sabe, el primero de ellos es el indicador más usual de la temperatura del yacimiento y

es poco afectado por los efectos de ebullición de los pozos cercanos o por la mezcla con condensados o agua con baja salinidad (Fournier y Truesdell, 1973), mientras que el segundo estima la temperatura del fondo con el pozo fluyendo (Fournier y Potter, 1982).

Conocer el valor y evolución de la temperatura con estos geotermómetros en los pozos vecinos es importante, para tener una idea del tipo de proceso que ha ocurrido en la zona o si se ha mantenido la temperatura del yacimiento. En la Figura 5, se muestra una configuración de la temperatura calculada con el geotermómetro de Na-K-Ca.

#### 4.2 Concentración de cloruros

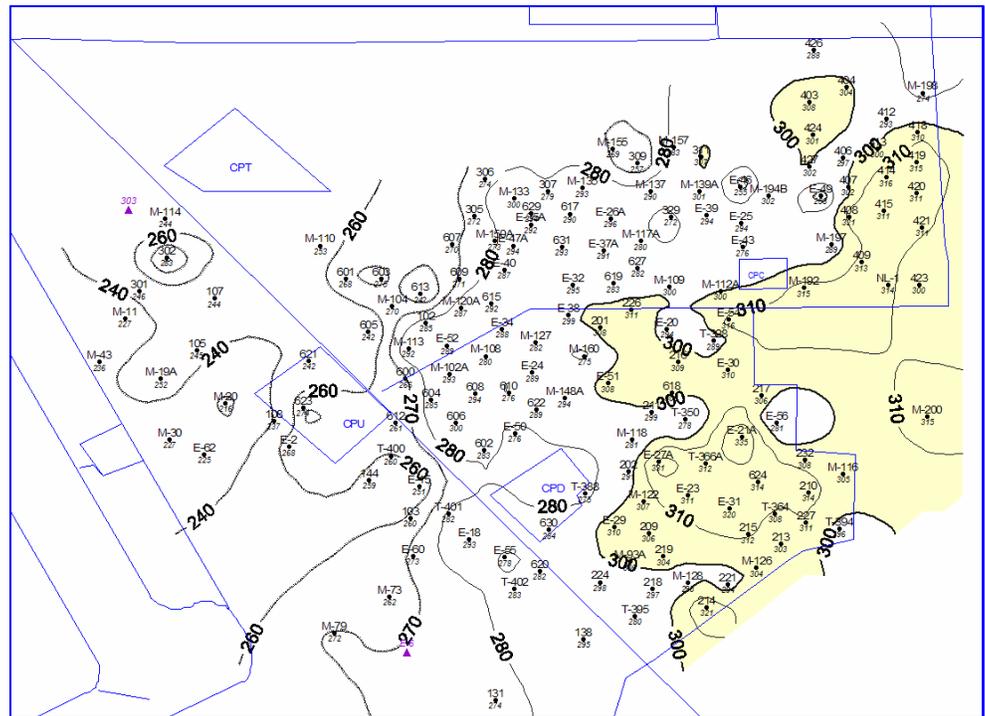
Las aguas meteóricas descienden a través de las zonas permeables y circulan hasta profundidades de 5 a 7 km, son calentadas por las rocas y posteriormente ascienden por convección. Estas aguas profundas se consideran las primeras aguas geotérmicas cloruradas y todos los demás tipos de aguas son directamente o indirectamente derivadas de ellas.

A profundidad los fluidos típicos contienen entre 1000 y 10 000 mg/kg de Cl a temperaturas cercanas a los 350° C (Nicholson, 1993). Las aguas originales de Cerro Prieto contienen entre 8000 y 12 000 mg/kg (Pérez, 2000). Se ha observado que si el contenido de los cloruros es menor del original (4000 a 6000 mg/kg) existe dilución por la presencia de aguas someras de recarga o por condensación de la fase vapor en el pozo. Si el contenido de cloruros es mayor del promedio se puede deber a dos causas: que fluido del yacimiento esté en dos fases o que el pozo esté recibiendo agua de inyección, con cloruros arriba de 20 000 mg/kg. En la Figura 6 se presenta la configuración de cloruros en el año 2003, pudiéndose apreciar zonas afectadas por inyección y zonas afectadas por dilución.

Lo anterior influye en la selección del intervalo productor, ya que el agua de inyección tiende a profundizarse por la mayor densidad de la misma, mientras que el agua de la recarga natural del yacimiento se mueve en la parte somera. Ambos fluidos tienden a enfriar al yacimiento, por lo que hay que considerarlos.

Las configuraciones del contenido de cloruros ayudan a tener una idea del proceso que se está llevando a cabo en el área de explotación.

#### 4.3 Isotopía



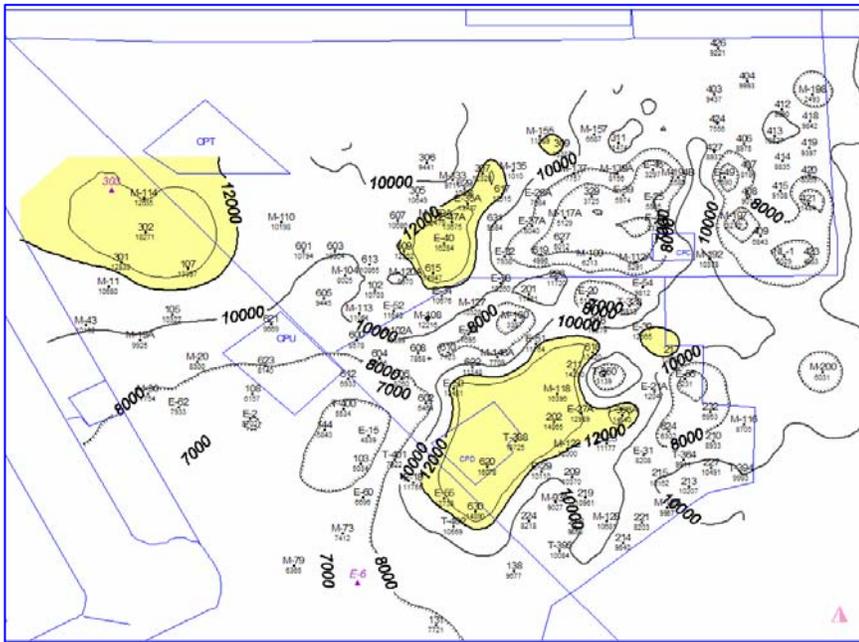


Fig. 6. Configuración del contenido de cloruros en 2003

Lo prioritario para desarrollar las técnicas analíticas de isótopos fue lo incierto del origen de las aguas geotérmicas: magmático o meteórico, pero pronto se demostró que el contenido de  $\delta D$  en aguas geotérmicas es similar al de las aguas meteóricas locales, mientras que los valores de  $\delta^{18}O$  del agua geotérmica son más positivos que los del agua meteórica. El rango típico para las aguas de Cerro Prieto para  $\delta D$  es de -90 a -100 y para  $\delta^{18}O$  de -6.5 a -9.5 (Pérez, 2000). La variación del isótopo del deuterio se emplea en Cerro Prieto para monitorear el proceso de mezcla de agua geotérmica con agua de inyección (Figura 7), mientras que la del isótopo  $^{18}O$  se usa más bien para evaluar el mezclado del agua

geotérmica con la recarga (Figura 8).

El mapeo de ambos isótopos ayuda a observar los procesos que se presentan en el yacimiento. Como se mencionó, conocer el área y el frente de los pozos afectados por el agua de inyección y la recarga natural, ayuda en el momento de seleccionar el intervalo productor para tener cuidado a profundidad con las aguas de inyección, que tienden a irse hacia el fondo del yacimiento, y con las de la recarga natural, que se mueven en la parte somera del yacimiento.

## 5. Criterio comparativo

El criterio comparativo se refiere al hecho de comparar las terminaciones, las condiciones que se tuvieron al perforar, las condiciones térmicas y las geoquímicas de los pozos vecinos al lugar donde se está proponiendo perforar un pozo nuevo.

Este criterio se divide en tres criterios particulares:

5.1 Hechos ocurridos durante la perforación de los pozos vecinos.

5.2 Evolución de las condiciones termodinámicas de los pozos vecinos.

5.3 Evolución de los datos geoquímicos de los pozos vecinos.

### 5.1 Hechos ocurridos durante la perforación de los pozos vecinos

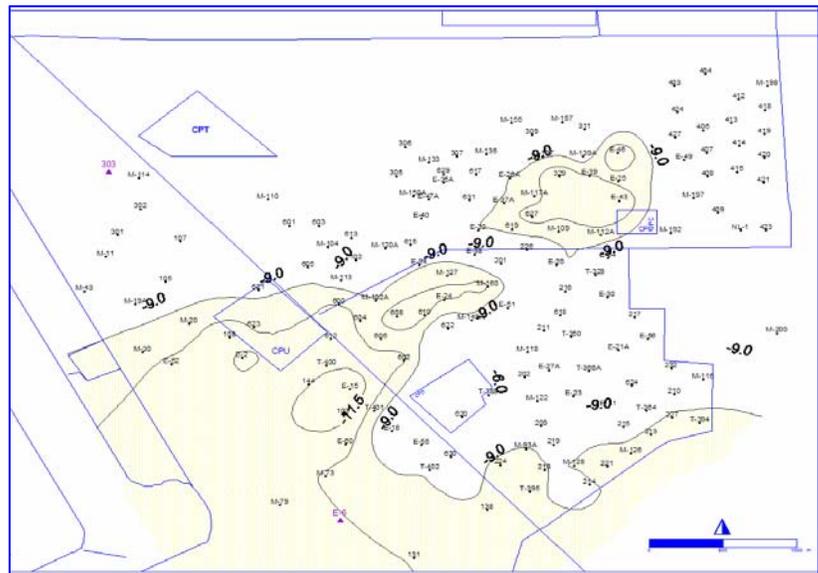


Fig. 7. Configuración del contenido de deuterio

Es importante revisar las condiciones en que ocurrió la perforación de los pozos vecinos al lugar propuesto, tales como las profundidades donde se presentaron pérdidas de circulación, atrapamiento de tuberías, pescados, colapsos, roturas y cementaciones.

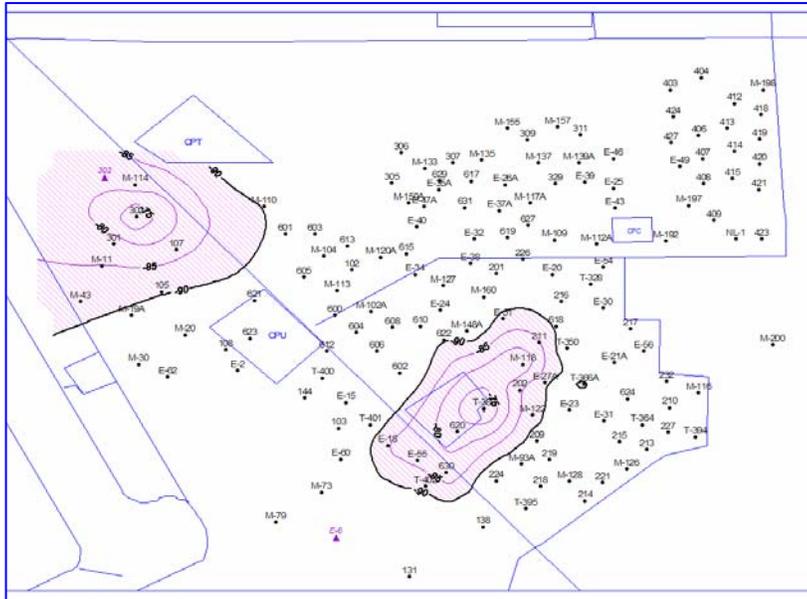


Fig. 8. Configuración del contenido de oxígeno 18

## 5.2 Evolución de las condiciones termodinámicas de los pozos vecinos

Actualmente se han realizado contratos de perforación que duran hasta tres años, y algunos pozos pueden haber sido localizados más de un año antes de su perforación. Durante ese tiempo las condiciones termodinámicas del yacimiento cambian, por lo que una revisión y actualización de estas condiciones es importante antes de la perforación del pozo.

## 5.3 Evolución de los datos geoquímicos de los pozos vecinos

De manera similar al criterio anterior, es necesario realizar una revisión y actualización de los parámetros geoquímicos que se utilizaron para localizar el pozo y seleccionar sus condiciones de terminación, antes de la perforación.

Una vez que se han planteado las condiciones térmicas, geológicas y geoquímicas que se esperan encontrar al terminar el pozo, en Cerro Prieto usualmente se realiza una estimación de la producción por medio de un simulador de pozo, con el cual se calcula la curva característica esperada, para saber si la presión de cabezal del pozo será superior a la presión de separación necesaria para integrar el pozo a producción.

## 6. Conclusión

A manera de conclusión, puede decirse que:

- Los criterios mencionados han ayudado a la selección de la profundidad del intervalo productor en pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto en los últimos diez años.
- Cuando la mayoría de esos criterios son interpretados correctamente, la posibilidad de contar con un pozo productor es muy amplia.
- La selección de los intervalos productores de los pozos en Cerro Prieto se ha convertido en una tarea multidisciplinaria en la que intervienen ingenieros en yacimientos, geólogos y geoquímicos.
- Nuevos criterios se irán agregando conforme el yacimiento vaya cambiando con el tiempo.

## Agradecimientos

Agradezco a los ingenieros Martín Corona Ruiz, Héctor Lira Herrera y Alfredo Pérez Hernández de la Residencia de Estudios de Cerro Prieto por su ayuda para la conformación de este trabajo.

## Referencias

- Ascencio, F., J. Rivera, y F. Samaniego (1997). On the practical aspects of determination of the true reservoir temperature under spherical heat flow conditions. *Proceedings 21 Workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, Stanford, Ca., pp. 27-29
- Corona R., M. (1996) Actualización del Modelo Geológico del Campo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. CFE, RGCP, Reporte interno RE-09/96. Inédito.
- De León V., J.S. (1988) Presencia de dos fases en el yacimiento del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Geotermia*, Revista Mexicana de Geoenergía. Vol. 4, No. 1, pp. 203-211.
- De León V., J.S. (2001) New tools for reservoir engineering in Cerro Prieto geothermal field. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 25, pp. 26-29.
- Domínguez A., B. (1979) Terminación y desarrollo de pozos en Cerro Prieto. *Segundo simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México*, pp. 265-291.
- Electroconsult (1986). Cerro Prieto: Re-evaluación del potencial. Reporte interno preparado para CFE. Inédito.
- Fournier, R.O., and A.H. Truesdell (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 1255-1275.
- Fournier, R.O., and E. Potter (1982). An equation correlating the solubility of quartz in water from 25° C to 900° C at pressures up to 10,000 bars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, pp. 1969-1974.
- García G., A., G. Espinosa, A. Vázquez, J. De León, and M.H. Rodríguez (2002). Estimation of formation temperatures using simulation and optimization techniques of circulation and shut-in processes. *Proceedings of the International Conference The Earth's Thermal Field and Related Research Methods*, pp. 73-77.
- Horne D.R. (1951) Pressure buildup in wells. *Proceedings of the Third World Petroleum Congress*, The Hague, 2:503.
- Lira H., H. (2005) Actualización del Modelo Geológico Conceptual del Yacimiento Geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-46.
- Nicholson, K. (1993) *Geothermal fluids, chemistry and exploration techniques*. Editorial Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Olivas H., M., y J.M.E. Vaca S. (1982) Criterios para determinar la profundidad de ademes en Cerro Prieto. *Cuarto Simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto*, pp. 617-629.

- Pérez H., A. (2000) Caracterización de los procesos en el yacimiento utilizando variables geoquímicas y termodinámicas básicas. CFE, RGCP, Reporte interno RE-031/00. Inédito.
- Pérez H., A. (2004) Caracterización general de los procesos en el yacimiento del campo geotérmico de Cerro Prieto. CFE, RGCP, Reporte interno RE-032/04. Inédito.
- Roux, B., S. Sanyal, and S.L. Brown (1980). An improved approach to estimating true reservoir temperature from transient temperature data. *Proceedings of the 50<sup>th</sup> Annual California Regional Meeting of the Petroleum Engineers, AIME*, pp. 13-21.
- Terrazas A., M.A. (1985). Perforación de pozos geotérmicos en el campo de Cerro Prieto. Tesis para obtener el título de Ingeniero Petrolero. Facultad de Ingeniería, UNAM. Inédito.
- Truesdell, A.H., A. Mañón, M. Jiménez, A. Sánchez, and J. Fausto (1978). Geochemical evidence of drawdown in the Cerro Prieto, Mexico, geothermal field. *Geothermics*, 8 (3/4), pp. 257-265.

