



GEOTERMIA

REVISTA MEXICANA DE GEOENERGÍA

ISSN 0186-5897

Volumen 18, No. 1

Enero-Junio de 2005

CONTENIDO

Editorial	1
Contexto ambiental del desarrollo del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Eugenio J. Pastrana-Melchor, María Elena Fernández-Solórzano, Ernesto Mendoza-Rangel y Cuauhtémoc Hernández-Ayala	3
Respuesta a la explotación (1982-2003) del yacimiento geotérmico de Los Azufres, Mich. (México). Parte II: Zona Sur Víctor Manuel Arellano G., Marco Antonio Torres R., Rosa María Barragán R., y Fernando Sandoval M.	18
Riesgos geomorfológicos e hidrológicos en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. Eleazar Arreygue Rocha, Víctor Hugo Garduño Monroy, Paolo Canuti, Nicola Casagli y Alberto Iotti	26
Actualización del modelo geológico conceptual del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC. Héctor Lira Herrera	37
Foro	47
Control de la corrosión Resumen extenso de un artículo original de M.L. Berndt y A.J. Philippacopoulos aparecido en el <i>Bulletin</i> del GRC, realizado por José Luis Quijano-León.	48
El Mundo de la Energía Información de Alfredo Mañón Mercado	51
XII Asamblea Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana Luis C.A. Gutiérrez-Negrín	55

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

Gerardo García Estrada

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

e-mail: luis.gutierrez03@cfe.gob.mx

Editorial

A manera de editorial de este segundo número de la revista *Geotermia* en su nuevo formato virtual, transcribimos un texto cuyo tema, tratado con una fina ironía renacentista por el autor, puede servirnos de sana crítica a quienes dedicamos parte de nuestro tiempo y esfuerzo a escribir sobre temas científicos o técnicos, particularmente en lo relativo a las referencias y citas bibliográficas. El autor es nada menos que Miguel de Cervantes y el texto es un fragmento literal del prólogo a su novela *El Ingenioso Hidalgo Don Quijote de la Mancha*.

“...Oyendo lo cual mi amigo, dándose una palmada en la frente y disparando en una larga risa, me dijo:

“--Por Dios, hermano, que ahora me acabo de desengañar de un engaño en que he estado todo el mucho tiempo que os conozco, en el cual siempre os he tenido por discreto y prudente en todas vuestras acciones. Pero ahora veo que estáis tan lejos de serlo como lo está el cielo de la tierra. ¿Cómo que es posible que cosas de tan poco momento y tan fáciles de remediar puedan tener fuerzas de suspender y absortar un ingenio tan maduro como el vuestro y tan hecho a romper y atropellar otras dificultades mayores?... Pues estadme atento, y veréis cómo en un abrir y cerrar de ojos confundo todas vuestras dificultades y remedio todas las faltas que decís que os suspenden y acobardan para dejar de sacar a la luz del mundo vuestra historia.

“Lo primero en que reparáis de los sonetos, epigramas o elogios que os faltan en el principio, y que sean de personajes graves y de título, se puede remediar en que vos mismo os toméis algún trabajo en hacerlos, y después los podéis bautizar y poner el nombre que quisierdes, ahijándolos al Preste Juan de las Indias o al Emperador de Trapisonda, de quienes sé que hay noticia que fueron famosos poetas; y cuando no lo hayan sido y hubiere algunos pedantes y bachilleres que por detrás os muerdan y murmuren sobre esta verdad, no se os dé dos maravedís; porque ya os averigüen la mentira, no os han de cortar la mano con que lo escribisteis.

“En lo de citar en las márgenes de los libros y autores de donde podríais sacar las sentencias y dichos que pusiereis en vuestra historia, no hay más sino hacer de manera que vengan a pelo algunas sentencias o latines que vos sepáis de memoria o, a lo menos, que os cueste poco trabajo el buscarlos. Y con estos latinajos y otros tales os tendrán siquiera por gramático; que el serlo no es de poca honra y provecho en el día de hoy.

“En lo que toca a poner anotaciones al fin del libro, seguramente lo podéis hacer de esta manera: si nombráis algún gigante en vuestro libro, hacedle que sea el gigante Golías, y con sólo esto, que os costará casi nada, tendréis una grande anotación, pues podéis poner: ‘El gigante Golías, o Goliat, fue un filisteo a quien el pastor David mató de una gran pedrada en el valle de Terebinto, según se cuenta en el Libro de los Reyes’, en el capítulo que vos hallareis que se escribe.

“Tras esto, para mostraros como hombre erudito en letras humanas y cosmógrafo, haced de modo que en vuestra historia se nombre el Río Tajo, y vendréis luego con otra famosa anotación, poniendo: ‘El Río Tajo fue dicho así por un rey de las Españas; tiene su nacimiento en tal lugar, y muere en la Mar Océano, besando los muros de la famosa ciudad de Lisboa, y es opinión que tiene las arenas de oro’, etcétera... En resolución, no hay más sino que vos procuréis nombrar estos nombres, o tocar en la vuestra estas historias que aquí he dicho, y dejadme a mi el cargo de poner las anotaciones y acotaciones; que yo os voto a tal de llenaros las márgenes y de gastar cuatro pliegos en el fin del libro.

“Vengamos ahora a la citación de los autores que los otros libros tienen, que en el vuestro os faltan. El remedio que esto tiene es muy fácil, porque no habéis de hacer otra cosa que buscar un libro que los acote todos, desde a la A hasta la Z, como vos decís. Pues ese mismo abecedario pondréis en vuestro libro; que, puesto que a la clara se vea la mentira por la poca necesidad que vos teníais de aprovecharos de ellos, no

importa nada; y quizá alguno habrá tan simple que crea que de todos os habréis aprovechado en la simple y sencilla historia vuestra, y cuando no sirva de otra cosa, por lo menos servirá aquel largo catálogo de autores a dar de improviso autoridad al libro. Y más, que no habrá quien se ponga a averiguar si los seguisteis o no los seguisteis, no yéndole nada en ello.

“Con silencio grande estuve escuchando lo que mi amigo me decía, y de tal manera se imprimieron en mí sus razones, que, sin ponerlas en disputa, las aprobé por buenas, y de ellas mismas quise hacer este prólogo.”

José Luis Quijano-León

Contexto ambiental del desarrollo del campo geotérmico de Los Humeros, Pue.

Eugenio J. Pastrana-Melchor, María Elena Fernández-Solórzano, Ernesto Mendoza-Rangel y Cuauhtémoc Hernández-Ayala

CFE, Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, Morelia, 58290, Mich.

Resumen

La construcción, operación y mantenimiento del campo geotermoeléctrico Los Humeros, Pue., se ha llevado a cabo dentro del marco jurídico ambiental vigente en México. Las resoluciones en materia de impacto ambiental, la licencia en materia de prevención de la contaminación de la atmósfera, el título de concesión para explotar, usar o aprovechar aguas nacionales, el permiso para descargar aguas residuales domésticas, el registro como empresa generadora de residuos peligrosos, y el cumplimiento de las disposiciones y condicionantes establecidos en cada uno de estos documentos, evidencian la observancia de la legislación ambiental aplicable al proyecto.

Palabras Clave: México, Los Humeros, impacto ambiental, marco jurídico ambiental, prevención, mitigación y restauración de impactos.

Environmental framework for the development of the Los Humeros, Pue., geothermal field

Abstract

The construction, operation and maintenance of the Los Humeros, Pue., geothermal field were undertaken in accordance with Mexican environmental regulations. The resolutions on environmental impacts, license for atmospheric pollution prevention, concession title for exploitation and use of national waters, permission for wastewater discharging services, company registration for producing dangerous wastes and fulfillment of all conditions noted in the documents show the applicable environmental laws for the project have been followed.

Keywords: Mexico, Los Humeros; environmental impact; environmental laws; impact prevention, mitigation and restoration.

1. Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) a través de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) inició en los años setenta una serie de estudios exploratorios en las zonas termales de la República Mexicana con objeto de localizar sitios con posibilidades de aprovechar el recurso geotérmico para la generación de energía eléctrica. Una de las áreas exploradas se encuentra ubicada en la porción oriental del Estado de Puebla y occidental del Estado Veracruz, a la que se le llamó Los Humeros, por encontrarse dentro de ella el pueblo del mismo nombre. Esta zona comprendía una superficie de 4534 ha. En 1981 se limitó el área de exploración a 45 ha (1% de la zona de interés geotérmico) y se perforaron los primeros pozos productores de vapor geotérmico. En 1990 se inició la explotación de la energía con unidades de generación pequeñas que

pudieran ser reubicadas en el momento que se requiriera, con la instalación de la primera de siete unidades geotermoeléctricas a boca de pozo con una capacidad de 5 MW cada una.

Después de evaluada la capacidad del yacimiento y de haber generado anualmente del orden de 300 GWh por más de una década, se contempla en un futuro próximo instalar dos unidades a condensación de 25 MW cada una.

Aun cuando los trabajos de exploración, selección, preparación del sitio y construcción de las obras que conforman el sistema geotermoeléctrico se efectuaron de acuerdo con los Criterios Ecológicos CEOESEO04/89 (SEDUE, 1989a), se considera que la gestión ambiental del proyecto se inicia propiamente en 1993 con la presentación de la Manifestación de Impacto Ambiental, Modalidad General (MIA-G), para la instalación de unidades generadoras de 5 MW de capacidad, debido a que de ahí se deriva la resolución mediante la cual se autoriza la regularización de una obra que había comenzado en 1990 con la entrada en operación de las primeras dos unidades de ese tipo.

A continuación se presenta el marco jurídico ambiental que rige la operación del campo geotérmico de Los Humeros y las gestiones que se realizaron y se siguen realizando para dar cumplimiento a las disposiciones ambientales correspondientes. Asimismo, se mencionan las principales características de las autorizaciones otorgadas a la CFE y se informan las acciones, técnicas, datos y resultados obtenidos de aplicar las medidas de prevención y mitigación de impactos ambientales.

El propósito de este artículo es divulgar las actividades desarrolladas y los resultados obtenidos, para dar cumplimiento a las disposiciones establecidas en los permisos otorgados por las autoridades.

2. Marco Jurídico Ambiental

La Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA) fue reformada en 1996. Los artículos de las leyes y reglamentos que aplicaban para el desarrollo de un campo geotermoeléctrico a principios de la década de los noventa se presentan en la Tabla 1. En esta se enuncia sucintamente a qué se refiere cada uno de esos artículos y en la Tabla 2 se presenta un resumen de los trámites que se realizaron para obtener las autorizaciones correspondientes a cada una de las materias referidas en la Tabla 1.

Como resultado de las gestiones efectuadas se obtuvieron los permisos respectivos, todos condicionados a diferentes disposiciones de la autoridad competente. A continuación se mencionan los datos más importantes de las licencias y las acciones que se han llevado a cabo para acatar las disposiciones.

Impacto Ambiental

Del análisis de la MIA-G (CFE,1992), así como de la Información Adicional (CFE, 1994), la Dirección General de Normatividad Ambiental (DGNA) de la entonces Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL) determina, mediante el Resolutivo No. 448 (SEDESOL,1994), que el desarrollo del proyecto causará impactos ambientales adversos poco significativos, ya que:

- La zona no se encuentra dentro o cerca de un área natural protegida de interés para la Federación.
- La vegetación presente en el área está formada por estratos arbustivos (*Agave atrovirens*, *Agave lechugilla*, *Opuntia imbricata* y *Mammillaria sp.*), herbáceos (*Chenopodium album* y *Helenium sp.*) y arbóreos (*Arbustus glandulosa*, *Quercus crassipes*, *Yuca filifera*, *Abies religiosa*, *Pinus cembroides*, *Pinus moctezumae* y *Pinus teocote*), así como pastizales (*Muhlen bergia*).

- El efecto de la emisión de gases contaminantes durante la operación del proyecto es susceptible de mitigarse.

LEY	MATERIA	ART. No.	FRACC. No.	RELATIVO A:
LEY GENERAL DEL EQUILIBRIO ECOLÓGICO Y LA PROTECCIÓN AL AMBIENTE Y SUS REGLAMENTOS (DOF, 28 de enero de 1988)	Impacto Ambiental	28 L	--	Requerimiento de autorización para cualquier obra o actividad pública o privada, que pueda causar desequilibrios ecológicos o rebasar los límites y condiciones señaladas en los reglamentos y las normas en la materia.
		29 L	III	Evaluación del Gobierno Federal, por conducto de la Secretaría, a que se refiere el artículo 28, particularmente para las obras que se proyecten en algunas industrias como la de generación y transmisión de electricidad.
		5º. R	V	Ratificación del Artículo 29 de la Ley.
		6º. R	--	Requerimiento de presentar una manifestación de impacto ambiental (MIA) para obtener la autorización, en forma previa a la realización de la obra.
		9º. R	--	Las modalidades del estudio ambiental: en primera instancia se presentará una MIA general y de requerirse se solicitará una intermedia o específica.
		10 R	I - VI	La información mínima que deberá contener la MIA general.
		13 R	--	Requerimiento de información adicional que complemente la comprendida en la MIA.
		14 R	I	Tiempo en el que se evalúa la MIA-G y en su caso la información complementaria requerida, y en el que se dictamina la resolución de evaluación correspondiente.
	20 R	II	Tipos de autorizaciones. La fracción II corresponde a una condicionada.	
	Contaminación de la Atmósfera	18 R	--	Requerimiento de Licencia de Funcionamiento (LF) expedida por la Secretaría, para las fuentes fijas de jurisdicción federal que emitan olores, gases o partículas sólidas o líquidas a la atmósfera.
		19 R	I - XII	La obligación de presentar una solicitud por escrito para obtener la LF acompañada de la información que se describe en las doce fracciones de este artículo.
	Residuos Peligrosos	151 L	--	Requerimiento de autorización para la instalación y operación de sistemas para el manejo de residuos peligrosos.
		8º. R	I - XII	Lineamientos generales que un generador de residuos peligrosos debe observar para el manejo de sus residuos.
9º.-17 R		--	Procedimiento a seguir para cada una de las actividades que están involucradas en el manejo de los residuos y a las condiciones de construcción de almacén de estos.	
LEY DE AGUAS NACIONALES	Aguas	20-27 L	--	Concesiones y asignaciones de agua.
		28-29 L	--	Los derechos y obligaciones de concesionarios o asignatarios.
		30-32 L	--	Registro público de derechos de agua.
		31 R	I - VII	Forma en la que se realizará la solicitud de concesión o asignación y los documentos que se presentarán.
LEY FEDERAL DE DERECHOS	Aguas	222 L	--	Obligación al pago del derecho sobre agua por la explotación o aprovechamiento de aguas nacionales bien sea de hecho, o al amparo de títulos de concesión, autorización o permiso.
		224 L	V	Excepción del pago del derecho a que se refiere el Artículo 222 cuando las aguas regresen a su fuente original, previa autorización por la Comisión Nacional del Agua (CNA) en los términos de la Ley, siempre que cumpla con los lineamientos de calidad del agua señalados en esta fracción.

Notas: L: Ley, R: Reglamento.

Tabla 1. Marco jurídico ambiental

En consecuencia, la DGNA resuelve que la construcción, operación y mantenimiento del proyecto de Los Humeros es procedente, y la condiciona al cumplimiento de 13 términos y 25 subtérminos. El carácter y contenido de las condicionantes se observa en la Tabla 3.

MATERIA	DEPENDENCIA	TRÁMITE
Impacto Ambiental	DGNA-INE-SEDESOL	Presentación de la MIA-G para la instalación de unidades generadoras de 5 MW de capacidad en el Campo Geotérmico de Los Humeros (Abril, 1993).
		Entrega de la Información Adicional (IA) a la MIA-G (Marzo, 1994).
Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera	SMA-DFP-SEMARNAP	Presentación de la solicitud para la LF de las fuentes fijas de emisión del Campo Geotermoeléctrico Los Humeros (Julio, 1993).
		Entrega de la Información Adicional a la LF solicitada (Abril y Agosto, 1995).
Residuos Peligrosos	SMA-DFP-SEMARNAP	Solicitud de registro como empresa generadora de residuos peligrosos (Febrero, 1997).
		Segunda solicitud de registro como empresa generadora de RP (Julio, 2000).
Aguas Nacionales	CNA	Solicitud del Título de Concesión para Explotar, Usar o Aprovechar Aguas Nacionales del subsuelo.
Derechos en Materia de Agua		Solicitud del permiso de descarga de aguas residuales del campo al yacimiento por medio de los pozos inyectores y del campamento a través de un sistema de tratamiento.