# Hundimientos ocasionados por Procesos de Subsistencia-*Creep*-Falla (PSCF) en la ciudad de Morelia, Mich., México

Jorge Alejandro Ávila-Olivera<sup>1</sup> y Víctor Hugo Garduño-Monroy<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Geofísica, UNAM. E-mail: [jao\\_79@hotmail.com](mailto:jao_79@hotmail.com)

<sup>2</sup>Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, UMSNH. E-mail: [vgmonroy@zeus.umich.mx](mailto:vgmonroy@zeus.umich.mx)

---

## Resumen

Desde 1983 han venido ocurriendo en la ciudad de Morelia, Michoacán, problemas de hundimientos diferenciales relacionados con Procesos de Subsistencia-*Creep*-Falla (PSCF), que se deben a la conjunción de los siguientes elementos: la subsistencia ocasionada por la sobreexplotación de los acuíferos, el *creep* de los sedimentos lacustres y fluvio-lacustres que coronan el basamento rocoso, y la presencia de fallas geológicas antiguas que controlaron el depósito de esos sedimentos. Se midieron los espesores de los sedimentos susceptibles de deformarse y se analizó el abatimiento de los niveles freáticos, para determinar el asentamiento ya ocurrido, mediante el modelo teórico que relaciona el hundimiento potencial con la compresibilidad del suelo. El hundimiento diferencial ocurrido así calculado, permitió obtener el salto teórico entre ambos bloques de los principales fallamientos identificados en la ciudad, el cual se comparó con el salto real medido, observándose una buena correlación. Con esta base se calculó el hundimiento total probable en cada uno de bloques de esos fallamientos, de continuar la sobreexplotación de los acuíferos, y se determinó así el probable hundimiento futuro que podría ocurrir en cada uno.

*Palabras clave:* Subsistencia, asentamientos, sedimentos, hundimiento diferencial, *creep*, fallas.

## Sinking due to Subsidence-*Creep*-Fault (SCF) in the City of Morelia, Michoacan, Mexico

### Abstract

Since 1983, the City of Morelia, State of Michoacán, Mexico, has undergone problems from Subsidence-*Creep*-Fault (PSCF), caused by a combination of the following factors: overexploitation of the aquifers, creeping of the lacustrine and fluvio-lacustrine sediments on the rock basement, and the presence of old geologic faults driving the deposit of such sediments. The thickness of sediments susceptible to deformation was measured, as was the abatement of the phreatic levels, comparing the sinking that had already occurred with a theoretical model relating potential sinking to soil compressibility. The existing differential sinking obtained by the model allowed us to know the theoretical displacement between the blocks of the main faulting-assemblages identified in the city. When this was compared with the actual measured displacement, a good correlation was found. Next the probable total sinking was calculated for each block of the faulting-assemblages with the same model. Finally, we calculated the further probable sinking for each block if the aquifer overexploitation continues.

*Keywords:* Subsidence, settling, sediments, differential sinking, *creep*, faults.

---

## 1. Introducción

A partir de 1983 comenzaron a apreciarse en la ciudad de Morelia, Mich., daños en las casas-habitación, edificios, pavimentos, líneas de alcantarillado y agua potable, etc. De acuerdo con estudios realizados por un grupo de investigadores de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) y del Instituto Politécnico Nacional (IPN), los daños eran ocasionados por asentamientos de tipo diferencial, pero que tenían la singular característica de que se presentaban siguiendo trazos lineales claramente identificables (Trujillo-Candelaria, 1985; Martínez-Reyes y Nieto-Samaniego, 1990; Lermo-Samaniego *et al.*, 1996). Posteriormente se descubrió que dichos trazos lineales eran paralelos al sistema de fallas regionales de dirección ENE-WSW (Garduño-Monroy *et al.*, 1999) (Fig. 1). Suter *et al.* (1995) consideraron que esas discontinuidades del basamento forman parte de la zona de falla Tula-Chapala y/o Acambay-Morelia.

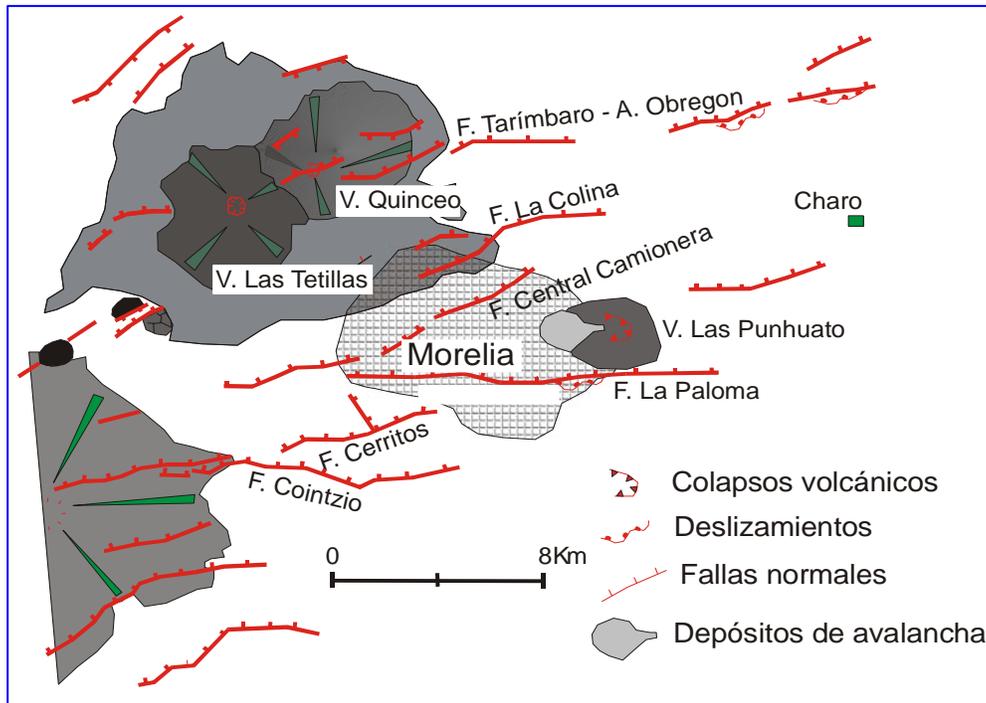


Fig. 1. Localización de la Ciudad de Morelia (Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

Originalmente las áreas más afectadas eran la zona denominada La Colina-Tres Puentes, así como la Avenida Héroes de Nocupétaro, las cuales presentaban daños ocasionados por los fallamientos denominados “La Colina” y “Central Camionera”, respectivamente. En 1988 se notó la presencia de un fallamiento más, el cual recibió el nombre de “Chapultepec” ya que se presentaba en la colonia del mismo nombre. Para 1993 el número de fallamientos se había incrementado a seis, cuando se sumaron los llamados “Torremolinos”, “El Realito” y “La Soledad”. Finalmente, también en ese año se identificaron dos fracturas que se denominaron “Cautla” y “Ventura Puente” (Fig. 2).

## 2. Procesos de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF)

El tipo de fallamiento mencionado no es exclusivo de la ciudad de Morelia. Ocurren también en varias ciudades del centro del país, localizadas en la zona norte del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM), como son Aguascalientes, Celaya, Irapuato, Querétaro, y Salamanca. Todas estas ciudades tienen como característica común haber sido levantadas en antiguas cuencas lacustres configuradas por un fallamiento regional.

La mecánica que da lugar a esos fallamientos implica la conjunción de una serie de elementos, entre ellos la presencia de *fallas* geológicas previas que controlaron el depósito de sedimentos lacustres y fluviolacustres, así como la ocurrencia de *subsistencia* debida generalmente a sobreexplotación de los sistemas acuíferos, lo

que da lugar a una deformación lenta, continua y asísmica (*creep*). Estos elementos interactúan entre sí ocasionando lo que se denomina un Proceso de Subsistencia-Creep-Falla (PSCF).

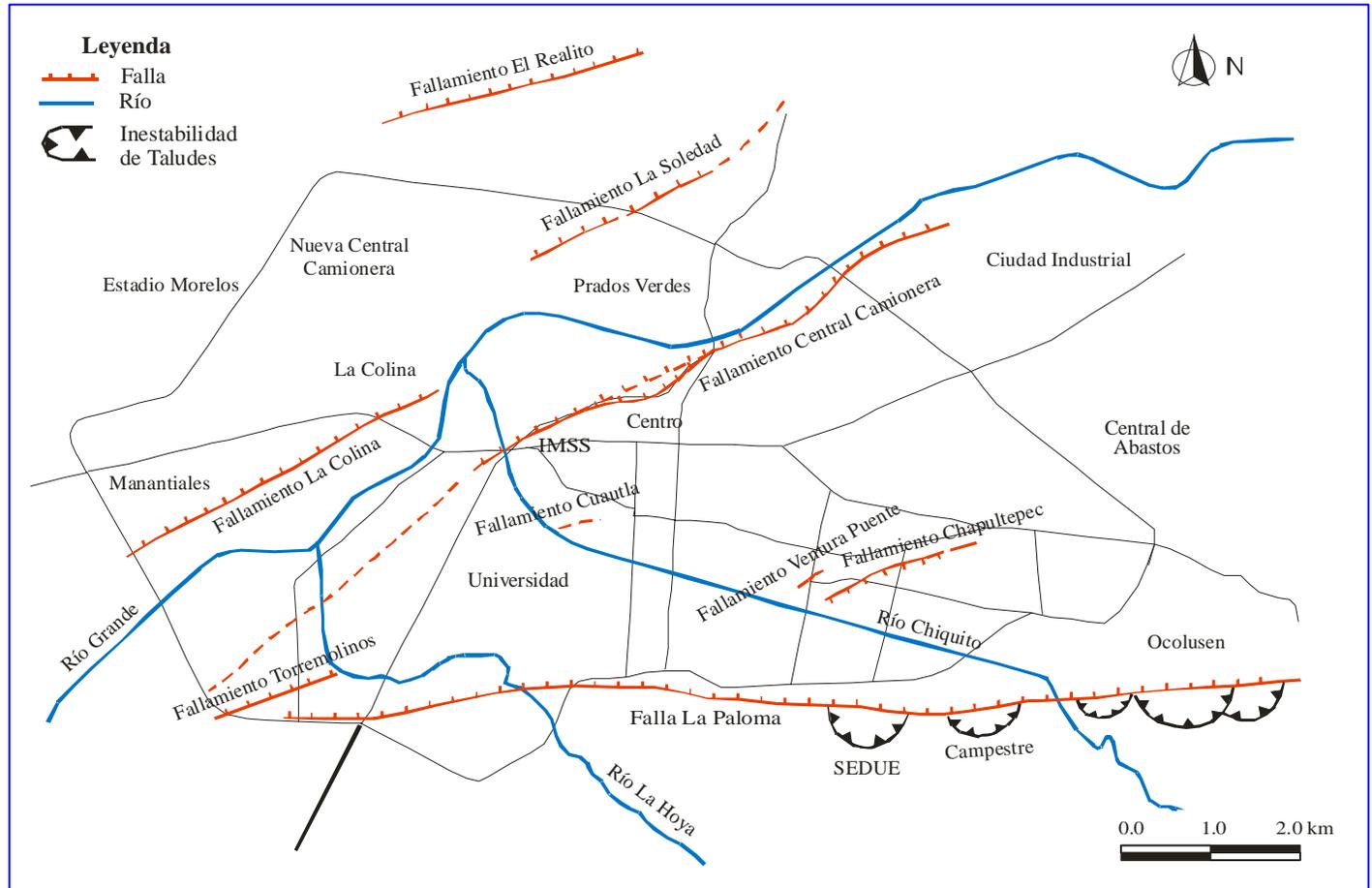


Fig. 2. Fallamientos identificados en la Ciudad de Morelia (Garduño-Monroy et al., 2001).

Los PSCF suelen presentar las siguientes tres etapas o fases:

a) La primera etapa consiste en un hundimiento de la superficie, el cual es conocido como subsidencia, que se debe usualmente a la sobreexplotación de los acuíferos. Esta sobreexplotación abate los niveles freáticos, lo que causa una reducción de la presión del agua de poro que es transferida a la fase sólida de los sedimentos lacustres y fluviolacustres del acuífero, ocasionando a su vez una reducción del volumen de espacios vacíos de los sedimentos y por consiguiente una reducción de su espesor, el cual tiende a consolidarse (Garduño-Monroy *et al.*, 2001). Esto es lo que se denomina consolidación primaria (Fig. 3).

b) Al hundimiento generado por la subsidencia, en la segunda etapa se suma otro, que es lento, continuo a través del tiempo y asísmico que se denomina *creep*, y que es resultado de la consolidación secundaria de los sedimentos. Esta consolidación secundaria suele ser menos significativa que la primaria. En esta segunda etapa se forma también una o más grietas de tensión a lo largo de la prolongación dentro de los sedimentos de los planos de las fallas geológicas preexistentes en el basamento rocoso.

c) En la última etapa puede ocurrir un hundimiento diferencial en ambos lados de la grieta de tensión formada en la segunda etapa, de tal manera que uno de los lados se hunde más que el otro dando lugar a una geometría de falla normal que tiende a reproducir la geometría del basamento rocoso que la subyace. Puede

formarse así un bloque alto y un bloque bajo a ambos lados de la grieta. Este hundimiento diferencial es el principal responsable de los daños observados en las construcciones de Morelia.

Ninguno de esos hundimientos afecta al basamento rocoso subyacente, y resulta difícil diferenciarlos entre sí en la observación de campo.

### 3. Determinación de los hundimientos

Para determinar el probable hundimiento o asentamiento causado por una determinada extracción de agua de los acuíferos, es necesario llevar a cabo un análisis del abatimiento de los niveles freáticos, así como del espesor de los sedimentos lacustres y fluvio-lacustres capaces de deformarse, en ambos bloques de cada uno de los fallamientos presentes.