Notas: DGNA-INE-SEDESOL: Dirección General de Normatividad del Instituto de Ecología de la Secretaría de Desarrollo Social.
 SMA-DFP-SEMARNAP: Subdelegación del Medio Ambiente de la Delegación Federal de Puebla de la Secretaría del Medio Ambiente, Recursos Naturales y Pesca.
 CNA: Comisión Nacional del Agua.

Tabla 2. Gestiones ambientales para dar cumplimiento al marco jurídico ambiental

TÉRMINO No.	CARÁCTER	RELATIVO A:
1	Obligatorio	Acatar lo establecido en los Criterios Ecológicos CE-OESE-004/89 (SEDUE, 1989a).
2	De advertencia	Área de los predios destinado a la construcción del proyecto y del campamento, los que no excederán, respectivamente, a las 44,8 ha y 25 ha manifestadas.
3.1-3.18	Obligatorio	Las medidas que se deben observar durante las diferentes etapas del proyecto.
3.19	Obligatorio	Mantener en el sitio de la obra la autorización del proyecto, la MIA y la IA, para mostrarlas a la autoridad competente que lo requiera.
4.1-4.6	Prohibitivo	Las actividades que no deben realizarse.
4.6	Prohibitivo	La modificación de las características técnicas del proyecto, de requerirse, notificar a la SEDESOL con toda oportunidad, para que determine lo procedente.
5 y 12	Informativo	Las características de la autorización.
6-9	Informativo	La forma y los plazos en los que se presentará un Programa General de las acciones que darán cumplimiento a los Términos y Disposiciones, así como de los informes de seguimiento.
10	De advertencia	La invalidación de la resolución en caso de incumplir alguno de los términos del uno al nueve, o modificar el proyecto descrito en la MIA y en la IA.
11	Informativo	Las facultades de vigilancia de la SEDESOL en el cumplimiento de las disposiciones establecidas en la autorización.
13	De instrucción	Satisfacer los requerimientos, normas y cualquier otro requisito de la SEDESOL o de otras autoridades.

Tabla 3. Estructura del Resolutivo No. 448

La CFE (1995a) dio respuesta a cada término y presentó los programas que se llevarían a cabo durante la vida útil del proyecto, como son:

- Manejo y rescate de especies de flora y fauna catalogadas en estado de conservación (Término 3.5).
- Restauración en las áreas en las que la CFE desmantele infraestructura (Término 3.7).
- Análisis continuo ambiental (monitoreo de aire y de agua) (Términos 3.10, 3.12 y 3.13).
- Seguimiento al programa de reforestación manifestado (Término 3.17).
- Mantenimiento de los caminos de acceso (Término 3.18).

En el Término 3.5 quedó establecido que la CFE debía elaborar un programa de manejo y rescate que asegurara la permanencia de alguna o algunas de las especies de flora o fauna catalogadas con algún estatus de conservación en la Norma Oficial Mexicana NOM-059-ECOL-1994, tales como el coyote (*Canis latrans*), el gato montés (*Linx rufus*), la salamandra (*Ambystoma mexicanus*) y el coralillo (*Micrurus sp.*), así como de especies raras amenazadas o en peligro de extinción que hubiese en la zona del proyecto de acuerdo con sus requerimientos de hábitat. Ello no obstante, la CFE (1995b) presentó al Instituto Nacional de Ecología (INE), una propuesta para llevar a cabo muestreos de flora y fauna con la finalidad de complementar los listados florísticos y faunísticos presentados en la MIA-G e identificar las especies con algún estatus de conservación, de acuerdo con la norma de referencia, toda vez que no era posible realizar trabajos de rescate debido a que el proyecto ya se encontraba en las etapas de construcción y operación.

En observancia del Término 4.6, en julio de 2000 la CFE dio aviso a las autoridades del INE-SEMARNAP del proyecto para instalar una unidad de ciclo binario de 300 kW como ampliación del sistema de generación de la Unidad 2 de 5 MW, bajo el esquema de uso eficiente de energía. Se solicitó dictaminar si las acciones relacionadas requerían ser evaluadas o si podían realizarse sin contar con autorización de ese Instituto, según lo establece el Artículo 6o. del Reglamento de la LGEEPA en Materia de Impacto Ambiental. La Dirección General de Ordenamiento Ecológico e Impacto Ambiental de ese Instituto no consideró necesario la presentación de un Informe Preventivo o MIA adicional para esta obra.

CONDICIONANTE		RELATIVA A:	SITUACIÓN
No.	CARÁCTER		
1	Específico	Las características de las fuentes fijas y de los turbogeneradores.	Atendido (Mayo, 1998).
2	De solicitud	Presentar a la PROFEPA, por única ocasión, el inventario de emisiones a la atmósfera.	Se presentaron inventarios de 1995, 1996 y 1997 (Mayo, 1998).
3	De solicitud	Presentar un programa de "minimización de emisiones en compuestos con alto contenido de azufre".	Solicitud de modificación "Medidas de minimización de emisiones de ácido sulfhídrico" (Mayo, 1998).
4	Obligatorio	Remitir a la PROFEPA en el mes de febrero de cada año la Cédula de Operación Anual (COA).	Atendido. A la fecha se han emitido seis COA(s).
5	Obligatorio	Los equipos de control de la contaminación de emisiones que instale la empresa deben funcionar de acuerdo con la normativa aplicable.	Reconsiderado ya que no aplica (Mayo, 1998).
6	Obligatorio	La solicitud para actualizar la Licencia de Funcionamiento, cuando haya cambios que incrementen concentraciones de contaminantes en el ambiente.	Atendido cuando las unidades estuvieron generando 6 MW (Octubre y Diciembre, 2000).
7	Obligatorio	Sujetarse a todas las disposiciones de la LGEEPA, sus Reglamentos y NOM(s) vigentes relativas a las actividades de la CFE.	Atendido.
8	Obligatorio	Participar en los planes de contingencia que instrumenten las autoridades ambientales.	Atendido.
9	Informativo	La Licencia de Funcionamiento no ampara ni libera trámites que la CFE deba realizar en otras materias.	Atendido.

Notas: PROFEPA: Procuraduría Federal de Protección al Ambiente.

Tabla 4. Licencia de Funcionamiento No. 329, condicionantes y estado de cumplimiento

Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera

A partir del análisis de la información presentada por la CFE en su solicitud, la Subdelegación del Medio Ambiente de la Delegación Federal de Puebla, concede la Licencia de Funcionamiento para Fuentes Fijas de Jurisdicción Federal No. 329, sujeta a nueve condicionantes (Tabla 4).

Residuos Peligrosos

A partir de 1999 la Superintendencia General Los Humeros quedó registrada en la Subdelegación referida como empresa generadora de materiales impregnados de aceite gastado (estopas y trapos). El registro se supedita al cumplimiento de seis condicionantes (Tabla 5).

CONDICIONANTE		RELATIVA A:	SITUACIÓN
No.	CARÁCTER		
1	Obligatorio	Remitir reporte semestral de manejo de residuos peligrosos acompañado de sus respectivos manifiestos de entrega, transporte y recepción.	A la fecha se han entregado a la delegación once reportes.
2	Obligatorio	Registrar en una bitácora todos los movimientos relacionados con el manejo de residuos peligrosos.	Se registran y controlan por bitácora los residuos peligrosos que entran o salen del almacén.
3	Obligatorio	Utilizar el número de registro en los trámites subsecuentes.	Atendido.
4	Obligatorio	Notificar, con la debida anticipación, cualquier cambio, modificación o alteración, a fin de actualizar el registro.	Enterado.
5	Obligatorio	Dotar de equipos de seguridad y capacitar periódicamente al personal para que dé respuesta a contingencias internas.	Atendidos por el área de Seguridad, Higiene y Medio Ambiente de Trabajo.
6	Obligatorio	Implementar planes de medidas y acciones para controlar contingencias por fugas, derrames e incendios.	