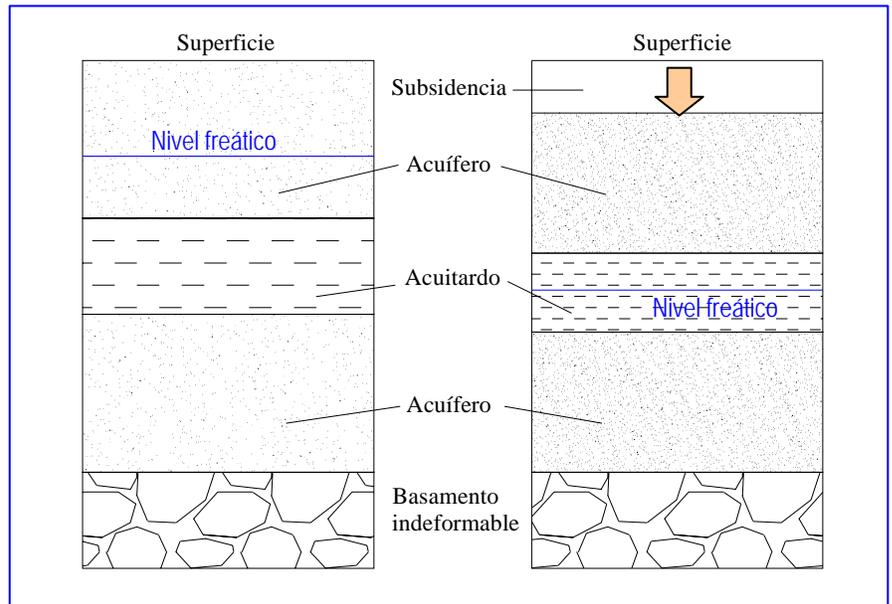


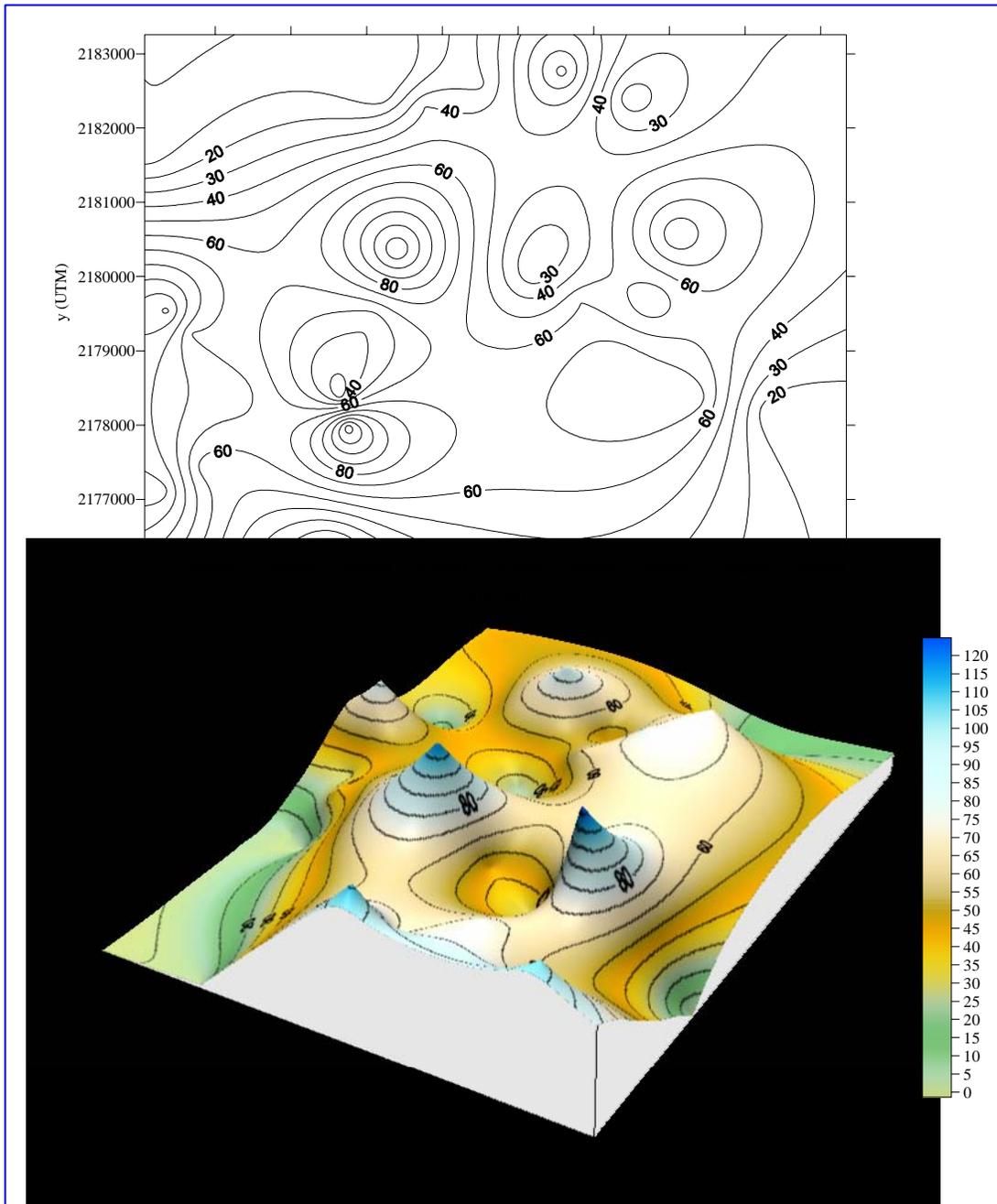
Fig. 3. Diagrama que muestra cómo se produce la subsidencia en un sistema acuífero por la extracción del agua del subsuelo.

#### 3.1 Espesor de sedimentos

Para conocer los espesores subterráneos de los sedimentos lacustres y fluvio-lacustres en la ciudad de Morelia, se utilizó la columna litológica de algunos de los pozos profundos que se emplean para extraer el agua del subsuelo. Con esta información se elaboró el modelo digital que aparece en la Figura 4, en el que se aprecia la distribución de espesores dentro de la mancha urbana. Una vez que se conoció esa distribución de espesores de sedimentos en diferentes puntos de la ciudad, se procedió a relacionarlos con ambos bloques de cada uno de los fallamientos, para obtener de esta manera un espesor promedio en cada uno de los bloques (Tabla 1, segunda y tercera columna).

Fallamiento	Espesor de sedimentos (m)		Abatimiento del nivel freático (m)		Factibilidad de deformación	
	Bloque bajo	Bloque alto	Bloque bajo	Bloque alto	Bloque bajo	Bloque alto
1. Central Camionera	120.00	29.00	37.66	?	Sí	No
2. La Colina	112.00	69.00	80.00	40.94	Sí	Sí
3. Torremolinos	90.00	79.50	34.00	29.87	Sí	Sí
4. Chapultepec	78.00	72.00	80.80	?	No	No
5. El Realito	15.00	4.00	10.00	?	Sí	No
6. La Soledad	45.00	34.00	40.00	92.45	Si	No

Tabla 1. Abatimiento del nivel freático, espesor de sedimentos y factibilidad de deformación de ambos bloques de cada uno de los fallamientos identificados en la ciudad de Morelia.

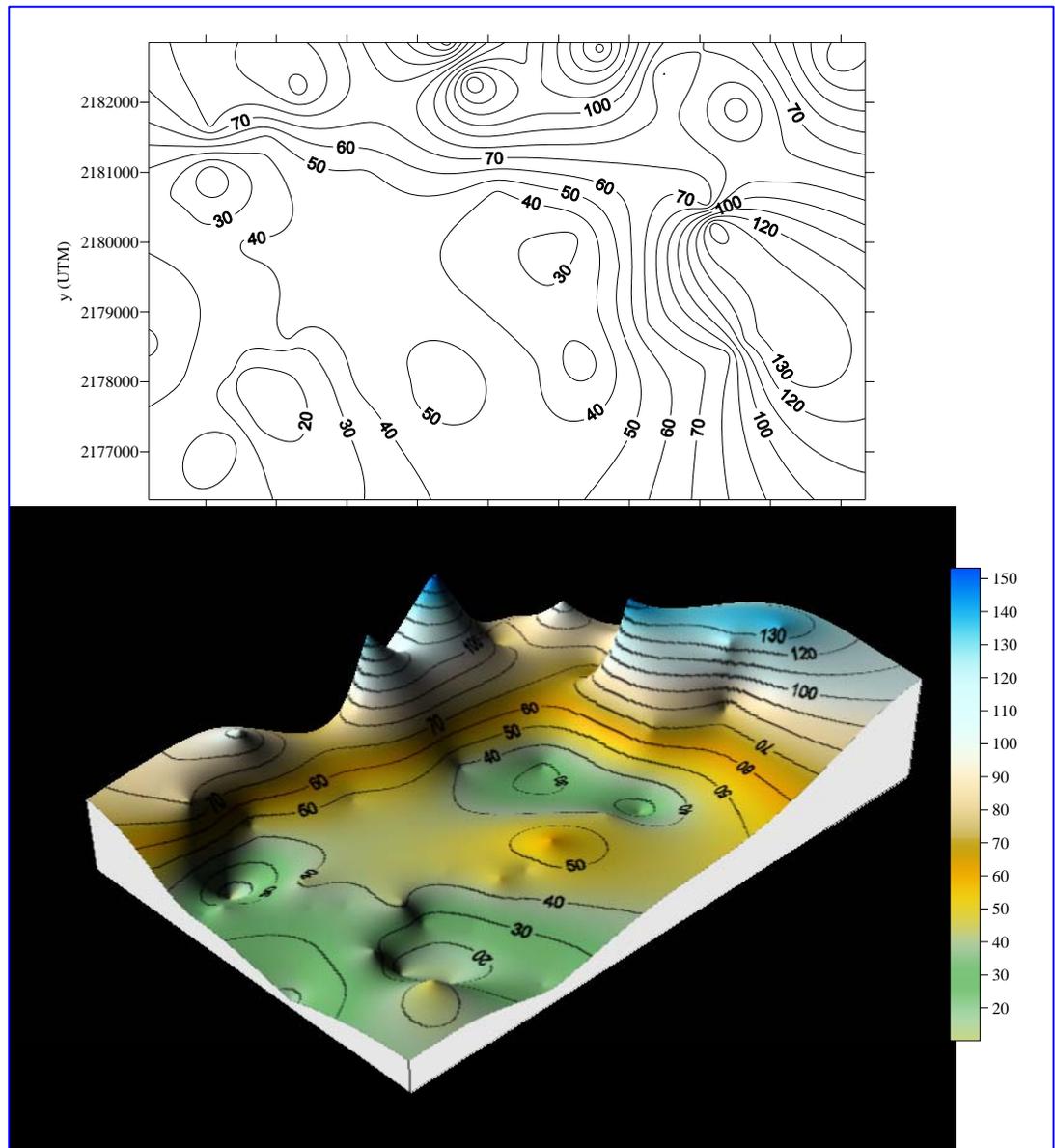


*Fig. 4. Modelo de espesor de sedimentos lacustres y fluvio-lacustres de la Ciudad de Morelia.*

### 3.2 Abatimiento de los niveles freáticos

Para conocer el abatimiento que sufren los niveles freáticos de la ciudad, se empleó también la información de los pozos profundos utilizados para abastecimiento de agua en Morelia. Asumiendo que el ritmo de bombeo se mantuvo constante para los periodos en los que no se tuvo información suficiente, se construyó el modelo que se presenta en la Figura 5.

Conocido el abatimiento de los niveles freáticos, se relacionaron con ambos bloques de cada uno de los fallamientos (Tabla 1, columnas cuarta y quinta), utilizando el dato de los pozos aledaños a cada bloque de los fallamientos señalados.



*Fig. 5. Modelo de abatimiento de niveles freáticos en la Ciudad de Morelia.*

### 3.3 Factibilidad de deformación

Una vez que se conoce tanto el espesor de sedimentos como el abatimiento del nivel freático en el bloque alto y bajo de cada uno de los fallamientos identificados en la ciudad, es posible determinar la factibilidad de que dichos bloques continúen deformándose. Esto puede hacerse comparando el espesor de sedimentos en el bloque con su respectivo abatimiento del nivel freático. Si el primero es mayor que el segundo, significa que los sedimentos todavía pueden presentar más deformación. En cambio, si el espesor de los sedimentos es menor que el abatimiento, es muy probable que los sedimentos ya hayan sufrido toda la deformación posible en cuanto a consolidación primaria se refiere. Desde luego, siempre es posible que sufran todavía alguna deformación por consolidación secundaria, pero esta es generalmente insignificante comparada con la deformación ocurrida por la consolidación primera, razón por la cual no se toma en cuenta en este trabajo.

Puede verse en la Tabla 1 que en el bloque alto de los fallamientos Central Camionera, Chapultepec y El Realito no se tuvo información sobre el abatimiento de los niveles freáticos. A pesar de ello fue posible

determinar su factibilidad de deformación, tomando en cuenta las siguientes dos premisas empíricas que resultaron de los estudios realizados en este trabajo:

- El espesor de sedimentos en los bloques bajos de los fallamientos es mayor que el de los bloques altos (de ser igual no se presentaría un salto en la superficie).
- Generalmente el abatimiento del nivel freático en los bloques bajos de los fallamientos es mayor que el de los bloques altos, salvo casos especiales.

### 3.4 Hundimientos ocurridos

Para determinar el hundimiento actual que ya ha ocurrido en ambos bloques de cada uno de los fallamientos, se empleó el modelo teórico que relaciona el hundimiento potencial con la compresibilidad del suelo (Rojas-González *et al.*, 2002), cuya ecuación es  $v = c_f h$ , donde:

$v$  : Hundimiento del suelo.

$c_f$  : Factor de compresión del suelo.

$h$  : Espesor de la masa de suelo.

El factor de compresión del suelo ( $c_f$ ) se determina a partir del índice de compresibilidad ( $c_c$ ), de la relación de vacíos inicial ( $e_i$ ) y del peso específico ( $\gamma_m$ ) del suelo. Estos datos se pueden obtener a partir de un ensaye de consolidación unidimensional, pero para el modelado de sedimentos lacustres y fluviolacustres en las ciudades de Querétaro y Morelia se ha empleado como factor de compresión  $c_f$  un valor de 0.08 (Rojas-González *et al.*, 2002; Ávila-Olivera, 2004).

Con ese factor de compresión de los sedimentos lacustres y fluviolacustres ( $c_f$ ), y utilizando el espesor de los sedimentos medido en los bloques de los fallamientos, se aplicó la ecuación para calcular el hundimiento teórico que ya habría ocurrido en cada bloque. También se calculó el salto teórico que habría ocurrido entre los bloques, que resulta ser la diferencia entre el hundimiento de cada uno.

Los resultados se presentan en la Tabla 2, en la que también se incluyen los saltos realmente medidos a fines de 2003, para comparar y verificar el método y los parámetros empleados (ver también Fig. 6). Puede observarse que hay buena coincidencia entre el salto teórico calculado con la ecuación y el salto real medido en cada fallamiento en esa fecha.

Fallamiento	Bloque bajo			Bloque alto			Salto calculado (m)	Salto medido (m)
	$c_f$	$h$ (m)	$v$ (m)	$c_f$	$h$ (m)	$v$ (m)		
1. Central Camionera	0.08	37.66	3.01	0.08	29.00	2.32	0.69	0.60 – 0.80
2. La Colina	0.08	80.00	6.40	0.08	40.94	3.28	3.12	3.00 – 4.40
3. Torremolinos	0.08	34.00	2.72	0.08	29.87	2.39	0.33	0.20 – 0.40
4. Chapultepec	0.08	78.00	6.24	0.08	72.00	5.76	0.48	0.50
5. El Realito	0.08	10.00	0.80	0.08	4.00	0.32	0.48	0.50
6. La Soledad	0.08	40.00	3.20	0.08	34.00	2.72	0.48	0.50

Tabla 2. Hundimientos, saltos calculados y saltos medidos actuales, en los fallamientos de la ciudad de Morelia ( $c_f$ : Factor de compresión,  $h$ : Espesor de los sedimentos,  $v$ : hundimiento).

### 3.5 Hundimiento total probable

Empleando el mismo método y ecuación que se utilizaron para calcular los hundimientos teóricos ya ocurridos, se determinó el máximo hundimiento total probable que podría presentarse en cada bloque de los fallamientos, en caso de que los niveles freáticos continuaran bajando hasta que el abatimiento llegara a rebasar el espesor de los sedimentos en aquellos bloques donde éste es aún mayor que aquél.

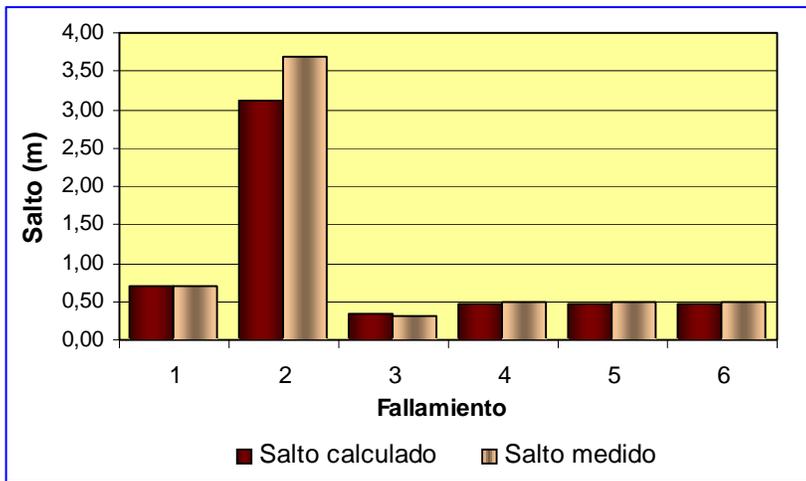


Fig. 6. Comparación entre el salto medido y calculado de los fallamientos de Morelia (1. Central Camionera, 2. La Colina, 3. Torremolinos, 4. Chapultepec, 5. El Realito, 6. La Soledad)

Una vez conocido el hundimiento total probable en cada bloque, sólo hay que restarle el hundimiento actual, ya ocurrido, para obtener el hundimiento restante probable. Es igualmente posible obtener el máximo salto restante probable en cada fallamiento, el cual resulta de la diferencia entre los hundimientos restantes probables de cada bloque.

Esos datos se presentan en la Tabla 3, lo que permite estimar el escenario que podría ocurrir en cada fallamiento si continúa la explotación de los acuíferos al mismo ritmo y el nivel freático sigue abatiéndose (ver también Fig. 7).

Fallamiento	Hundimiento (Bloque bajo)			Hundimiento (Bloque alto)			Salto restante (m)
	Total	Actual	Restante	Total	Actual	Restante	
1. Central Camionera	9.60	3.01	6.59	2.32	2.32	0.00	6.59
2. La Colina	8.96	6.40	2.56	5.52	3.28	2.24	0.32
3. Torremolinos	7.20	2.72	4.48	6.36	2.39	3.97	0.51
4. Chapultepec	6.24	6.24	0.00	5.76	5.76	0.00	0.00
5. El Realito	1.20	0.80	0.40	0.32	0.32	0.00	0.40
6. La Soledad	3.60	3.20	0.40	2.72	2.72	0.00	0.40

Tabla 3. Hundimientos totales, actuales y restantes, así como saltos restantes de los fallamientos de la ciudad de Morelia.

#### 4. Discusión y conclusiones

Con base en el análisis de espesor de sedimentos, se puede decir que los bloques bajos de los fallamientos de la ciudad de Morelia están conformados por un espesor mayor de sedimentos lacustres y fluviolacustres que aquellos de los bloques altos. Lo anterior se debe a la presencia de fallas geológicas normales que controlaron la geometría de dichos sedimentos y que además labraron la morfología de las actuales cuencas.

Del análisis del abatimiento de los niveles freáticos en los pozos profundos empleados para la extracción del agua del subsuelo, se observó que en los bloques altos de los fallamientos estudiados el nivel freático se localiza a mayor profundidad que en los bloques bajos, lo que confirma que en estos últimos el espesor de sedimentos lacustres y fluviolacustres es mayor, lo que a su vez corrobora la existencia de fallas geológicas sepultadas.

De acuerdo con este trabajo, puede decirse que el comportamiento probable de los fallamientos identificados es el siguiente:

### Fallamiento Central Camionera.

Este es el que presenta el mayor salto restante potencial, con casi 7 metros, por lo que los hundimientos futuros podrían ser muy heterogéneos. Sin embargo, el bloque alto del fallamiento probablemente no presentará más hundimientos, ya que parece haberse deformado en toda su capacidad en lo que se refiere a su consolidación primaria. Podría haber aún cierto asentamiento por consolidación secundaria debida al *creep*, pero puede concluirse que las edificaciones ubicadas en el bloque alto prácticamente no corren riesgos mayores, mientras que las que se localizan en el bloque bajo corren el mayor riesgo potencial.

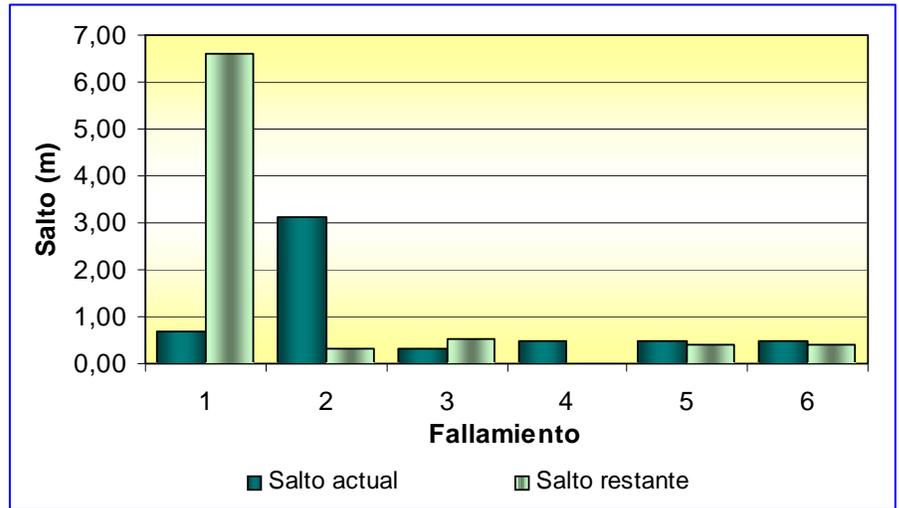


Fig. 7. Comparación entre el salto actual y restante de los fallamientos de la ciudad de Morelia (1. Central Camionera, 2. La Colina, 3. Torremolinos, 4. Chapultepec, 5. El Realito, 6. La Soledad)

**Fallamiento La Colina.** Este fallamiento puede sufrir hundimientos potenciales adicionales de poco más de dos metros en ambos bloques, aunque en todo caso serán hundimientos bastante homogéneos ya que el salto restante potencial entre sus bloques alto y bajo es de apenas 30 centímetros. El riesgo de las edificaciones y obras civiles en ese fallamiento es relativamente bajo.

**Fallamiento Torremolinos.** Aquí pueden ocurrir hundimientos importantes, de entre 4 y 4.5 metros. No serán tan homogéneos como en el fallamiento La Colina, pero tampoco tan diferenciados como en la Central Camionera, ya que el salto restante probable es de medio metro. Puede concluirse que las edificaciones presentan un riesgo bajo a medio.

**Fallamiento Chapultepec.** Este es el único fallamiento que no parece presentar riesgo de mayor hundimiento, ya que ambos bloques han alcanzado su consolidación primaria. Podría haber consolidación secundaria por *creep*, pero en todo caso resultaría poco significativa.

**Fallamientos El Realito y La Soledad.** Los pronósticos son similares para ambos. No es probable que ocurran más hundimientos en sus bloques altos, y el hundimiento adicional probable en sus respectivos bloques bajos es menor de medio metro, igual al salto restante probable. El riesgo aquí también parece ser de bajo a medio.

## Referencias

Ávila-Olivera, J.A. (2004). Contribución a los estudios geotécnicos y geofísicos en zonas urbanas con procesos de subsidencia-*creep*-falla, caso: la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, 234 p. Inédito.

- Garduño-Monroy, V.H., G.M. Rodríguez-Torres, I. Israde-Alcántara I. E. Arreygue-Rocha, P. Canuti y S. Chiesa (1999). Efectos del clima (El Niño) en los fenómenos de fluencia de las fallas geológicas de la ciudad de Morelia. *Geos, Boletín de la Unión Geofísica Mexicana*, Vol. 9, No. 2, pp. 84-93.
- Garduño-Monroy, V.H., E. Arreygue-Rocha, I. Israde-Alcántara y G.M. Rodríguez-Torres (2001). Efectos de las fallas asociadas a sobreexplotación de acuíferos y la presencia de fallas potencialmente sísmicas en Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-54.
- Lermo-Samaniego, J., J. Nieto Obregón and M. Zermeño (1996). Fault and fractures in the valley of Aguascalientes, Preliminary microzonification. *Paper 1651 in the 11<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering*, Amsterdam.
- Martínez-Reyes, J., y A.F. Nieto-Samaniego (1990). Efectos geológicos de la tectónica reciente en la parte central de México, México D.F. *Revista del Instituto de Geología de la UNAM*, Vol. 9, No. 1, pp. 33-50.
- Rojas-González, E., J. Arzate-Flores y M. Arroyo-Contreras (2002). Predicción de las zonas de agrietamientos debido a la extracción de agua. *Memorias de la XXI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos*, Tomo 1, pp. 173-181.
- Suter M., O. Quintero-Legorreta, M. López-Martínez, G. Aguirre-Díaz and E. Farrar (1995). The Acambay graben: active intraarc extension in the Trans-Mexican Volcanic Belt, Mexico. *Tectonics*, Vol. 14, No. 5., pp. 1245-1262.
- Trujillo-Candelaria, J.A. (1985). Subsistencia de terrenos en la ciudad de Celaya, Gto. *Memorias de la Reunión sobre Asentamientos Regionales*, México, D.F., Sociedad Mexicana de Suelos y Asociación Geohidrológica Mexicana, pp. 1-2.

# **Foro**

Sección con artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos de los artículos técnicos usuales y que no han sido sometidos a arbitraje técnico.

# De la celebración del centenario de la industria geotermoeléctrica al desarrollo de la energía geotérmica en Italia en el siglo XXI

**Raffaele Cataldi**

Vicepresidente de la Unión Geotérmica Italiana

**Traducción: Julio César Viggiano-Guerra (CFE)**

*Reproducimos a continuación un artículo preparado por Raffaele Cataldi, Vicepresidente de la Unión Geotérmica Italiana (UGI), que detalla los resultados de los eventos realizados durante el trienio 2003-2005 para conmemorar el centenario del nacimiento de la industria geotérmica en Larderello, Italia, en 1904, e incluye una síntesis histórica de los primeros años de la geotermia. Como se indica en el texto, el 10 de diciembre de 2005 se realizó la ceremonia de clausura de la celebración del centenario en el Salón de los Quinientos del Palacio Viejo en Florencia, Italia. Durante esta ceremonia se entregaron reconocimientos a personas y organizaciones involucradas en el desarrollo de la geotermia, uno de los cuales le correspondió a la Comisión Federal de Electricidad (CFE). El reconocimiento dice a la letra: "La Unión Geotérmica Italiana, en el centenario de la industria geotérmica mundial, 1904-2004, tiene el honor de entregar esta placa a la Comisión Federal de Electricidad de México, por sus elevados méritos en el desarrollo de la energía geotérmica en México." La placa fue enviada al Ing. Alfredo Elías Ayub, Director General de la CFE.*

## 1. Síntesis histórica del nacimiento y de los primeros pasos de la industria geotermoeléctrica

El programa de investigación y desarrollo que el Príncipe Piero Ginori Conti (yerno del Conde Florestano de Larderello) elaboró en 1903, recién electo como Director General de la Sociedad Larderello, incluía estudios y pruebas de laboratorio para definir la factibilidad técnica de usar fluidos geotérmicos para producir energía eléctrica y compuestos de boro.

Los estudios concluyeron que el ciclo termodinámico más adecuado era el llamado ciclo indirecto. En consecuencia, se iniciaron y desarrollaron las siguientes actividades experimentales, en el orden que se mencionan:

**Segunda mitad de 1903.** Partiendo de experiencias obtenidas desde 1875, Ginori Conti realizó nuevas pruebas de producción de energía mecánica mediante bombas de avanzada concepción accionadas por vapor geotérmico, para usarse en la estimulación de pozos y para bombear salmuera bórica hacia las instalaciones de procesamiento químico.



**Primeros meses de 1904.** Instalación del primer laboratorio geotérmico móvil en una carroza tirada por caballos para la recolección y análisis de muestras de fluido y de incrustaciones hidrotermales (ver foto a la izquierda).

**4 de julio de 1904.** Primer experimento en el mundo de generación eléctrica con fluidos geotérmicos. Para este efecto se usó un motor de pistones accionado por vapor puro obtenido con un intercambiador de calor alimentado por fluidos producidos por un pozo vecino a Larderello. Al motor se le acopló una dinamo de 10 kW con la que se encendieron

cinco pequeñas lámparas (foto de abajo).

**1905.** Instalación de un primer grupo geotérmico piloto, constituido por un motor alternativo de pistones Cail accionado por vapor puro producido por un intercambiador de calor alimentado por fluido caliente natural. El motor estaba acoplado a una dínamo de 20 kW que permitió la iluminación por unos diez años del palacio de la familia De Larderel-Ginori Conti y de otros edificios civiles de Larderello.



**1908.** Instalación de un segundo grupo geotérmico piloto de concepción diferente al anterior pero accionado también por vapor puro obtenido con un intercambiador de calor alimentado por fluido de un pozo de la zona. Se trataba de un motor de pistones de tipo Neville, al cual se le acoplaba una dínamo todavía de 20 kW, como en el primer caso. Se electrificó con este segundo grupo una parte de las instalaciones de producción de boro de Larderello.

Los resultados alentadores de esas actividades llevaron al nacimiento de la industria geotermoeléctrica italiana y mundial en diversos países.



**1913.** Puesta en marcha de la primera y auténtica central geotérmica (foto de la izquierda), formada por un turboalternador de ciclo indirecto de 250 kW construido por la compañía electro-mecánica Franco Tosi. Este turboalternador podía funcionar con presiones de hasta 3 atmósferas absolutas a boca de pozo. Se pudo electrificar así todas las instalaciones de producción de boro de Larderello y la mayor parte de los centros habitacionales de la zona borífera.

**1914-1916.** Construcción de la primera línea eléctrica del mundo alimentada por energía geotérmica. Se trataba de una línea de 25 km de longitud aproximadamente, que conectaba los centros de Pomarance, Salinas de Volterra y Volterra con la central geotérmica mencionada.

**1916.** Instalación de dos grupos turboalternadores de 3,5 MW cada uno (una capacidad realmente grande para la época) con lo que empezó la producción de energía geotermoeléctrica a escala industrial.

## 2. Objetivo y formato del programa de celebración

El experimento del 4 de julio de 1904 del Príncipe Piero Ginori tiene una importancia que va más allá de la simple innovación tecnológica en el uso del calor de la Tierra. Por lo tanto, el centenario de la industria geotermoeléctrica es un evento que, en el ámbito profesional y cultural, representa un patrimonio común de toda la comunidad geotérmica internacional.

Teniendo eso en cuenta, cuando hace más de tres años se empezó a organizar el programa de celebración del centenario, todas las partes interesadas estuvieron de acuerdo en que un único evento *ad-hoc* (como colocar una placa de recuerdo en la pared, o la emisión de un sello postal especial o una sola celebración alusiva)

hecho sólo para recordar los notables méritos de Piero Ginori Conti habría tenido una resonancia casi nula en la geotermia italiana y no tendría sentido para la comunidad geotérmica internacional.

Las partes acordaron en cambio que el centenario debería ser una oportunidad para aprovechar la reavivación del interés por la geotermia, partiendo de las antiguas tradiciones generadas en las principales áreas geotérmicas italianas (sobre todo en la Toscana, pero no sólo ahí), y para ubicar, por consiguiente, el futuro desarrollo de esta fuente de energía en el marco de la continuidad histórica con los importantes resultados obtenidos en este campo en Italia en los siglos pasados. Además, se consideró necesario aprovechar la ocasión del centenario para subrayar cómo la energía geotérmica (que hoy juega un papel significativo entre las fuentes nacionales de energía) podría ser aun más importante en el futuro para satisfacer una parte de la demanda de energía del país, sea en el sector eléctrico o en el térmico.

Fue así como se decidió llevar a cabo un programa de celebración de mayor alcance, con eventos distintos pero complementarios, enfocados a conjuntar a todas las partes involucradas en el sector eléctrico, incluyendo al sector político, los programadores de energía, las instituciones nacionales y regionales, las entidades locales, las industrias y compañías operadoras de campos geotérmicos, las organizaciones científicas, culturales y ambientales, y al público más vasto posible. Con esta perspectiva, se recomendó que el programa incluyera también eventos dirigidos a



que los habitantes de las principales áreas geotérmicas italianas renovaran sus tradiciones de cultura geotérmica, con el fin de mejorar las condiciones para la aceptación social de la geotermia en su territorio.

Así, las partes decidieron que el programa de conmemoración del centenario debería ser organizado como un evento cultural de gran magnitud, no tanto enfocado a celebrar un siglo de éxitos pasados sino más bien a considerarlo como un referente para comenzar un nuevo siglo de desarrollo de la geotermia italiana. Desde esta óptica y con este objetivo, se elaboró un programa de amplio espectro a desarrollarse en el trienio 2003-2005.

### 3. Eventos realizados

3.1. La *Ceremonia de Apertura*, conjuntamente con la *Primera Conferencia Temática sobre la Historia de la Energía Geotérmica en Italia*, se desarrollaron sucesivamente en Pomarence (PI) colaborando conjuntamente la UGI y el ayuntamiento de esta ciudad. Los seis trabajos técnicos presentados en la conferencia se abordaron los antiguos aspectos de la geotermia en el área mediterránea en el periodo “De la Prehistoria a los Tiempos de Roma”. Participaron en esos eventos 250 personas.