Tabla 5: Registro como empresa generadora de residuos peligrosos, condicionantes y estado de cumplimiento

Aguas Nacionales y Derechos

La CNA otorga en abril de 2001 el Título de Concesión No. 10PUE100307/18FMGC01, para explotar, usar o aprovechar Aguas Nacionales del Subsuelo por un volumen de 6 473 649,00 m³/año, a través de 25 pozos geotérmicos. La asignación se restringe a la observancia de quince condiciones generales contenidas en el título y ocho establecidas en cada anexo, uno por cada pozo. Así mismo, la CNA había otorgado en 1998 el permiso para descargar 10,00 m³/día de aguas residuales de servicios a un pozo de absorción por un plazo de diez años, contados a partir de la fecha del permiso, que depende del cumplimiento de catorce condiciones generales contenidas en el Título y nueve específicas ordenadas en el anexo. La inscripción, en primera inmatriculación, de estos documentos se efectuó en el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la CNA en 2001 y en 1999, respectivamente.

Síntesis

A manera de recapitulación, las actividades que se relacionan con el cumplimiento de las condicionantes ambientales derivadas de las autorizaciones, permisos o licencias descritas, se han clasificado en dos grupos:

- Las relativas a la elaboración de informes que se requieren reportar a la autoridad (Tabla 6)

- Las referentes al seguimiento de programas (Tabla 7).

A excepción de los relacionados con la materia de impacto ambiental, la elaboración de los reportes se efectúa en los formatos establecidos por la autoridad competente, de ahí que la información presentada en los apartados siguientes se limite a este tema.

MATERIA	PERIODICIDAD	REPORTE
Impacto Ambiental	Anual	Programa de Restauración y Conservación de Suelos.
	Anual	Programa de Análisis Continuo Ambiental (Monitoreo de aire y agua).
Prevención y Control de la Contaminación a la Atmósfera	Anual	Cédula de Operación Anual.
	Anual	Inventario de Emisiones.
Residuos Peligrosos	Semestral	Manejo de residuos peligrosos acompañado de sus respectivos manifiestos de entrega, transporte y recepción.
Aguas Nacionales	Trimestral	Información sobre el volumen de aguas nacionales explotadas, usadas o aprovechadas.

Tabla 6. Informes que se requieren realizar y periodicidad con la que se deben reportar

MATERIA	PERIODICIDAD	INFORME
Impacto Ambiental	Anual	Programa de Medición de Ruido
	Anual	Programa Permanente de Mantenimiento de Caminos de Acceso.

Tabla 7. Informes que deben realizarse sin necesidad de reportar

3. Medidas de Prevención o Mitigación de Impactos Ambientales

Las actividades que se desarrollan en el campo relacionadas con esta materia forman parte de las medidas de prevención y mitigación propuestas o manifestadas en la MIA-G y ratificadas, como condicionantes, en la Resolución No. 448, ya mencionada.

Por tanto, siendo la MIA-G el origen de las medidas, conviene iniciar esta segunda parte describiendo el propio manifiesto. La MIA-G, se elaboró de acuerdo con el instructivo de la entonces SEDUE (1989b) y se conformó de 8 capítulos, 17 subcapítulos, 65 incisos y 4 anexos.

El Capítulo VI, Identificación de Impactos Ambientales, describe y fundamenta la Matriz de Impacto Ambiental (Leopold,1971), constituida por 36 acciones que se desarrollan durante las diferentes etapas del proyecto (columnas) y 59 componentes del ambiente (filas).

Para la evaluación de impactos se asignaron ocho categorías en un abanico de posibilidades que va desde la inexistencia del efecto adverso hasta su existencia de manera significativa y con la medida de mitigación detectada. Así, se identificaron a los componentes relacionados con la emisión del ruido, los desechos líquidos y gaseosos y, en menor medida, las afectaciones sobre flora y fauna, como los que reciben los impactos ambientales más significativos en la mayor parte de las actividades del proyecto.

Por tanto, las medidas de prevención y mitigación de los impactos ambientales identificados (Capítulo VII) fueron las siguientes:

- Contar con equipos de monitoreo de H₂S, para evaluar la dispersión natural de este gas en el aire.
- Reducir el nivel de ruido y eliminar el arrastre de humedad con el uso de silenciadores modificados.
- Conectar las descargas de las purgas de las unidades de generación y del agua separada de los pozos al sistema de inyección.
- Clasificar los residuos sólidos y disponerlos en los sitios permitidos por la autoridad municipal.
- Una vez concluida la construcción, se recuperarían, con obras de restauración, las áreas afectadas.
- Llevar a cabo análisis periódicos de suelos, vegetación y cuerpos de agua superficiales cercanos al área del proyecto.

MEDIDA / IMPACTO AL QUE SE DIRIGE	TIPO DE TÉCNICA	OBJETIVO
Programa de restauración / vegetación	Marco real y tres bolillo (Pastrana-Melchor, 1990)	Revegetar con plantas nativas, tanto arbóreas como arbustivas y herbáceas, producidas en el vivero de CFE, los sitios afectados por el desarrollo del proyecto y aquellos naturalmente desprovistos de vegetación, logrando inducir la sucesión vegetal.
Programa de conservación de suelos / suelos / erosión	Pastización. Siembra de semilla de pasto al voleo y colocación de pasto en rollo. Construcción de cuadrículas de madera y colocación de geomallas, ancladas en la superficie del suelo (Pastrana-Melchor, 1990).	Establecer una cubierta vegetal e inducir la propagación natural de especies nativas en taludes de pendiente elevada y en torno a las presas de enfriamiento y plataformas. Prevenir la erosión de taludes en orillas de caminos y plataformas.
Programa de análisis continuo ambiental (Monitoreo de aire y agua) / emisiones de H ₂ S y contaminación a cuerpos de agua	Análisis topográfico y observación directa. Adsorción química del ácido sulfhídrico, H ₂ S, en el sensor del equipo de medición. Medición directa de parámetros meteorológicos. Análisis estadístico.	Determinación del área de influencia por la descarga de gases. Medición de la concentración de H ₂ S en el aire, a nivel de terreno, y de parámetros meteorológicos. Determinación de los valores promedio. Estimación de la calidad del aire en cuanto a la concentración de H ₂ S.
	Muestreo (CFE, 1995d). Análisis químico cualitativo y cuantitativo por medición directa, determinación potenciométrica, titulación a la fenoltaleína, método Argentométrico, absorción atómica de flama y método turbidimétrico. (CFE, 1995c). Análisis geoquímico.	Muestreo y análisis fisicoquímico de las aguas de los aprovechamientos y manantiales que tienen relación con el sistema geotérmico. Caracterización fisicoquímica y geoquímica de las aguas. Estimación de la evolución química e influencia de las aguas reinyectadas.
Medición de ruido/ ruido	Norma Oficial Mexicana NOM-081-ECOL-1994	Establecer límites máximos permisibles de emisión de ruido de fuentes fijas y su método de medición.
Programa de conservación de flora y fauna / flora y fauna	Colecta de flora y observación directa. Consulta bibliográfica y con especialistas. Revisión de herbarios. Métodos tradicionales de identificación de fauna. Colectas de fauna.	Controlar, manejar y conservar la flora y fauna silvestres con algún estatus de conservación de acuerdo con la NOM-059-ECOL-2001.
Muestreo y caracterización de suelos y tejido foliar / suelo / erosión	Transectos, para diagnóstico de 0 a 30 cm. Cuadrantes para caracterizar mediante perfiles edafológicos. Toma de tejido foliar (Pastrana-Melchor y Casimiro-Espinosa, 1993). Análisis químico cualitativo y cuantitativo: colorimétrico, gravimétrico y absorción atómica.	Tomar muestras representativas. Determinar las concentraciones de los elementos contenidos en el suelo y el tejido foliar. Conocer el posible grado de perturbación causado por el desarrollo del proyecto.