3.2. *Conferencia internacional* “Energía geotérmica y territorio. Después de Johannesburgo, la contribución de la geotermia al desarrollo sostenible”, organizada por la Región Toscana y de nuevo en Pomarance los días 29 y 30 de enero de 2004. Participaron representantes de gobierno de 30 países, del Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (UNEP), de la banca mundial, de instituciones nacionales y regionales, de industrias italianas y extranjeras que operan en el sector energético, además de ambientalistas y expertos en geotermia y un público de más de 200 personas. Se imprimieron y distribuyeron gratuitamente en la sede de la conferencia 1000 ejemplares de las memorias y 500 de un folleto denominado “La geotermia en Italia, una historia de 5000 años”, preparado por la UGI.

3.3. *Taller internacional* “Cien años de la geotermia en el mundo”, organizado por la Asociación Geotérmica Internacional (IGA) e impartido en Larderello del 1 al 8 de mayo de 2004. Se presentaron diez trabajos que ilustran el estado y los problemas del desarrollo actual y las perspectivas de crecimiento de la geotermia a nivel mundial y en algunas áreas selectas del mundo. Estuvieron presentes más de 300 personas, incluyendo a 20 miembros del Consejo Directivo de la IGA, muchas autoridades nacionales y regionales y numerosos representantes de la industria del sector energético, y muchos expertos en geotermia italianos y extranjeros.

3.4. *Muestra fotográfica* denominada “Larderello: un siglo de energía geotérmica”, organizada por el Grupo Fotográfico Pisano y celebrada en Pisa del 27 de mayo al 7 de junio de 2004. La exposición fue visitada por más de mil personas.

3.5. *Fiesta de la Geotermia*, organizada por el Ente Nacional de Electricidad de Italia (ENEL) en Larderello el 4 de julio de 2004 (exactamente un siglo después del experimento de la “primera luz geotermoeléctrica”), la cual incluyó los siguientes actos: inauguración de la residencia restaurada de la familia De Larderel-Ginori Conti (que será sede del nuevo museo de la geotermia); repetición del experimento realizado un siglo atrás por el Príncipe Piero Ginori Conti para demostrar la efectividad de generar energía eléctrica con el calor de



Conde Francesco Larderel

la Tierra; presentación de una nueva película sobre la geotermia; visita técnica guiada a las centrales de generación geotermoeléctrica y a su centro de tele-conducción; distribución de nuevo material técnico ilustrativo; excursión para observar un panorama del área de Larderello desde lo alto; competencia para adolescentes en piscina para armar un rompecabezas que representa las etapas básicas del ciclo de generación geotermoeléctrica (pozo-vaporducto-central-torre de enfriamiento); concierto de banda, y fuegos pirotécnicos nocturnos. Participaron en la fiesta varios miles de personas, con visitantes procedentes tanto de otras regiones de Italia como del extranjero.

3.6. *Conferencia inaugural sobre el nacimiento de la industria geotermoeléctrica*, presentada por la UGI en la ceremonia de apertura de los “Días Geotérmicos Internacionales Polonia 2004”, organizados por la Academia de Ciencias de Polonia, el Instituto de Investigación de Economía, Energía y Minerales, la PGA (Asociación Geotérmica Polaca) y la IGA/Rama Europea (Zakopane, Polonia, del 13 al 17 de septiembre de 2004).

3.7. *Sesión geotérmica especial* en recuerdo del centenario de la industria geotermoeléctrica, realizada en Foggia el 23 de septiembre de 2004 en el marco del XXI Congreso de Mercadotecnia, organizado por la Sociedad Italiana de Mercadotecnia con la participación de más de 200 expertos italianos y extranjeros. La

UGI presentó en esa ocasión dos ponencias, una sobre el programa de celebración del centenario y otra sobre la historia, el estado actual de desarrollo y las perspectivas de crecimiento de la geotermia en el mundo hasta el año 2020, con particular atención a Europa e Italia.

3.8. La *Segunda Conferencia Temática sobre la Historia de la Energía Geotérmica en Italia*, a cargo de la UGI con la colaboración del Ayuntamiento de Massa Marittima (GR), celebrada en esta ciudad el 6 de noviembre de 2004. Las seis ponencias técnicas presentadas abordaron la geotermia italiana en el periodo que va “De la caída de Roma al final del Medioevo”. Participaron cerca de 300 personas.

3.9. *Tercera Conferencia Temática sobre la Historia de la Energía Geotérmica en Italia*, verificada en Belforte (fracción medieval de Radicondoli en la Provincia de Siena) el 18 de junio de 2005. Fue organizada por la UGI en colaboración con el Ayuntamiento de Radicondoli y del Co.Svi.G (Consortio de Desarrollo de la Geotermia). Se presentaron siete ponencias abarcando el periodo que abarca “Del Renacimiento a la Edad Moderna”. Asistieron cerca de 200 personas.

3.10. Publicación del libro *El Calor de la Tierra. Contribución a la Historia de la Geotermia en Italia*, preparado por la UGI con la colaboración del IMSS (Instituto y Museo de Historia de la Ciencia, de Florencia), a cargo de M. Ciardi y R. Cataldi. Este volumen consta de 360 páginas (Introducción, 22 capítulos e Índice de Autores) con la introducción y el resumen de cada capítulo en italiano e inglés. Cubre el periodo de la Prehistoria a 1928, año en el cual se realizó en Larderello el primer Congreso Internacional de Geotermia. Se subdivide en tres partes: I) De la Prehistoria a la caída de Roma; II) el Medioevo; y III) La Edad Moderna y Contemporánea. Se imprimieron 2500 ejemplares que se distribuyeron (y seguirán distribuyéndose hasta que se agoten) como reconocimiento a instituciones nacionales, regionales y entidades locales involucradas en la geotermia y las fuentes renovables de energía, autoridades y expertos en política energética, industrias y compañías, instituciones profesionales, asociaciones culturales y selectos expertos italianos y extranjeros que operan en el campo de la geotermia.



3.11. *Cancelación de sellos postales (primer día)*. La iniciativa estuvo a cargo de la UGI y se realizó en ocasión de las conferencias mencionadas en los puntos 3.8 y 3.9, y de la ceremonia de clausura. El sobre con los timbres cancelados porta diseños específicos de cada uno de los tres eventos, con escritos de recuerdo en italiano y en inglés. La iniciativa fue bien apreciada por el público presente en los eventos. Quedan aún algunos ejemplares con timbres cancelados que pueden obtenerse al costo, dirigiéndose al Secretario de la UGI, Dr. U. Rossi (e-mail: [rossi.umberto@enel.it](mailto:rossi.umberto@enel.it)).

3.12. Entre los eventos de la celebración también debe mencionarse el libro de 227 páginas *Instalaciones Geotérmicas en Italia: 1904-2004, Cien Años de Desarrollo en Tecnología de Materiales*, publicado en septiembre de 2005 al cuidado de G. Culivicchi, con el patrocinio del ENEL.

#### 4. Ceremonia de clausura

Se llevó a cabo el 10 de diciembre de 2005 en el prestigioso Salón de los Quinientos en el Palacio Viejo de Florencia, con el alto patrocinio del Presidente de la República, y el apoyo de la Región Toscana y del

Ayuntamiento de Florencia. Participaron más de 200 invitados selectos, entre los cuales se encontraban ilustres representantes de la geotermia de cinco países extranjeros: Filipinas, Francia, Israel, Suiza y Estados Unidos. Muchos otros invitados del extranjero aceptaron la invitación pero disculparon su ausencia.

Después de la introducción hecha por el moderador, el Dr. C. De Felice (Jefe Redactor de RAI 3-Florencia) y del saludo del Presidente de la UGI, Ing. G. Passaleva, tomó la palabra el Príncipe Ginolo Ginori Conti, nieto de Piero, a nombre de la familia De Larderel-Ginori Conti para agradecer a la UGI y a las demás partes que realizaron el programa de celebración del centenario.

A continuación intervino el Presidente de la Región Toscana, Dr. Claudio Martini, con un discurso de amplio alcance. Después de recordar la contribución de la energía geotermoeléctrica a la satisfacción de la demanda en la Toscana (actualmente más del 25%), el presidente dio a conocer la política de la región en materia de fuentes renovables de energía, haciendo énfasis en la geotermia y subrayando el esfuerzo para incrementar el uso del calor natural para alcanzar los objetivos energéticos regionales en el periodo 2006-2012. Tal resultado se logrará con el esfuerzo conjunto de todos los interesados, y mediante una eficaz concertación entre las partes, sin perder de vista, por supuesto, el más avanzado grado de compatibilidad ambiental.

Luego se presentaron dos ponencias técnicas sintéticas pero de alto nivel: una del profesor John Lund (Presidente de la IGA y profesor emérito del OIT, Oregon Institute of Technology, de EUA) y la otra del Prof. Ladislaus Rybach (Profesor emérito del ETH, Politécnico de Zurich, Suiza), que versaron sobre el estado actual y las perspectivas de desarrollo de la geotermia en los próximos diez años, en el mundo y en Europa en particular, respectivamente.

A continuación el Prof. Paolo Rossi (profesor emérito de la Universidad de Florencia, pionero y jefe de la escuela italiana de investigación en el área de historia de la ciencia y la tecnología) hizo la presentación oficial del libro sobre la historia de la geotermia en Italia ya mencionado. Pronunció un discurso de alto nivel, bosquejando la historia de la geotermia en el marco del concepto de la “Edad de la Tierra”, a partir del bíblico Diluvio Universal, prosiguiendo después con el análisis de la evolución del concepto mismo en los siglos, a través de la historia natural en la época griega y romana y en las principales religiones del mundo, hasta el descubrimiento del tiempo en el inicio de la edad moderna y en la aplicación de los métodos de la geocronología isotópica en los últimos decenios. Al terminar, su disertación fue muy aplaudida.

Acto seguido se otorgaron diplomas de reconocimiento por parte del presidente de la UGI a un restringido grupo de personas y de organizaciones italianas y extranjeras que en los últimos 40 años se han dedicado a la promoción, investigación, o realización de proyectos de desarrollo de la geotermia para la producción de energía eléctrica y/o para usos directos. En los diplomas se plasmó la fecha del centenario, pero cada uno de ellos explicaba el mérito específico del galardonado. Los premiados, en orden alfabético, son los siguientes:

**Personas:** Franco Barberi, Enrico Barbier, Raffaele Cataldi, Ginolo Ginori Conti por las familias De Larderel y Ginori Conti, Anselmo Giovannoni, John Lund (EUA), Paolo Rossi, Ladislaus Rybach (República Checa) y Claudio Sommaruga. Todos ellos son de Italia, excepto los dos señalados.

**Instituciones e industrias:** Ansaldo SpA, CFE (Comisión Federal de Electricidad, de México), Ayuntamientos de Castelnuovo Val di Cecina, Ferrara, Monterotondo, Marittimo y Pomerance, ENEL, IGA, ORMAT Technologies (EUA), PNOC-EDC (Filipinas), y la Región Toscana. A excepción de las indicadas, los demás organismos e industrias son de Italia.

La parte técnica de la ceremonia concluyó con un discurso del Presidente de la UGI, en el cual subrayó el cambio de dirección que ha comenzado a tener el desarrollo de la geotermia de poco más de una década a la fecha, que ha ido de una posición en la que prevalecía el disfrute del recurso a alta temperatura para la generación de energía eléctrica, hasta un papel no menos importante para los recursos de media a baja temperatura para usos directos, sobre todo en Europa. En cuanto a Italia,



el presidente dijo que “...tomando en cuenta el gran potencial disponible, no sólo en la Toscana sino en otras regiones, se puede prever que en el siglo en curso el uso del calor natural terminará por asumir un papel bastante importante, contribuyendo así a cubrir una parte de la demanda de la energía del país mucho más significativa que la actual...”

La ceremonia de clausura culminó con un hermoso concierto sinfónico a cargo del quinteto de cámara de la ORT (Orquesta Regional de la Toscana) que ejecutó obras de Borodin y Mozart. Borodin fue escogido dado su interés profesional por la geotermia, ya que además de ser un renombrado compositor fue también un excelente químico que durante su visita de estudio a Italia en 1865 quiso permanecer en Larderello para estudiar el origen y los procesos del ácido bórico.

## 5. Patrocinadores

Los eventos para la celebración del centenario organizados por la UGI fueron posible gracias al estímulo (y en algunos casos al apoyo económico) de 34 patrocinadores, incluyendo instituciones e industrias italianas y extranjeras, entidades regionales y locales, asociaciones culturales y compañías de servicio que operan en el sector energético. Los logotipos de todos los patrocinadores se incluyen en la primera página interna del libro sobre la historia de la geotermia italiana mencionado.

La UGI reitera su caluroso agradecimiento para todos; sin embargo, es importante hacer una mención especial a aquellos patrocinadores que contribuyeron a cubrir los gastos al menos parcialmente. Ellos son: Región Toscana, Provincia de Pisa, Ayuntamiento de Florencia, UNEP, IGA, IMSS, descendientes de Francesco Larderel y de Piero Ginori Conti, ENEL, GE Oil & Gas-Nuovo Pignone, y ORMAT Technologies.

## 6. Resultados del programa de celebración

Desde un punto de vista práctico, el programa de celebración del centenario ha dado, hasta ahora, los resultados siguientes:

- *Participación del público.* Durante los diferentes eventos participaron más de 6 mil personas.
- *Contactos con autoridades públicas.* Antes, durante y después de cada evento se establecieron contactos con numerosas autoridades públicas y políticas con objeto de informarlas sobre las ventajas de usar lo más posible el calor natural.
- *Diseminación de la información.* Durante casi todos los eventos la prensa mencionó ampliamente a la geotermia, lo mismo que canales de televisión locales y nacionales, que no sólo informaron la noticia sino que subrayaron las ventajas de utilizar esta fuente de energía y la necesidad de sostener su desarrollo. Además, a fin de describir mejor el programa de celebración realizado y dejar una impronta escrita en recuerdo del centenario de la industria geotermoeléctrica italiana y mundial, en 2006 se publicará un número especial del Noticiero UGI, tanto en italiano como en inglés.
- *Usos directos en Toscana.* Tomando como punto de partida la sugerencia de la UGI a la conferencia internacional, la Región Toscana promovió un estudio para actualizar la evaluación y estudiar las condiciones de mercado de los recursos de media y baja temperatura disponibles en su territorio hasta unos cientos de metros de profundidad. La primera fase del estudio ya se ha concluido, mientras que la segunda fase (que incluye el estudio de factibilidad de proyectos específicos en tres o cuatro áreas preferenciales y prioritarias), se empezará probablemente este año.
- *Proyecto “Aceptación social de la geotermia”.* Como consecuencia de una comunicación presentada por la UGI sobre este tema y de ideas discutidas en la conferencia internacional, la Universidad de Pisa está estudiando la factibilidad económica de un proyecto que jerarquice las dificultades que de unos quince años a esta fecha están frenando el desarrollo de los recursos geotérmicos de alta temperatura, tanto en Italia como en otros países del mundo. Esto con el fin de establecer una metodología de enfoque general del tema, individualizarlo y establecer las posibles maneras de enfrentar caso por caso los problemas de cada área, facilitar la superación de obstáculos, y contribuir a que las poblaciones locales acepten el desarrollo de todos los recursos geotérmicos. Si tal metodología fuera aprobada, se efectuará un proyecto piloto en zonas de estudio “tipo” tanto en Italia como en el extranjero.
- *Centro internacional de excelencia para la energía geotérmica.* Partiendo de una idea expuesta en la conferencia internacional, y con base en discusiones previas, la Región Toscana estudia la posibilidad de crear dicho Centro, para lo cual se han iniciado pláticas con el gobierno italiano y con importantes organizaciones internacionales.

## Tendencias de las telecomunicaciones en México

*Alejandro García Martínez*

CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos  
Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, Morelia, Mich., México, CP 58290

Imagínese que está esperando un correo electrónico muy importante, pero al mismo tiempo necesita salir de su oficina y trasladarse con un cliente para cerrar un negocio. O que justo en medio de su viaje de negocios le soliciten ingresar a la red de su empresa a través de Internet para entregar una información importante al Director. O que simplemente estando en un restaurante quiere ver su programa favorito de televisión. Esto ya se puede lograr con las nuevas tecnologías convergentes de la telefonía celular.