Tabla 8. Medidas de prevención y mitigación de impactos ambientales

El impacto al que se dirige y el objetivo de la medida, así como las técnicas utilizadas en el desarrollo de las actividades relacionadas con el seguimiento de las mismas, se observa en la Tabla 8. Los resultados obtenidos se describen en los apartados subsecuentes.

Programa de Restauración y Conservación de Suelos (Reforestación)

Como resultado de los métodos vegetativos implantados se ha conseguido la rehabilitación de las áreas afectadas en las que ya se han establecido de manera natural varias especies de plantas, principalmente de vegetación secundaria. Los datos y resultados obtenidos del desarrollo del programa de reforestación desde 1989, es decir cuatro años antes de presentarse la MIA-G a la autoridad, son los siguientes.

Mediante la reforestación se plantan anualmente decenas de miles de árboles, y se ha alcanzado un porcentaje de sobrevivencia promedio de 60% y un máximo de 81% en 1996, hecho sin precedente en esta materia. Hasta 2002 se habían plantado 585 666 árboles en una superficie de 332,21 ha (CFE, 1996a, 2002). Asimismo, se han obtenido beneficios cualitativos adicionales como: a) adaptación y compatibilidad de los árboles reforestados, b) conservación y mantenimiento de la vegetación nativa, c) proliferación de la germinación natural de especies forestales, d) retención de hojarasca y materia orgánica, adecuada para la formación natural de suelo, e) la sucesión vegetal en áreas afectadas se ha acelerado, f) la cobertura vegetal ha disminuido la erosividad del suelo, y g) establecimiento de vegetación secundaria.

Programa de Restauración y Conservación de Suelos (Pastización)

De manera similar a la reforestación, hasta el año 2002 se habían restaurado por medio de esta técnica alrededor de 9,5 ha. Los frutos adicionales logrados han sido: a) inducción a la regeneración natural del bosque y sucesión vegetal de especies nativas en las áreas pastizadas, b) disminución de la erosión en caminos y taludes de plataformas, c) estabilización de cauces prematuros, d) reducción del acarreo de sedimentos hacia las partes bajas (erosión hídrica), e) incremento de la infiltración del agua de lluvia y de la humedad en el subsuelo, útil para el sustento vegetal, f) reducción del efecto visual negativo en cortes de caminos y plataformas de pozos geotérmicos, y g) creación de ambientes propicios para algunas especies de flora y fauna silvestres.

Programa de Análisis Continuo Ambiental (Monitoreo de Aire)

En el campo geotérmico de Los Humeros se desfogan hacia la atmósfera, junto con el vapor, gases incondensables a través de siete fuentes fijas correspondientes a las unidades de generación. Cinco de estas se ubican, considerando como referencia el poblado Los Humeros, dentro de un ángulo de 70° (azimut 325° y 35°) y los dos restantes se localizan dentro de un ángulo de 5° (azimut 140° y 145°). El H₂S representa el 8% de los gases emitidos, y es acarreado por las corrientes de aire presentes en el ambiente, ocasionando que la concentración dentro de la zona de influencia del proyecto sea menor a medida que se encuentra más distante de la fuente de emisión.

Aún cuando las concentraciones de H₂S en el aire ambiente registradas dentro del área de influencia son bajas como para causar problemas de salud, su fuerte y desagradable olor, propio de un ambiente geotérmico natural, obliga a medirlo continuamente. En virtud de ello y de acuerdo con el Término 3.12 de la Resolución No. 448, se marcó el área de influencia en cada una de las descargas con un radio vector de 2,5 km en un barrido de 360° y se formó un cuadrilátero con un área total de 50 km². Con el apoyo de la carta topográfica del campo, de fisiogramas (CFE, 1995a) y visualizando en maqueta la posible trayectoria de cada una de las plumas de vapor, al incidir sobre ellas vientos provenientes de diferentes puntos cardinales, se determinaron las áreas con mayor frecuencia de ocurrencia.

De este análisis se determinaron cuatro zonas con mayor probabilidad de monitorear la concentración del H_2S en el aire ambiente que fluye del campo hacia el área de influencia, durante todo el año. En una pequeña área de cada una de estas zonas se instalaron los equipos de medición continua de la concentración de H_2S en el aire, así como de parámetros meteorológicos (velocidad y dirección del viento, temperatura ambiente, presión barométrica, humedad relativa y precipitación pluvial).

Semanalmente, los equipos que están diseñados para operar automáticamente, se programan para realizar una medición cada 15 minutos durante las 24 horas del día y se les extrae la información almacenada.



El programa para procesar los datos de H_2S y de meteorología fue desarrollado ex profeso para esta actividad por Magaña-Echeverría (2000), y calcula la temperatura de bulbo húmedo y los valores promedio de cada uno de los parámetros referidos, presentando los resultados en tablas y gráficos. Las tablas y gráficos de los valores de la concentración promedio horaria y diaria, así como de la velocidad del viento se anexan al informe de cumplimiento de condicionantes (Término 3.13).

De acuerdo con los límites sugeridos para las concentraciones promedio horaria y diaria de H_2S en el aire ambiente en campos geotérmicos, de 0,05 ppm y 0,005 ppm, respectivamente (Rolfe, 1989), se estima que mientras el porcentaje anual de los valores que son ligeramente superiores a estos es mayor a uno pero menor a 5, los porcentajes de los datos que superan en uno y dos órdenes de magnitud son menores a la unidad (CFE, 1996a, 2001).

Los valores mayores en un orden de magnitud al base se localizan en el rango aproximado del umbral del olor (0,005 - 0,2 ppm) (CARB, 1985) y los que son mayores a dos órdenes corresponden al umbral del olor detectable, sin ser un olor desagradable (3 - 5 ppm) (EPA, 1978).

Programa de Análisis Continuo Ambiental (Monitoreo de Agua)

El agua separada de la mezcla agua-vapor que fluye del subsuelo a la superficie a través de los pozos productores, junto con el vapor que se condensa en el trayecto del pozo a la unidad de generación así como en la turbina, se inyectan al yacimiento a una profundidad entre 1546 y 2000 m (CFE, 1996b).

Con objeto de identificar cualquier cambio en la composición química de los aprovechamientos de agua subterránea, que pudiera ser consecuencia de la explotación del recurso y/o de la inyección de agua al yacimiento, desde el año de 1987, es decir cinco años antes de presentar la MIA-G, se han venido tomando

muestras de agua cada seis meses, de alrededor de 45 cuerpos (manantiales, norias, etc.) que se encuentran en un radio de 20 a 25 km del campo.

A cada una de las muestras se le determina: el potencial de hidrógeno (pH), la conductividad eléctrica, la alcalinidad total y la concentración de aniones y cationes que contiene el agua geotérmica como son: boro (B), bicarbonatos (HCO_3), sílice (SiO_2), sulfatos (SO_4), sodio (Na), potasio (K), litio (Li), rubidio (Rb), cesio (Cs), calcio (Ca), magnesio (Mg) y arsénico (As).

La base de datos de las concentraciones de iones en el agua de los manantiales muestreados, se va actualizando anualmente y se elaboran dos tipos de gráficos por manantial: en uno se muestra la concentración de los elementos minoritarios (cloruros, sodio, calcio y potasio) desde 1987 hasta la fecha y, en otro se visualiza la concentración de los elementos mayoritarios (bicarbonatos y sílice).

El análisis geoquímico y la determinación de la ubicación y origen de las aguas (periféricas, equilibradas, volcánicas o calentadas por vapor), se realiza mediante los diagramas triangulares de Piper.

A partir de los análisis químicos (variación de la concentración de iones y aniones respecto al tiempo y la ausencia de elementos propios del fluido geotérmico: B, As y Li) y geoquímicos, se ha comprobado que no existe la menor contaminación de las aguas inyectadas, sino que las aguas muestreadas son de origen meteórico que han tenido interacción con rocas de tipo volcánico a bajas temperaturas.

Medición de Niveles de Ruido

Anualmente, a partir de 1995 se miden niveles de ruido de acuerdo al procedimiento de la Norma Oficial Mexicana NOM-081-ECOL-1994, en el perímetro de cada una de las siete unidades de generación. En cada uno de los cinco puntos de cada una de las zonas críticas se efectúan 21 mediciones del nivel de ruido. Por lo tanto, considerando tres zonas críticas se realizan 525 mediciones de nivel de ruido tanto de fondo como el emitido por la fuente fija.

La determinación del “Nivel de Fuente Fija Corregido por Ruido de Fondo” para cada unidad, que es el objetivo del procedimiento, se obtiene del nivel equivalente de ruido emitido por la fuente fija y del nivel equivalente de ruido de fondo. El “Nivel de Fuente Fija Corregido por Ruido de Fondo” calculado, se compara con los límites máximos permitidos de la norma, que son 68 dB(a) en el día y 65 dB(a) en la noche para zonas urbanas (ya que para las rurales no se ha establecido límites). De resultar superior, se emiten las recomendaciones pertinentes, como pueden ser: corrección del diseño de silenciadores, modificación de las entradas del vapor a los separadores, cambio de aislantes y mantenimiento de silenciadores.

Con las tablas que contienen las mediciones registradas en campo, así como las generadas de los cálculos, las figuras que muestran las zonas críticas identificadas en cada una de las unidades de generación y las recomendaciones, se elabora el reporte anual (Tabla 7).

Prácticamente, en los ocho años que se ha monitoreado el nivel de ruido ambiental (en el perímetro de la plataforma de la unidad de generación) se han obtenido valores por debajo de los límites permitidos. En los casos específicos en que se han determinado niveles de 1 a 5 dB(a) superiores, se han corregido las causas atendiendo las recomendaciones reportadas. Por tanto, se ha venido cumpliendo con el Término 3.9 de la Resolución No. 448, que determina que se deberán respetar el límite permisible de emisión de ruido de 68 dB(a) durante las diferentes etapas del proyecto (Tovar-Aguado, 2000, 2001).

Diseño de Silenciadores

Al principio del desarrollo del campo se contaba con silenciadores cuyos niveles de emisión de ruido a un metro de la fuente estaban entre 100 y 130 dB(a). Después de un intenso trabajo de investigación y experimentación se logró en 1991 reducir estos niveles de 60 a 85 dB(A), dependiendo del tipo de silenciador y de las características del flujo (Mendoza-Rangel, 1994).

El diseño más eficiente de los silenciadores no sólo reduce el nivel de ruido sino también evita el arrastre de humedad y sales contenidas en el vapor geotérmico.

Programa de Conservación de Flora y Fauna

A partir de las observaciones directas y colectas de fauna realizadas en el campo, se obtuvo el listado florístico que consta de 132 especies, pertenecientes a 51 familias de las cuales las más representativas son: *gramineae*, *leguminosae*, *pinaceae*, *fagaceae*, *cupressaceae* y *compositae*.

Durante los recorridos de campo se detectaron afectaciones o cambios en las asociaciones vegetales, principalmente en el bosque de pino por la presencia de incendios y la tala o aprovechamiento forestal sin control. Asimismo se observaron alteraciones en el ambiente, tanto en sus componentes físicos como biológicos, originados principalmente por el establecimiento de poblaciones (Los Humeros y Maxtaloya), por las actividades productivas de sus pobladores, como la agricultura, la ganadería, el aprovechamiento forestal, además del desarrollo geotérmico en la zona, que de una u otra forma han afectado a la fauna, originando que ésta haya emigrado a zonas menos perturbadas de la región geotérmica.



Actualmente se cuenta también con el listado faunístico del campo, constituido por 122 especies distribuidas en áreas de bosque, malpaís y zacatonal y en las clases siguientes:

- Aves: 67 especies de 23 familias, 4 de estas incluidas en la NOM-059-ECOL-2001, pero ninguna en peligro de extinción.
- Mamíferos: 45 especies de 16 familias, 7 contempladas en la norma y solamente una, *Neotomodon alstoni* (ratón de los volcanes) en peligro de extinción.
- Reptiles: 10 especies de tres familias catalogadas de acuerdo con la norma en especie: rara (R), acertilios listados *Sceloporus grammicus*; endémica y rara (R) *Sceloporus megalepidurus*, *Barisia imbricata* y *Salvadora intermedia*, y endémica y amenazada (A) *Phrynosoma ocbiculare*, *Pituophis deppei* y *Thamnophis scalaris*.

Muestreo y Caracterización de Suelos

El diagnóstico del estado de los suelos en las áreas afectadas por el proyecto geotermoeléctrico, derivado de los muestreos y las determinaciones químicas realizadas en 1990 y posteriormente en 1994 y 1995, es el siguiente.

Los suelos muestreados denotan características físico químicas similares entre 1990 y 1994, lo que significa que durante el periodo estudiado no se presentaron condiciones que alteraran su desarrollo y que el agua de lluvia actuó favorablemente para restablecer las condiciones típicas de la región.

Estos suelos propician el desarrollo forestal por sus características como son:

- La textura, que corresponde a suelos franco-arenosos, lo que representa un valor de infiltración medio con retención de agua y nutrientes en sus primeros horizontes aún cuando la concentración de los iones solubles es baja.
- El contenido de materia orgánica, que los clasifica como suelos de pobres a insignificamente ricos.
- Suelos ligeramente ácidos, pH promedio de 4,8, acidez producto de la acumulación de materia orgánica.

Tejido Foliar

En cuanto al tejido foliar, aun cuando las concentraciones de boro (B), sodio (Na), potasio (K), cloruros (Cl), azufre total (S) y arsénico (As) de las muestras recolectadas en 1995 se incrementaron con respecto a las determinadas un año antes, los valores cayeron en los rangos de tolerancia normales (Chapman, 1966), lo que no representó riesgo alguno para el desarrollo de las plantas, en especial de las coníferas y de las latifoliadas, que son capaces de tolerar grandes concentraciones de iones debido al nivel metabólico y a los mecanismos de resistencia que presentan.

4. Conclusión

De acuerdo con los resultados presentados, se concluye que con las acciones ambientales desarrolladas se han logrado prevenir, mitigar y controlar efectivamente los impactos ambientales producidos por el desarrollo del proyecto geotermoeléctrico de Los Humeros.

Así mismo, se han generado diferentes actividades de protección y conservación ambiental que han contribuido a desarrollar nuevas técnicas que no producen impactos ambientales negativos.

Referencias

- CARB (1985). *The Perception of Hydrogen Sulphide Odor in Relation on Ambient Standard*. California Air Resources Board. CARB Contract A4.046-33. 9 pp.
- CFE (1992). *Manifestación de Impacto Ambiental para la Instalación de Unidades Generadoras de 5 MW de Capacidad en el Campo Geotérmico de Los Humeros, Puebla*. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Exploración y Desarrollo. Depto. de Protección Ambiental. Diciembre de 1992. 172 pp. Inédito.