La comunicación móvil, y en especial la telefonía celular, ha tenido un enorme impacto a nivel mundial, derivado principalmente de la evolución tecnológica y comercial de la cual ha sido objeto a través de los años. Como antecedente, es importante mencionar que en 1979 aparece la primera generación de celulares en el mundo, la cual sólo podía usarse para voz. En 2002 aparece la llamada tercera generación (3G) logrando la convergencia de voz, datos (Internet móvil, SMS, correo electrónico, etc.) y multimedia (video y audio) (Daley, 2006).

En México ya está disponible la llamada tercera generación de celulares a través de las compañías Iusacell y Unefon, quienes iniciaron la operación de esta tecnología en 2005 (Eseverri, 2005).

Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, 2006), el número de abonados de telefonía móvil a nivel mundial pasó de 300 millones en 1995 a cerca de 1400 millones en sólo diez años. En cambio, la telefonía fija ha crecido de 800 millones de abonados en 1995 a 1200 millones en 2005 (Fig. 1).

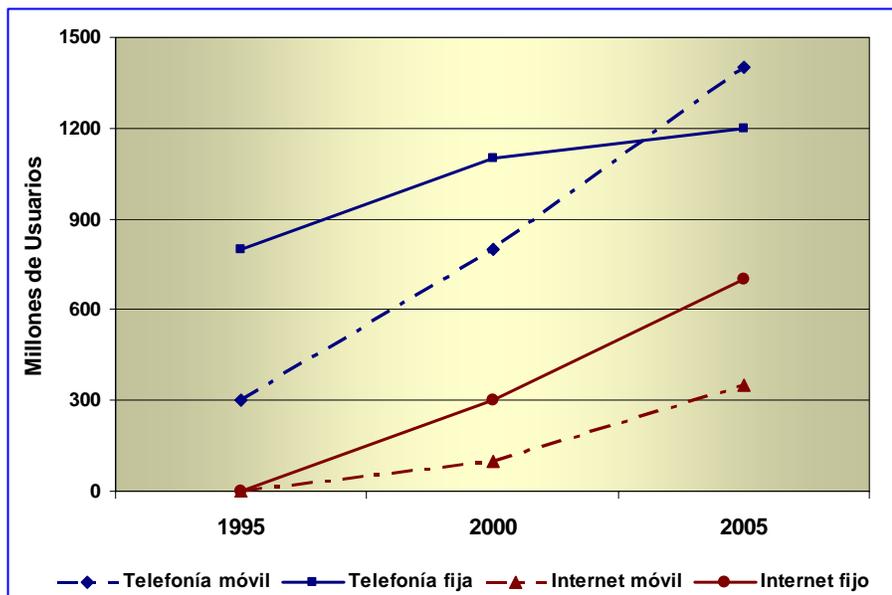


Fig. 1. Tendencias mundiales en comunicación fija y móvil  
(Fuente ITU, 2006)

Como dato adicional, los usuarios de Internet presentan un crecimiento similar al de la telefonía. Los usuarios fijos de Internet crecieron de menos de 300 millones en 2000 a cerca de 700 millones en 2005, mientras que en los usuarios móviles aumentaron de 100 millones en 2000 a cerca de 350 millones en 2005 (ITU, 2006) (Fig. 1). Con estos dos ejemplos se observa que la movilidad y el crecimiento acelerado son las tendencias predominantes de las telecomunicaciones en el mundo.

Este desarrollo ha sido el detonador para que sigan emergiendo tecnologías convergentes cada vez más novedosas. Tal es el caso de

los equipos móviles que pueden integrar todos los servicios. En la actualidad ya se pueden encontrar teléfonos celulares (*smartphone*) que incluyen cámara fotográfica, video, acceso a Internet y correo

electrónico; y por su parte también hay ya equipos de cómputo móviles (PDA) que integran cámara fotográfica, video y teléfono.

Pero no todo han sido buenas noticias, y menos para México. La telefonía móvil en este país ha crecido de forma dispar en relación al resto del mundo, en cuanto a calidad y cantidad. Dos han sido las razones principales, para ello. Primero, el monopolio que mantuvo la empresa Telcel, el cual generó un rezago debido a la falta de inversiones adicionales. Segundo, la falta de una ley de telecomunicaciones moderna e incluyente hacia todas las tecnologías emergentes.

El monopolio de telefonía móvil ya es cosa del pasado, pues empresas como Iusacell, Unefon y Telefónica han entrado al mercado en México con relativo éxito. Pero la desaparición de esas condiciones monopólicas no es suficiente, ya que se tienen que realizar cambios adicionales para que el servicio sea atractivo al usuario.

Los cambios más importantes que hay que realizar son en materia legal. Actualmente acaban de aprobarse importantes reformas y adiciones a la Ley Federal de Telecomunicaciones, con lo que podrían ordenarse las frecuencias, dejando libres bandas que actualmente se encuentran subutilizadas y que podrían ser aprovechadas por nuevos proveedores de servicios de telefonía móvil (Senado de la República, 2003). Sin embargo, las modificaciones también incluyen un sector convergente de telecomunicaciones, que abarca la radiodifusión (Senado de la República, 2005), lo que ha resultado muy controvertido. La misma Comisión Federal de Telecomunicaciones (Cofetel) de México había manifestado sus reservas, puesto que, según ella, las reformas tendrían los siguientes defectos (Cofetel, 2006):

- No regulan el espectro y redes para admitir la creciente diversidad de nuevos servicios de convergencia.
- No aseguran la rectoría del Estado para regular el uso eficiente del espectro radioeléctrico.
- No aseguran la viabilidad y continuidad del regulador para beneficiar el desarrollo del sector de telecomunicaciones a largo plazo.

Ahora que la ley ha sido aprobada se pueden visualizar de forma más clara algunas lagunas legales que pueden ser explotadas por la empresas que estén directamente involucradas:

1. Aunque la nueva ley está enfocada hacia la convergencia tecnológica, sólo las grandes empresas podrán aprovecharla. Por ejemplo, empresas de radio cuya única frecuencia asignada está en la banda AM, no podrán aprovechar los beneficios de la ley, existiendo el riesgo de su desaparición al no poder competir con los nuevos servicios que se ofrecerán.

2. Con relación a la televisión, la ley establece el procedimiento para la migración hacia la TV digital, la cual podrá, entre otras cosas, contribuir a la convergencia antes mencionada. Básicamente el planteamiento es de dotar a las empresas de TV de una frecuencia "espejo" en tanto se logra la migración, y cuando ya no sea necesario el uso de la frecuencia de la TV analógica, ésta deberá dejar de utilizarse. Sin embargo, el problema de este procedimiento es que la ley no especifica que es obligatoria la entrega de dichas frecuencias ni el tiempo en que deberán entregarse.

Por otra parte, es imperante que las empresas prestadoras del servicio sigan bajando los costos, ya que México continúa siendo el país más caro del mundo en este servicio, sólo detrás de la República Eslovaca, Turquía y Polonia (OECD, 2005). Sin embargo en el periodo de 2002 a 2004, México bajó sus tarifas un 8%, siendo el segundo país del mundo en este rubro, sólo detrás de Grecia (Fig. 2).

Por último, es importante señalar que el mercado de la telefonía móvil en México es muy amplio y poco explotado. En 2004 la penetración de la telefonía móvil en México llegaba a 36.3 usuarios por cada 100 habitantes, mientras que en Italia llegaba a 109.4 usuarios por cada 100 habitantes (Fig. 3) (OECD, 2005).

En resumen, como se puede observar, la convergencia tecnológica ya nos alcanzó y la mayoría del mundo está adoptando esta evolución de forma casi natural. Sin embargo, México aún no está preparado del todo. Las mejoras tecnológicas para que en el país exista una cobertura total en tecnología 3G van de la mano con una mayor organización en el sector de las telecomunicaciones por parte de las empresas y del mismo gobierno.

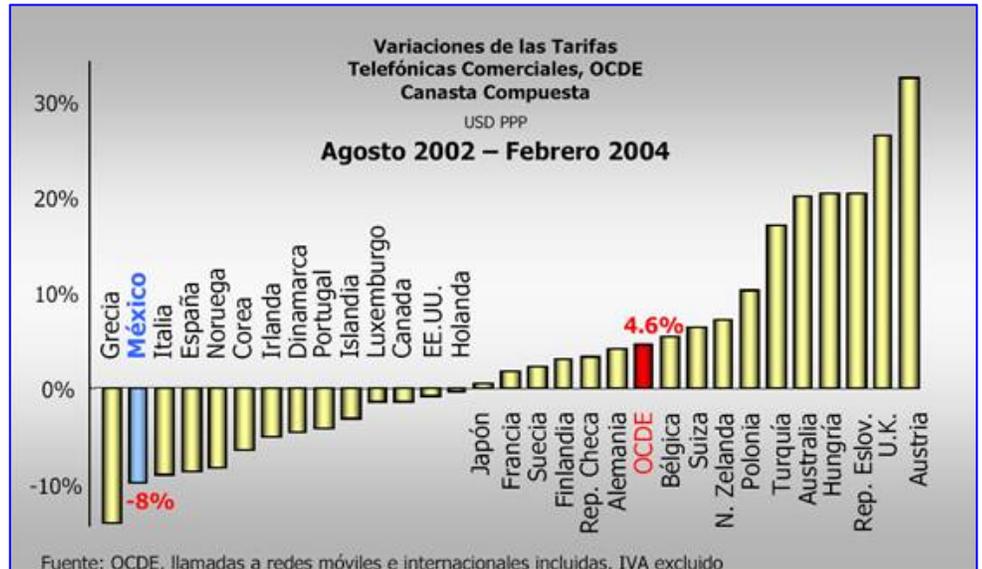


Fig. 2. Variación de las tarifas comerciales en telefonía móvil.

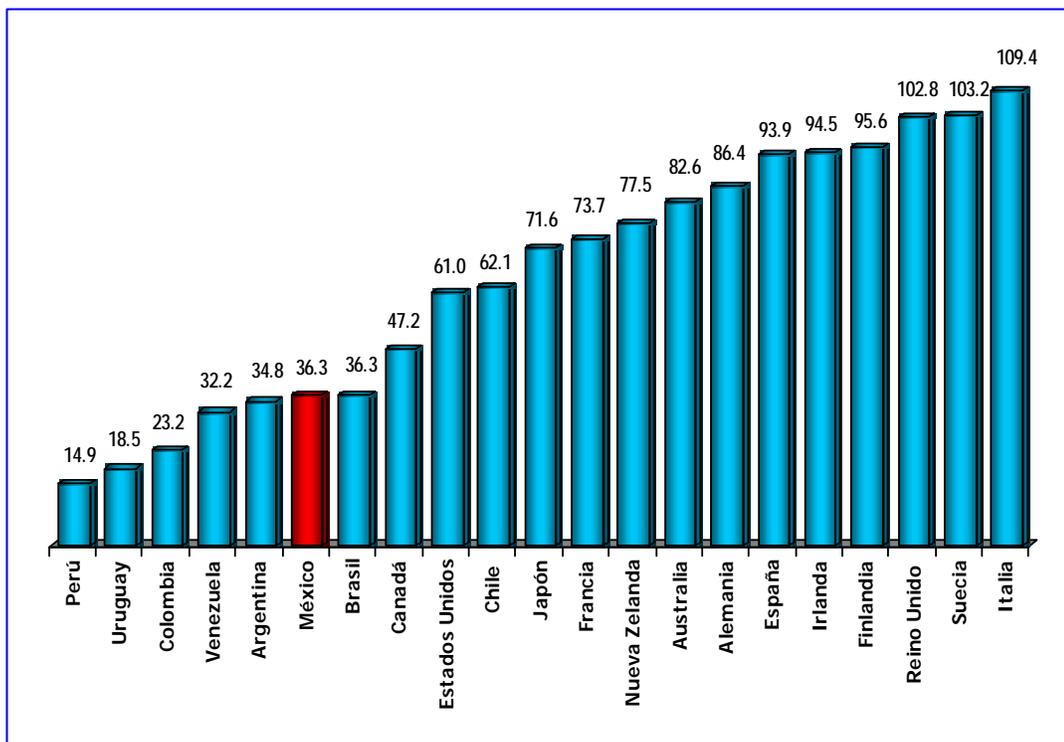


Fig. 3. Comparativo internacional de penetración de telefonía móvil en 2004 (Usuarios por cada 100 habitantes). (Fuente OECD, 2005)

Las comunicaciones móviles están tendiendo hacia la interacción total. La videoconferencia interactiva y en tiempo real es el siguiente paso. Además, aplicaciones que por su naturaleza se están desarrollando en el proyecto de Internet2, como los telecubículos, las demostraciones en 3D vía remota, el manejo de herramientas vía remota y la realidad virtual remota en 3D, están cada vez más cerca de lo que parece (Internet2, 2006).

Para estar preparados para estas nuevas herramientas, se deben aumentar las velocidades de transmisión de forma sustancial, y la estrategia natural para ello es la integración a las redes inalámbricas de banda ancha, denominadas WiMAX.

## Referencias

- Cofetel (2006). Opinión de la Cofetel respecto a la minuta de modificaciones a la LFT y a la LFRyTV. Disponible en la dirección: <http://www.cofetel.gob.mx>
- Daley, Bill (2006). *Systems analysis and design. Computers are your future*. Upper Saddle River, New Jersey. Prentice Hall.
- Eseverri, José (2005). Aceleran redes 3G. *Reforma*. Disponible en la dirección: <http://Oroquest.umi.com.millenium.itesm.mx/pqmlink?index=6&did=840644591&SrchMode=1&sid=1&Fmt=3&VInst=PROD&VType=PQD&RQT=309&VName=PQD&TS=1142043484&clientId=23693>
- Internet2 (2006). *Internet2 Newsroom*. Disponible en la dirección: [www.internet2.org](http://www.internet2.org)
- ITU (Unión Internacional de Telecomunicaciones) (2006). *ITU Publications*. Disponible en la dirección: <http://www.itu.org>
- OECD (Organisation for Economic Cooperation and Development) (2005). *OECD Communications Outlook 2005*. Disponible en la dirección: <http://www.oecd.org>
- Senado de la República, México (2003). *Informes de la Mesa Directiva*. Disponible en la dirección: <http://www.senado.gob.mx>
- Senado de la República, México (2005). *Informes de la Mesa Directiva*. Disponible en la dirección: <http://www.senado.gob.mx>

## El Mundo de la Energía

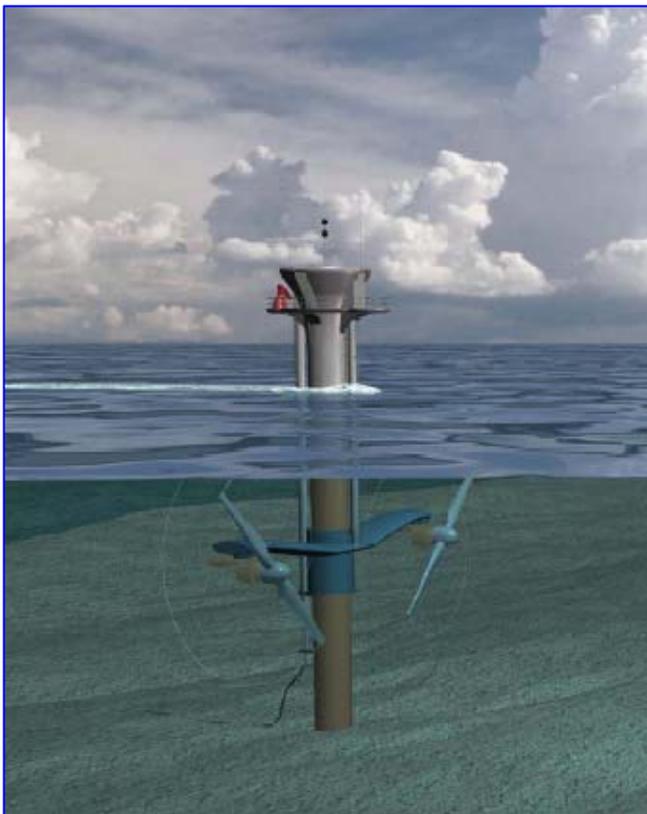
(Con información recopilada por Alfredo Mañón Mercado)

### □ Se instalará turbina mareomotriz en Irlanda del Norte

El *Environment & Heritage Service* ha dado su autorización a la empresa *Marine Current Turbines* de Inglaterra para instalar su turbina de marea de 1 MW de capacidad, llamada *SeaGen*. El proyecto ha recibido 4,3 millones de libras de fondos del *British Department of Trade & Industry* y fue construido a partir de un desarrollo anterior de 300 kW denominado *SeaFlow* que ha estado operando por más de dos años.