- CFE (1994). Respuesta a la Información Adicional del Análisis de la Manifestación de Impacto Ambiental del Proyecto Geotermoeléctrico de Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Estudios. Depto. de Protección Ambiental. Febrero de 1994. 24 pp. Inédito.
- CFE (1995a). Respuesta a los Términos de la Resolución No. 448 del INE-SEDESOL, Proyecto Geotérmico de Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Estudios. Depto. de Protección Ambiental. Enero de 1995. 73 pp. Inédito.
- CFE (1995b). Programa de Manejo y Rescate de Flora y Fauna Silvestres en el Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Sugerencia de Estudios. Depto. de Protección Ambiental. 13 pp. Inédito.
- CFE (1995c). Análisis Físicoquímico y Bacteriológico de una Muestra de Agua. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Proyecto de Especificación Clave 10 100-07. Noviembre de 1995. Revisada por el Departamento de Normalización del LAPEM el 10 de junio de 1996. 28 pp. Inédito.
- CFE (1995d). Toma de Muestras de Agua. Gerencia de Estudios de Ingeniería Civil. Proyecto de Especificación Clave 10 100-08. Diciembre de 1995. Revisada por el Departamento de Normalización del LAPEM el 12 de junio de 1996. 12 pp. Inédito.
- CFE (1996a). Informe de Avance de los Programas Establecidos en los Términos de la Resolución No. 448 Emitida para el Proyecto Geotermoeléctrico Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Sugerencia de Estudios. Depto. de Protección Ambiental. Residencia Los Humeros. Enero de 1996. 39 pp. Inédito.
- CFE (1996b). Resumen Histórico de los Pozos de Los Humeros, Pue. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Sugerencia de Estudios. Depto. de Yacimientos. Informe OIY-HU-09-96. Mayo de 1996. 22 pág. Inédito.
- CFE (2001). Reporte de avance de los términos 3,7 y 3,12 de la resolución No. 448. GPG, Sugerencia de Estudios, Departamento de Protección Ambiental y Residencia Los Humeros. Inédito.
- CFE (2002). Reporte de avance de cumplimiento de condicionantes 3,7 y 3,17 de la Resolución No. 448, correspondiente al 2001. GPG, Sugerencia de Estudios, Departamento de Protección Ambiental y Residencia Los Humeros. Inédito.
- Chapman, H.D. (1966). *Diagnostic Criteria for Plants and Soils*. Department of Soils and Plant Nutrition, University of California, Citrus Research Center and Agricultural Experimental Station, Riverside. Vol. II and III.
- EPA (1978). *Hydrogen Sulfide*. Environmental Protection Agency of United States. EPA-600/1-78-018. February 1978. Environmental Health Effects Research Series, PB 278 576. 272 pp.
- Leopold, L.B. (1971). *A Procedure for Evaluating Environmental Impact*. US Geological Survey, Circular 645.
- Magaña-Echeverría, N. (2000). Sistema PRODAACSULMET. Programa para procesar datos de ácido sulfhídrico y de meteorología. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Subgerencia de Estudios. Departamento de Protección Ambiental. Octubre del 2000. Inédito.

- Mendoza-Rangel, E. (1994). Catálogo de Silenciadores Modificados para Mejorar su Eficiencia. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Depto. de Protección Ambiental. Julio de 1994. 52 pp. Inédito.
- Pastrana-Melchor, E. (1990). Actividades de Restauración y Rehabilitación Ecológica del Campo Geotermoeléctrico Los Humeros. Área de Protección Ambiental. Diciembre de 1990. 34 pp. Inédito.
- Pastrana-Melchor, E. y J.G. Casimiro-Espinoza (1993). Evaluación de Áreas Afectadas en Proyectos Geotermoeléctricos, Mediante el Muestreo de Suelos y Tejido Foliar. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Depto. de Protección Ambiental. Inédito.
- Rolfe, K. A. (1989). Air Pollutants Associated with Geothermal Energy. *II World Congress on Air Quality*. Paris, May 1989. Required Air Pollution Control Officer, Department of Health, Auckland, NZ. 27 pp.
- SEDESOL (1994). Resolución No. 448. Dirección General de Normatividad Ambiental. Instituto de Ecología. Oficio No. A.O.O.DGNA-009404. 3 de octubre de 1994. 8 pág. Inédito.
- SEDUE (1989a). Acuerdo por el que se establecen los criterios ecológicos CEOESE004/89, para la selección, exploración y preparación de sitios destinados a la instalación de sistemas geotérmicos, así como para la construcción de los mismos. *Diario Oficial de la Federación*. 7 de Junio de 1989.
- SEDUE (1989b). Instructivo para desarrollar y presentar la Manifestación de Impacto Ambiental en la Modalidad General al que refieren los Artículos 9º. y 10º. del Reglamento de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente en Materia de Impacto Ambiental. *Gaceta Ecológica*, Vol. I, No. 3. Septiembre de 1989.
- Tovar-Aguado, R. (2000). Medición de ruido realizada en las unidades del campo geotérmico Los Humeros, Pue. Informe No. RM-HU-001/00. Julio de 2000. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Residencia de Estudios. Inédito.
- Tovar-Aguado, R. (2001). Reporte de la medición de ruido en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue. 17 de septiembre de 2001. Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Residencia de Estudios. Inédito.

Respuesta a la explotación (1982-2003) del yacimiento geotérmico de Los Azufres, Mich. (México). Parte II: Zona Sur

¹Víctor Manuel Arellano G., ²Marco Antonio Torres R., ¹Rosa María Barragán R.,
²Fernando Sandoval M.

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113,
Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, vag@iie.org.mx

²Comisión Federal de Electricidad, Residencia Los Azufres,
Campamento Agua Fría, Los Azufres, Michoacán.

Resumen

En este trabajo se presenta un estudio sobre la evolución termodinámica de los fluidos de la zona sur del yacimiento de Los Azufres, como respuesta a la extracción e inyección de fluidos, desde el inicio de su explotación en 1982 hasta el año 2002. Las condiciones termodinámicas de los fluidos del yacimiento se estimaron mediante el simulador de flujo de fluidos y calor en pozos "WELFLO", a partir de datos de producción. Las condiciones termodinámicas iniciales de los fluidos de la zona sur, indicaron la existencia de líquido comprimido, dos fases con líquido dominante y dos fases con vapor dominante, dependiendo de la profundidad de los pozos. La respuesta inicial de la zona sur a la explotación consistió en una disminución de la presión y un aumento en la entalpía mientras que a más largo plazo se han observado los siguientes fenómenos: disminución de presión y gasto, ebullición, enfriamiento, producción de vapor y en algunos de los pozos afectados por el proceso de inyección un aumento en la presión y en la tasa de producción. Los resultados isotópicos de los fluidos de pozos de la zona sur indicaron la ocurrencia de dos procesos: el primero, de pendiente positiva, indica mezcla entre fluidos del yacimiento y fluidos de reinyección y afecta principalmente a los pozos Az-2, Az-16, Az-33, Az-36 y Az-46; y el segundo, de pendiente negativa, resulta del proceso original de separación de vapor y condensación parcial en el yacimiento.

Palabras clave: Los Azufres, condiciones termodinámicas de fluidos, datos químicos y de producción, ingeniería de yacimientos, explotación de yacimientos.