La turbina se instalará y será conectada a la red eléctrica nacional este año, y tiene la capacidad de generación suficiente para abastecer a 600 hogares.

El prototipo de *SeaFlow* fue la primera turbina de mareas en su tipo cuando se instaló en Lynmouth, Devon en mayo de 2003.



La empresa planea terminar la fase inicial de Investigación y Desarrollo conocida como *SeaFlow* este año de 2006. La meta es instalar 300 MW para el año 2010.

Más información:

<http://www.marineturbines.com/news.htm>

### □ Acuerdo para construir un reactor de fusión gigante

Funcionarios de la Unión Europea (UE), Estados Unidos, Rusia y cuatro países asiáticos (Japón, China, India y Corea del Sur) firmaron el 23 de mayo pasado un acuerdo para construir el reactor de fusión nuclear más avanzado a la fecha. El Reactor Termonuclear Experimental Internacional (ITER, por sus siglas en inglés) se construirá a partir de 2008 en una localidad al sur de Francia a un costo estimado en 10 mil millones de euros. Se espera que el proyecto esté concluido en 2018.

A diferencia de la fisión nuclear, que implica el rompimiento del núcleo atómico, la fusión junta los núcleos para dar lugar a un nuevo elemento. El ITER fusionará dos isótopos de hidrógeno, el deuterio y el tritio, para dar lugar al helio, generando en el proceso grandes cantidades de energía, junto con neutrones como subproducto. Para ello es preciso calentar un plasma de hidrógeno a más de 10 millones de grados centígrados, manteniéndolo contenido en un campo magnético en forma de dona.

La fusión nuclear podría resolver la mayor parte de los problemas energéticos del mundo. En teoría es capaz de producir mucha energía usando relativamente poco combustible. También habrá de producir mucho menos residuos radiactivos que una central nuclear convencional, y no hay mayores riesgos si llegara a fallar el reactor de fusión, pues este simplemente se desconectaría en lugar de derretirse.

Sin embargo, empezar una reacción de fusión es muy difícil y requiere mucha energía, como ha probado un pequeño reactor experimental de fusión que funciona en Oxford, Inglaterra (el JET: *Joint European Torus*). Este reactor, que está operando desde 1983, sólo puede generar alrededor del 70% de la energía que consume al ser puesto en marcha.

Más información: <http://www.iter.org>

#### ❑ **La producción geotermoeléctrica mundial puede incrementarse en 50%**

La capacidad eléctrica de origen geotérmico en el mundo es de 8 mil 900 MW. La *International Geothermal Association* estima que para 2010 la capacidad crecerá a 10 mil 700 MW, pero con la información actualizada por la GEA (*Geothermal Energy Association*) esa cifra podría llegar a 13 mil 500 MW, lo que equivale a un crecimiento del 50%.

De acuerdo con análisis recientes, Estados Unidos tiene un potencial de crecimiento de 5 mil 600 MW de nueva capacidad, dice la GEA. Filipinas, estima agregar de 500 a 700 MW en los próximos cuatro años y se ha propuesto una meta de 10 mil MW. Indonesia tiene instalados 800 MW pero se desea incrementar esa capacidad a 2 mil MW para el año 2009. Canadá será el país número 25 que producirá energía geotermoeléctrica. Alemania desarrolla un proyecto de 3,4 MW en un sitio cercano a Munich.

Varias centrales geotérmicas están en construcción en Islandia para suministrar electricidad a plantas productoras de aluminio. En la India se inicia el primer proyecto geotérmico piloto, estimándose que su potencial es de 10 mil 600 MW.

En Irán se perforó un primer pozo geotérmico. En Nueva Zelanda se tienen planeadas dos centrales más, una de 60 y otra de 70 MW. En Nicaragua se planea incrementar en 66 MW la capacidad, de los cuales 10 MW están en construcción. En África, en donde se tienen 130 MW, el Banco Mundial creó el "*African Rift Geothermal Fund*" con lo que se espera catalizar el desarrollo geotérmico de la

región, en donde se estima un potencial de 7 mil MW.

Más información: <http://www.sparksdata.co.uk>  
<http://geo-energy.org/publications/updates/2005>

#### ❑ **La instalación solar fotovoltaica más grande del mundo se construirá en Nevada**

Dos compañías en los Estados Unidos (*Powered by Renewables* de Las Vegas y *SunEdison* de Baltimore) desarrollarán el proyecto fotovoltaico más grande de mundo. Esta planta solar tendrá una capacidad de 18 MW y la energía que produzca será vendida a una instalación militar. La construcción empezará en julio de este año. Actualmente mayor sistema solar fotovoltaico del mundo está en Alemania y tiene una capacidad de 10 MW.

Más información: <http://www.sunedison.com>

#### ❑ **Destaca ingenio mexicano en El Cajón**

La construcción de la hidroeléctrica El Cajón, en el cauce del Río Santiago, en Nayarit, ya está considerada como una de las siete obras más importantes que se construyen en el mundo. El canal televisivo *Discovery Channel* transmitió en Estados Unidos un documental sobre esta obra, destacando el ingenio mexicano.



A partir de 2007, cuando comience a operar El Cajón, con capacidad de 750 MW de electricidad, permitirá atender una demanda equivalente a la de la ciudad de Guadalajara, Jal.

Más información: <http://www.cfe.gob.mx/cajon/es>

#### □ Tejas solares

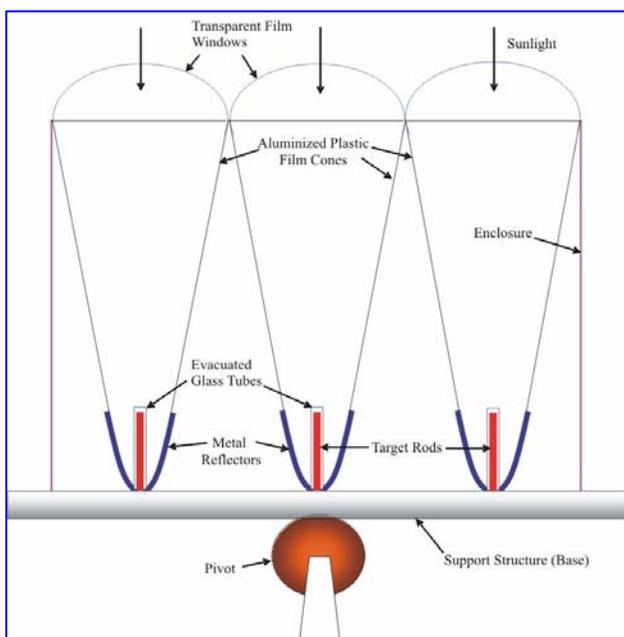
*Grupe Company*, empresa californiana dedicada a la promoción inmobiliaria, ha anunciado un plan para construir 144 casas con tejas fotovoltaicas. Su filial constructora, *Grupe Green*, cerró un acuerdo con el fabricante *PowerLight*, que suministrará las tejas, comercializadas bajo el nombre *SunTile*.

El desarrollo inmobiliario, ubicado en el distrito de Carsten Crossing, California, constituirá una de las mayores urbanizaciones residenciales en Estados Unidos diseñadas para reducir el gasto energético en un 50% o más.

Cada casa incorporará un *SunTile* de 2,4 kW de potencia. Esta teja fotovoltaica se integra en la construcción del tejado. Entre otros elementos de construcción bioclimática, las casas también contarán con ventanas térmicas, estufas de biomasa de alta eficiencia y control automatizado de la ventilación.

Más información: <http://www.powerlight.com>

#### □ Se presenta en Estados Unidos un nuevo prototipo de concentrador solar térmico



Concepción artística del Suncone, con un generador asociado de vapor

*Barnabus Energy* acaba de poner en funcionamiento un nuevo sistema de concentrador solar óptico-cónico. Según la propia empresa, el sistema será capaz de producir energía eléctrica a un costo reducido, comparado tanto con los colectores parabólicos que actualmente dominan el sector como con las plantas que utilizan un campo de helióstatos para concentrar los rayos solares en una torre central.

El sistema de *Barnabus*, denominado *Suncone* (cono solar), está formado por conos de dos metros de altura elaborados con una mezcla de nylon y aluminio. La boca más ancha de los conos, de 1,5 m, está cubierta por una película que actúa como lente.

La apertura pequeña, en el otro extremo, constituye el punto focal y se fija en una base que alberga el conjunto de conos. Esta base se monta en un seguidor solar, cuya necesidad de precisión de orientación es menor que en el caso de otros sistemas solares, ya que la lente tiene un mayor campo colector. Un tubo recorre el punto focal, sobrecalentándose el vapor de agua que sirve de fuerza motriz para la turbina. Según *Barnabus*, en dicho punto focal, el *Suncone* puede producir temperaturas de hasta 2000° C y tiene una eficiencia del 90% cuando opera a 600° C.

Más información: [www.barnabusenergy.com](http://www.barnabusenergy.com)

#### □ Se inaugura el primer proyecto europeo de captura y almacenamiento de carbono

El proyecto Castor es el primero europeo de captura de gases de efecto invernadero y almacenamiento bajo tierra. Es también el mayor del mundo. Con él se pretende recoger el 90% del bióxido de carbono emitido por centrales eléctricas alimentadas por combustibles fósiles.

Este proyecto, ubicado en Dinamarca, es una iniciativa en la que participan 30 socios industriales, junto con centros de investigación de 11 países europeos y tiene un costo de 16 millones de euros. Con él, la Unión Europea espera que sirva para abaratar esta tecnología hasta hacerla competitiva, reduciendo el costo del proceso de

secuestro de carbono de los 60 euros por tonelada actuales a unos 20 euros en el futuro.

El proceso que se ensayará en la planta piloto consiste en la captura de la mayoría del carbono emitido en los gases de la propia instalación, su tratamiento con un solvente –que por afinidad molecular atraparán el 90% del CO<sub>2</sub>– y la inyección de este solvente rico en CO<sub>2</sub> en un dispositivo que operará a 120° C y romperá los enlaces entre el solvente y el bióxido de carbono.

Más información:

<http://europa.eu.int/comm/research/fp6/>

#### □ **Proyectos de secuestro de carbono en Pemex**

Petróleos Mexicanos desarrolla un proyecto de recuperación de bióxido de carbono en el yacimiento Tres Hermanos, a través del cual se reinyectará el gas contaminante generado en procesos industriales para recuperar hidrocarburos del subsuelo.

El estimado total por la reducción de venteo del gas sólo para Tres Hermanos es de un millón 300 mil toneladas de carbono entre 2007 y 2012, dentro del programa de reducción de contaminantes de Pemex. Este programa es parte de los 76 proyectos identificados en la paraestatal para la venta de bonos de carbono.

Hacia finales de octubre de 2005, los proyectos concretos en Pemex Exploración y Producción (PEP) equivalen a 5 millones de toneladas anuales de CO<sub>2</sub>, a través de diversas tecnologías. Para llevar los proyectos a la práctica se cuenta con financiamiento de países desarrollados.

El valor de los proyectos identificados en la paraestatal es de 36 millones de dólares al año. Según datos del Banco Mundial, actualmente cada tonelada de bióxido de carbono ahorrado cuesta entre 3 y 5 dólares. El potencial estimado en México, por la reducción de gases de efecto invernadero es de mil millones de dólares anuales.

Más información:

<http://www.presidencia.gob.mx/buenasnoticias/energia/>

#### □ **Se construye central de energía de las olas en Portugal**

Las primeras tres turbinas de una instalación mar adentro de energía de las olas se pondrán en operación en Portugal en el transcurso de este año.

La compañía *Ocean Power Delivery* (OPD) entregó los tres convertidores Pelamis que son parte de un proyecto que aprovechará la energía de las olas en la costa Povoá de Varzim en el norte de Portugal.

OPD firmó una orden el año pasado con un consorcio portugués, dirigido por Enersis SA, para construir la fase inicial de la primera central de energía de las olas comercial del mundo. La primera etapa de tres generadores de 750 kW incluye una carta de intención para entregar 28 unidades adicionales antes del fin de este año, dependiendo del desempeño satisfactorio de la fase inicial.



Cuando esté terminado, el proyecto de 22,5 MW generará la electricidad necesaria para 15 mil hogares en Portugal y desplazará unas 60 mil toneladas de emisiones de CO<sub>2</sub> cada año.

Más información: <http://www.oceanpd.com/>



**CIRCULAR 1**

La ASOCIACIÓN GEOTÉRMICA MEXICANA, AC invita a su

## **CONGRESO ANUAL 2006**

Y convoca a sus miembros a su

### **XIV ASAMBLEA ANUAL**

**FECHA:**

**Viernes 8 de septiembre de 2006**

**LUGAR:**

**Campo geotérmico de Cerro Prieto, BC.**

**PROGRAMA GENERAL:**

8:00 horas: Transporte al campo geotérmico de Cerro Prieto desde Mexicali, BC. El lugar de la salida se informará oportunamente.

9:00 - 10:00 horas: Registro e inscripciones.

10:00 - 14:00 horas: Presentación de ponencias técnicas.

14:00 - 15:00 horas: *Lunch*.

15:00 - 16:00 horas: XIV Asamblea Anual.

16:00 - 17:00 horas: Transporte a Mexicali.

**COSTO:**

Miembros de la AGM al corriente de su cuota anual: **600 pesos**. No miembros: **1000 pesos**. El costo incluye el transporte Mexicali-Cerro Prieto-Mexicali y *lunch* en Cerro Prieto.

**PRESENTACIÓN DE TRABAJOS TÉCNICOS:**

La AGM invita a sus miembros y a la comunidad geotérmica en general a enviar trabajos técnicos relacionados con la geotermia, bajo los siguientes criterios y fechas clave:

1. Los trabajos deberán abordar temas relacionados con la geotermia.

2. Los interesados enviarán un resumen en español o inglés no mayor a una cuartilla a cualquiera de las direcciones electrónicas indicadas abajo a más tardar el **viernes 21 de julio de 2006**. El resumen se adjuntará como archivo en MS Word al mensaje.
3. Los autores de los trabajos seleccionados para presentación serán notificados el **4 de agosto**. En principio los trabajos seleccionados se presentarán oralmente disponiendo cada uno de un tiempo de 20 minutos con cinco para preguntas y respuestas, pero podrían seleccionarse algunos para presentación tipo póster. La presentación puede ser en español o inglés.
4. El trabajo en extenso deberá enviarse a las mismas direcciones a más tardar el **18 de agosto**. Se enviará el texto en archivo de MS Word, sin formato especial, incluyendo tablas, y las gráficas y figuras como archivos gráficos en formato \*.jpg ó \*.gif. Si el texto está en español deberá incluir un resumen en inglés, y viceversa. El trabajo será sometido a arbitraje por parte de miembros distinguidos de la AGM, quienes podrán sugerir cambios y modificaciones al trabajo extenso antes de su publicación.
5. En principio se editará y distribuirá en el congreso un CD con las memorias de las presentaciones técnicas seleccionadas, pero además se publicarán algunas de ellos o todas en la revista técnica *Geotermia*. Para la preparación del trabajo en extenso se sugiere consultar las Instrucciones de Publicación en el número más reciente de esta misma revista (<http://www.geothermal.org>).
6. Se otorgará constancia escrita de los trabajos presentados.

### PREINSCRIPCIONES:

Se solicita atentamente a los asistentes preinscribirse al evento con anticipación. Para ello, se deberá realizar un depósito con su pago total a la siguiente cuenta de cheques de la asociación:

Banco: HSBC  
Sucursal: 0301  
Beneficiario: Asociación Geotérmica Mexicana, AC  
Número de Cuenta: 4030787642  
CLABE: 021470040307876425

Hecho el depósito, se agradecerá enviar un correo electrónico a cualquiera de las direcciones indicadas abajo informándolo así, y especificando el nombre (o nombres) del participante y su adscripción. Asimismo, se deberá informar si se requiere comprobante fiscal y, en caso afirmativo, el nombre, dirección y RFC al que deberá expedirse el comprobante. La **fecha límite** para preinscripción es el **miércoles 6 de septiembre**. También habrá inscripciones el día del evento, sujetas a la disponibilidad de lugares, pero de cualquier modo se recomienda enviar antes un correo electrónico indicando la intención de asistir.

### MAYOR INFORMACIÓN:

Para mayor información, favor de dirigirse a cualquiera de las siguientes direcciones electrónicas:  
José Luis Quijano León (Vicepresidente de la AGM): [luis.quijano@cfe.gob.mx](mailto:luis.quijano@cfe.gob.mx)  
Luis C.A. Gutiérrez Negrín (Tesorero de la AGM): [luis.gutierrez03@cfe.gob.mx](mailto:luis.gutierrez03@cfe.gob.mx)

**4<sup>th</sup>. International Congress**  
and  
**2<sup>nd</sup>. National Congress of Numerical Methods in Engineering and Applied Sciences.**

**4° CONGRESO INTERNACIONAL Y 2° NACIONAL DE MÉTODOS NUMÉRICOS EN INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS**

**Del 17 al 19 de Enero de 2007**  
**Centro Cultural Universitario**  
**Universidad Michoacana UMSNH**  
**Morelia, Michoacán, México**

**January 17 - 19, 2007,**  
**University Cultural Center,**  
**Michoacán University UMSNH,**  
**Morelia, Michoacán, México**

**smmni**  
Sociedad Mexicana de  
Métodos Numéricos en  
Ingeniería

**Congreso de  
Métodos Numéricos  
Morelia 2007**

### INVITACIÓN AL EVENTO Y ENVÍO DE ARTÍCULOS

El Comité Organizador tiene el agrado de invitar a la Comunidad Nacional e Internacional de Métodos Numéricos y Matemáticas Aplicadas a participar en el 4° Congreso Internacional y 2° Congreso Nacional organizado por la Sociedad Mexicana de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas (**SMMNI**). El evento tendrá lugar en el Centro Cultural Universitario de la Universidad Michoacana durante los días Miércoles 17, Jueves 18 y Viernes 19 de Enero de 2007.

### OBJETIVOS

- Propiciar la reunión de ingenieros y científicos involucrados en la investigación, desarrollo y aplicaciones de los Métodos Numéricos y las Matemáticas Aplicadas a las Ciencias y a la Ingeniería.
- Difundir trabajos de investigación y de aplicación recientes de los Métodos Numéricos.
- Proporcionar un foro abierto para el intercambio de ideas, desarrollos y resultados en las diversas ramas numéricas.
- Presentar conferencias magistrales generales a cargo de especialistas internacionales.
- Recopilar artículos seleccionados en un CD con registro ISBN que se entregará a los participantes durante la celebración del Congreso. Los resúmenes se darán impresos.
- Las comunicaciones presentadas serán una referencia completa y actualizada sobre el alcance y posibilidades actuales de los métodos numéricos en la resolución de problemas científicos y tecnológicos en el ámbito internacional e iberoamericano en particular.

### TEMÁTICA DEL CONGRESO

Todos los miembros de la SMMNI, ingenieros, profesores, investigadores y estudiantes en las áreas numéricas, están cordialmente invitados a proponer resúmenes y enviar artículos sobre temas de investigación y aplicaciones recientes en:

1. Matemática Computacional, Modelado Matemático y Métodos Numéricos.
2. Mecánica de Sólidos y de Fluidos. Biomecánica. Transferencia de Calor. Multifísica.
3. Mecánica Estructural Computacional. Métodos sin Malla. MEF y BEM. Acústica.
4. Problemas Acoplados. Interacción Fluidos-Estructuras. Mecánica de Fracturas.
5. Flujo de Masa y Energía en Medios Porosos. Geomecánica. Flujos Químicamente Reactivos.
6. Dinámica No-Lineal Computacional.
7. Modelado de Nanoestructuras y MEMS.
8. Tecnología Avanzada en Mecánica Computacional. Paralelización de Algoritmos.
9. Optimización y Problemas Inversos. Redes neuronales. Vibraciones no Lineales.
10. Modelado de la Calidad del Aire. Relatividad Numérica.
11. Desarrollo de Nuevos Algoritmos, Software y Computación de Alto Rendimiento.
12. Historia del Desarrollo de los Métodos Numéricos, particularmente en Iberoamérica.
13. Otros Temas Relacionados con cualquier área de los Métodos Numéricos.

**FECHAS LÍMITE PARA RESÚMENES Y ARTÍCULOS TERMINADOS:**

- 1) Recepción de Resúmenes: hasta Marzo 31 de 2006.
- 2) Notificación de Aceptación: Mayo - Junio del 2006.
- 3) Recepción de Artículos aceptados: Septiembre 29 de 2006.

Los formatos para preparar el resumen y el artículo final se encuentran en la página Web del Congreso. Las formas de registro se encuentran en la misma página. Enviar resúmenes (en Word o PDF) y artículos en formato Word a la siguiente dirección electrónica: <http://congress.cimne.upc.es/morelia07>

**IDIOMAS:** Los idiomas oficiales del Congreso serán el Español y el Inglés.

**SEDE:** Centro Cultural Universitario (CCU) de la Universidad Michoacana UMSNH.

**HOTELES SEDE:** Virrey de Mendoza y Alameda, ambos cerca del CCU, uno frente al otro.

**UBICACIÓN:** En el corazón del Centro Histórico de la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. Este centro está clasificado como Patrimonio Arquitectónico de la Humanidad por la UNESCO, siendo Morelia una de las ciudades coloniales más bellas y originales de México.

**CLIMA:** La temperatura en Morelia es agradable durante el mes de Enero. El clima es tibio y soleado durante el día (25° C) y algo frío en las noches (12° C). Normalmente no llueve.

**TRANSPORTE:** La ciudad de Morelia está conectada por cielo y tierra a cualquier parte del mundo. El aeropuerto internacional de Morelia tiene vuelos durante toda la semana entre las siguientes ciudades de los EUA: San Francisco, Los Angeles, Las Vegas, Chicago, Houston, Dallas, Miami y entre las ciudades mexicanas de: México DF, Monterrey, Tijuana, Zacatecas, Cd. Juárez y Hermosillo. Morelia también está comunicada por modernas autopistas entre la Cd. de México, León, Guanajuato, Guadalajara, y Querétaro.

**AGENCIA DE VIAJES OFICIAL DEL CONGRESO: MOVISA.** Si necesita asistencia en todo lo relacionado a reservaciones de hoteles, transporte a Morelia desde cualquier lugar del planeta, guías, arreglo de paquetes turísticos pre y post-congreso a precios módicos especiales, MOVISA puede ayudarle sin costo alguno. Por favor diríjase a la siguiente página: <http://www.colonialtours.com/>, [congresos@colonialtours.com](mailto:congresos@colonialtours.com). Si usted lo prefiere, realice sus propias reservaciones.

**COSTOS DE INSCRIPCIÓN****Pago antes del 2 de octubre de 2006:**

Autores ..... 300 USD o \$3000.00 pesos  
 Participantes ..... 350 USD o \$3500.00 pesos  
 Estudiantes ..... 100 USD o \$1000.00 pesos

**Pago después del 2 de octubre de 2006:**

Autores..... 350 USD o \$3500.00 pesos  
 Participantes..... 400 USD o \$4000.00 pesos  
 Estudiantes..... 110 USD o \$1100.00 pesos

Los pagos podrán efectuarse con tarjeta de crédito internacional o mediante depósito a cuenta de cheques. Los detalles de cómo hacer el pago se encuentran en la página web del congreso. Recomendamos a los participantes realizar con anticipación su registro y reservación de hotel.

**COMITÉ ORGANIZADOR**

Mario César Suárez Arriaga	(UMSNH – Michoacán)
Salvador Jara Guerrero	(COECyT- Michoacán)
Francisco Zárate	(CIMNE - España)
Sergio Gallegos Cázares	(ITESM - Monterrey)
Salvador Botello Rionda	(CIMAT- Guanajuato)
Miguel Angel Moreles	(CIMAT- Guanajuato)
Miguel X. Rodríguez Paz	(ITESM - Puebla)
Juan José Pérez Gavilán	(UNAM – México, DF)
Carlos Iván Rivera Solorio	(ITESM - Monterrey)

---

---

## INSTRUCCIONES DE PUBLICACIÓN EN LA REVISTA GEOTERMIA

*Geotermia* está abierta a la participación de investigadores de instituciones tanto nacionales como del extranjero quienes deben dirigir sus contribuciones a:

**GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA**

Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.

Morelia, Mich., C.P. 58290, México

Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

[luis.quijano@cfe.gob.mx](mailto:luis.quijano@cfe.gob.mx), [luis.gutierrez03@cfe.gob.mx](mailto:luis.gutierrez03@cfe.gob.mx)

Los trabajos deberán cumplir con las siguientes instrucciones de publicación.

1. El artículo debe ser inédito y relacionado con la geotermia, las fuentes alternas no convencionales de energía o con ramas afines.
2. Enviar una copia impresa a doble espacio, así como disquete con el archivo en formato MS-Word. También puede enviarse el archivo por correo electrónico a las direcciones indicadas arriba. Se aceptan trabajos en español con resumen en inglés, o en inglés con resumen en español.
3. Las tablas, cuadros y figuras deberán incluirse al final del texto. Las figuras y gráficas pueden ser en color o en blanco y negro, tener buena calidad y no rebasar el tamaño carta. Su cantidad deberá ser la suficiente para la comprensión o ilustración del trabajo expuesto. Deberán incluirse en las copias impresas, al final del texto, así como en el disquete en forma de archivos independientes en formato de imagen (\*.gif, \*.tif, \*.jpg) que puedan importarse como tales desde MS-Word.
4. *Geotermia* es una revista virtual que se publica en formato \*.pdf en el portal interno de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos y en otros portales públicos. Por lo tanto, es importante que todas las figuras y gráficas tengan la resolución suficiente para poder apreciarse al convertirse a archivos de imagen.
5. Todo artículo será sometido a revisión y arbitraje de un mínimo de dos especialistas en la materia. Para facilitar la imparcialidad de la revisión se mantendrá el anonimato entre autores y árbitros. Se enviarán reconocimientos escritos a quienes colaboraron como árbitros.
6. Se ofrecerá apoyo especial a los autores sin hábitos de publicar resultados por no constituir la publicación una parte rutinaria de su trabajo, y que, en consecuencia, requieran de indicaciones adicionales. El Consejo Editorial se encargará de hacer las modificaciones o correcciones pequeñas que no justifiquen la aplicación de un nuevo arbitraje.
7. El contenido de los trabajos deberá abordar los temas que se indican a continuación. Se subrayan las partes consideradas como indispensables, aunque su contenido pueda aparecer bajo otra sección o con otro título. Las otras secciones son opcionales, aunque pudiera haber otras a juicio del autor: Título, Autor, Adscripción laboral, Dirección de correo electrónico, Resumen en español, Palabras Clave en español, Título en inglés, Resumen (Abstract) en inglés, Palabras Clave (Keywords) en inglés, Antecedentes o Introducción, Objetivo, Metodología, Datos, Procesamiento, Interpretación, Interpretaciones alternativas, Conclusiones, Verificación, Agradecimientos, Referencias, Apéndices.
8. Todas las referencias deberán estar citadas en el texto y todas las citas deberán estar incluidas en las referencias. En el texto se empleará el sistema Harvard (apellido y año): "Algunos autores (González, 1995)...", o bien "González (1995) reporta que...". En caso de dos autores la cita deberá incluirlos a ambos (González y Rodríguez, 1995) y en caso de más autores deberá utilizarse la convención *et al.* (González *et al.*, 1995). La lista de referencias irá en orden alfabético y deberá incluir a todos los autores con todos los detalles de la publicación; si se emplean abreviaturas de publicaciones científicas, deberán estar de

acuerdo con el *World List of Scientific Periodicals*. Solamente las iniciales del primer autor irán después del apellido, y se colocará entre paréntesis el año de la publicación después del apellido del último autor. El título de la revista o libro referenciado deberá escribirse en cursivas. Ejemplos:

Cedillo-Rodríguez, F. (1999). Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia*, Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García (1984). Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L. (1970). *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.

9. Si lo desea, puede solicitar una copia de los formatos de arbitraje y utilizar como guía para el contenido de su contribución los artículos ya publicados en esta revista.

10. Eventualmente aparecerá como parte de la revista una sección intitulada FORO, la cual dará cabida a artículos y colaboraciones tipo ensayo que pueden no cumplir con alguno o algunos de los requisitos precedentes, pero que a juicio del Consejo Editorial pueden resultar de interés para los lectores de la misma. Estas colaboraciones no serán sometidas a arbitraje técnico. Si desea que su colaboración sea considerada para publicarse en FORO, por favor indíquelo así al remitirla.

---



---

## DIRECTIONS FOR CONTRIBUTORS

*Geotermia* is open to Mexican and foreign contributors, who should send all contributions to:

GEOTERMIA, REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA  
Alejandro Volta 655, Col. Electricistas.  
Morelia, Mich., C.P. 58290, México  
Atención: José Luis Quijano-León y/o Luis C.A. Gutiérrez-Negrín  
[luis.quijano@cfe.gob.mx](mailto:luis.quijano@cfe.gob.mx), [luis.gutierrez03@cfe.gob.mx](mailto:luis.gutierrez03@cfe.gob.mx)

Contributions must follow these guidelines:

1. A submitted paper must be unpublished and related to geothermics, nonconventional energy sources or similar subjects.
2. Submit a printed copy, double spaced, and a diskette with the file in MS-Word format. The file may be sent by e-mail to an e-address indicated above. Contributions in Spanish with abstracts in English, or in English with abstracts in Spanish, are acceptable.
3. Tables, figures and graphs must be placed at the end of the text. They must be of good quality, either in color or black and white, and not larger than letter-sized paper. Include all tables, figures and graphs needed by a reader to understand the paper. Place them on the diskette as independent files in image-format (\*.gif, \*.tif, \*.jpg), which can be imported from MS-Word.
4. *Geotermia* is a digital magazine published in a \*.pdf format at the internal website of the Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos and at other public websites. Therefore, all figures and graphs must have enough resolution to be clear when they are converted to image-files.
5. All contributions will undergo review and arbitration by at least two specialists in the field. To encourage fair evaluations, the authors will receive anonymous reviews. The reviewers will receive an acknowledgement letter from the editorial board.

6. *Geotermia* offers special support to first-time authors for whom publishing papers is not part of their jobs. The editorial board can make small modifications or corrections to such papers without a new peer-review process.
7. All papers must include the following sections. Those considered as indispensable are underlined, yet they can be included under other chapters or subtitles. The other parts are optional, plus authors can include additional sections: Title, Author(s), Company or institution, Address, Abstract in Spanish, Keywords in Spanish, Title in English, Abstract in English, Keywords in English, Introduction or background, Objective, Methodology, Data, Processing, Interpretation, Alternative interpretations, Conclusions, Verification, Acknowledgement, References, Appendix.
8. All references must be cited in the text, and all citations must be included in the References. In the text, the Harvard citation system (last name and year) must be used: "Some authors (González, 1995)...", or: "González (1995) indicates that..." In the case of two authors, the citation must include both (González and Rodríguez, 1995), and in the case of more than two authors the convention *et al.* (González *et al.*, 1995) must be used. The list of references must be arranged alphabetically and include all the authors and details of the cited publication. All abbreviations must be from the *World List of Scientific Periodicals*. Initials of the first author must follow the last name, putting into parenthesis the year of publication after the last author. The title of a magazine or book must be written in italics. Examples:
 

Cedillo-Rodríguez, F. (1999). Modelo hidrogeológico de los yacimientos geotérmicos de Los Humeros. *Geotermia*, Vol. 15, No. 3, 159-170.

Gutiérrez-Negrín, L., A. López-Martínez and M. Balcázar-García (1984). Application of dating for searching geothermic sources. *Nuclear Tracks and Radiation Measurements*, Vol. 8, Nos. 1-4, 385-389.

Allen, J.R.L. (1970). *Physical Processes of Sedimentation*. London, Allen and Unwin, 248 pp.
9. You may ask for a copy of the review of any paper published in *Geotermia* and use it as a guide for your contribution.
10. Eventually, a section named FORO will constitute the last part of the magazine. The section will include contributions, notes and essays that may or may not meet any or all of the stipulations for papers, but that the editorial board considers of interest to the readers. Contributions included in FORO will not undergo peer review. If you want a contribution be placed in FORO, please indicate this upon submission.