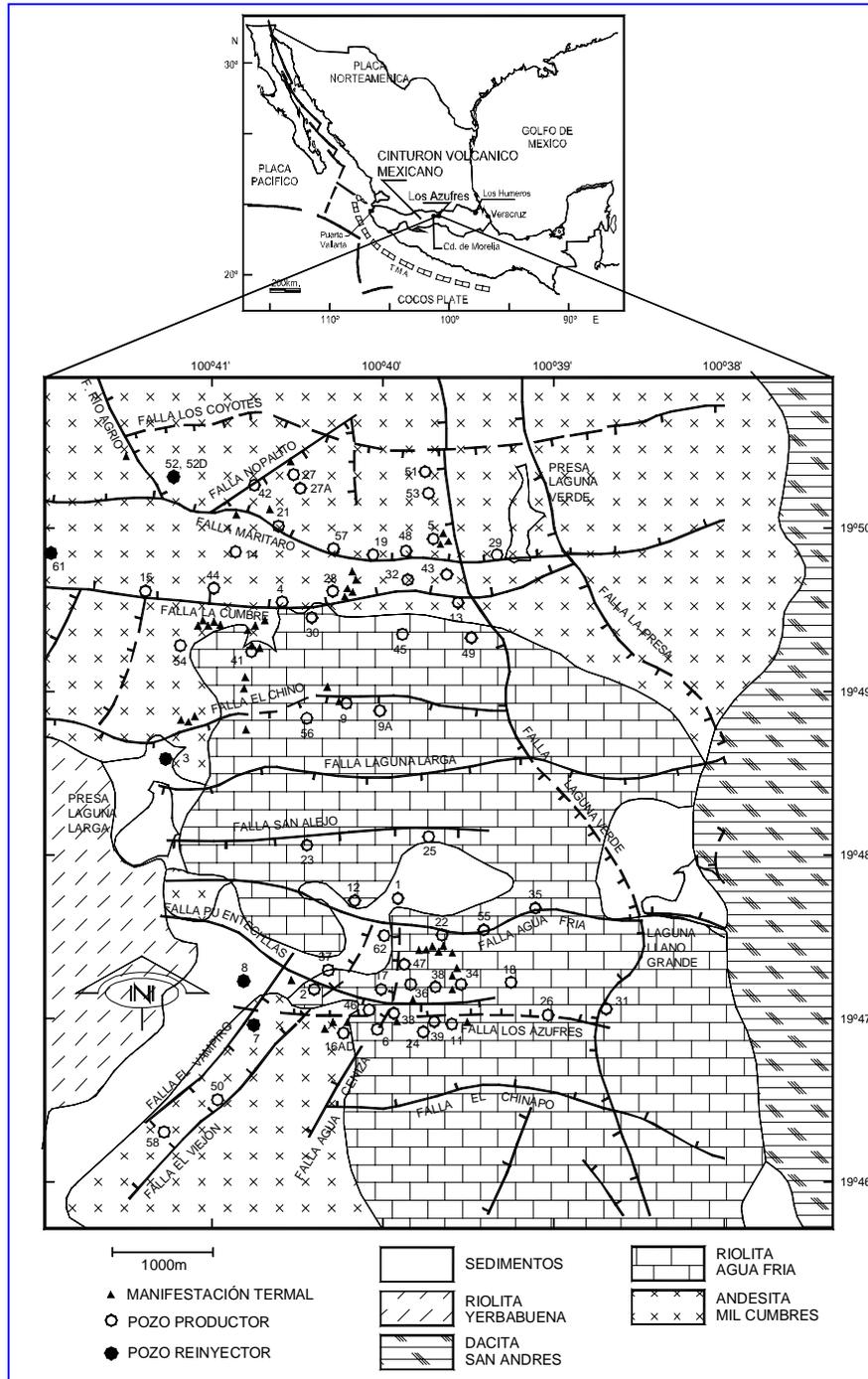
Response to exploitation (1982-2002) of the Los Azufres, Mich. (Mexico) geothermal field. Part II: South Zone

Abstract

The paper describes the thermodynamic evolution of fluids in the Los Azufres geothermal field's southern-zone reservoir, as a response to exploitation from 1982 to 2002. Thermodynamic conditions for the reservoir fluids were estimated with production data using the WELFLO heat- and-flow well simulator. In the southern zone, initial fluid thermodynamic conditions indicated that compressed liquid, two-phase fluids and vapor occurred in the reservoir, depending on the well depths. The first response to exploitation consisted in a pressure drop and an enthalpy increase. For the long term, the following patterns have been identified: pressure and mass flow-rate drop, boiling, cooling, vapor production and—in some wells affected by injection—an increase in both pressure and mass flow rate. The isotopic results of well fluids in the southern zone showed the occurrence of two processes. The first, with a positive slope, indicates a mixing of reservoir and injection fluids and mainly affects wells Az-2, Az-16, Az-33, Az-36 and Az-46. The second, with a negative slope, results from the original processes of reservoir steam separation and partial condensation.

Keywords: Los Azufres; thermodynamic conditions of fluids; chemical, isotopic and production well data; reservoir engineering; reservoir exploitation.

1. Introducción



El campo geotérmico de Los Azufres se localiza aproximadamente a 90 km de la ciudad de Morelia, en el estado de Michoacán, México (Figura 1). El campo se encuentra en la Sierra de Los Azufres, la cual alcanza elevaciones que exceden los 3200 msnm. Las elevaciones de los cabezales de los pozos perforados varían aproximadamente entre 2750 msnm y más de 3000 msnm. Los valles vecinos están varios centenares de metros por debajo de la elevación promedio del campo. En el campo se distinguen dos zonas bien definidas de descarga de fluidos geotérmicos: Marítaro en la parte norte del campo, y Tejamaniles en el extremo sur. Las zonas de descarga mencionadas se encuentran separadas por varios kilómetros de terreno que esencialmente no contiene manifestaciones superficiales (Figura 1). Hasta el año 2002, el campo contaba con una capacidad instalada de 88 MWe (Torres y Flores, 2000; Quijano y Gutiérrez, 2000) y se encontraban en construcción cuatro unidades de 25 MWe cada una. Estas unidades entraron en operación en el año 2003.

En este trabajo se presentan los resultados de estudiar la respuesta de la zona norte del yacimiento a las políticas de explotación (1980-2002), a partir del análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de 13 pozos del campo localizados en esta zona (Az-2, Az-17, Az-18, Az-22, Az-25, Az-26, Az-33, Az-34, Az-35, Az-36, Az-37, Az-38 y Az-46).

Figura 1. Localización del campo geotérmico de Los Azufres, geología de la zona y ubicación de los pozos.

Los objetivos del análisis fueron: (a) identificar los principales procesos que han ocurrido y que están ocurriendo en el yacimiento de Los Azufres, como consecuencia de la extracción de fluidos y calor y de la inyección de fluidos de desecho en el mismo, y (b) relacionar dichos efectos con sus probables causas.

Las características geológicas de la zona, el estado inicial del yacimiento de Los Azufres, detalles del yacimiento en producción así como la producción e inyección de fluidos, se describieron en la parte I de este trabajo (Arellano *et al.*, 2004).

2. Metodología

Con el fin de identificar los principales procesos que han ocurrido y que están ocurriendo en el yacimiento de Los Azufres, como consecuencia de la extracción de fluidos y calor y de la inyección de fluidos de desecho, se empleó la siguiente metodología propuesta por Arellano *et al.*, (2003): se efectuó el análisis individual de los datos químicos, isotópicos y de producción de 13 pozos. En particular, se estudió la evolución de:

- a) La presión, entalpía y temperatura estimadas a fondo de pozo, y el gasto.
- b) La entalpía de la descarga (H_{DES}) comparada con las entalpías de líquido correspondientes a las temperaturas calculadas con un geotermómetro de cationes (H_{CCG} , Nieva y Nieva, 1987) y con un geotermómetro de sílice (H_{SIL} , Fournier y Potter, 1982).
- c) Los cloruros en la descarga total y el agua separada.
- d) Los isótopos $\delta^{18}O$ y δD .

La presión, entalpía y temperatura a fondo de pozo se estimaron por medio del simulador de pozo WELFLO (Goyal *et al.*, 1980). WELFLO es un simulador de pozos geotérmicos en diferencias finitas, que considera flujo multifásico, unidimensional y en estado estacionario, útil en la simulación de pozos verticales de diámetro variable. Este modelo ha sido ampliamente validado contra datos de campo (Goyal *et al.*, 1980). Los datos que se le alimentaron a WELFLO son la geometría del pozo (longitud, diámetros, etc.), el flujo másico, la presión y la entalpía de cabezal.

3. Resultados: Zona Sur del Campo

En el estado inicial (Figura 2), los pozos de la zona sur se encuentran tanto en la zona de líquido comprimido (Az-1, Az-7, Az-8, Az-23 y Az-25), como en las zonas de dos fases líquido dominante (Az-18, Az-31 y Az-36) y dos fases vapor dominante (Az-17, Az-33, Az-34, Az-35 y Az-38). La respuesta inicial de la mayor parte de los pozos de esta zona del campo consiste en una disminución de la presión y un incremento de entalpía. La respuesta a la explotación de largo plazo es mucho más compleja ya que se observan cambios como disminución de presión y gasto, ebullición, enfriamiento, producción de vapor y en algunos casos se observan incrementos en la presión y en las tasas de producción.

Como puede apreciarse, en la zona sur los efectos de la reinyección son muy importantes y son los que rigen el comportamiento de muchos de los pozos. En la Figura 3 se muestra el comportamiento de los pozos Az-2, Az-34 y Az-37 en un diagrama presión entalpía, y como puede verse estos pozos muestran algún incremento de presión y disminución de la entalpía por efecto de la interferencia de los fluidos de reinyección.

Entre los pozos que reciben algo del fluido inyectado se encuentran: Az-6, Az-17, Az-22, Az-36 y Az-38. En los últimos años estos pozos muestran pequeños cambios en su presión y entalpía.

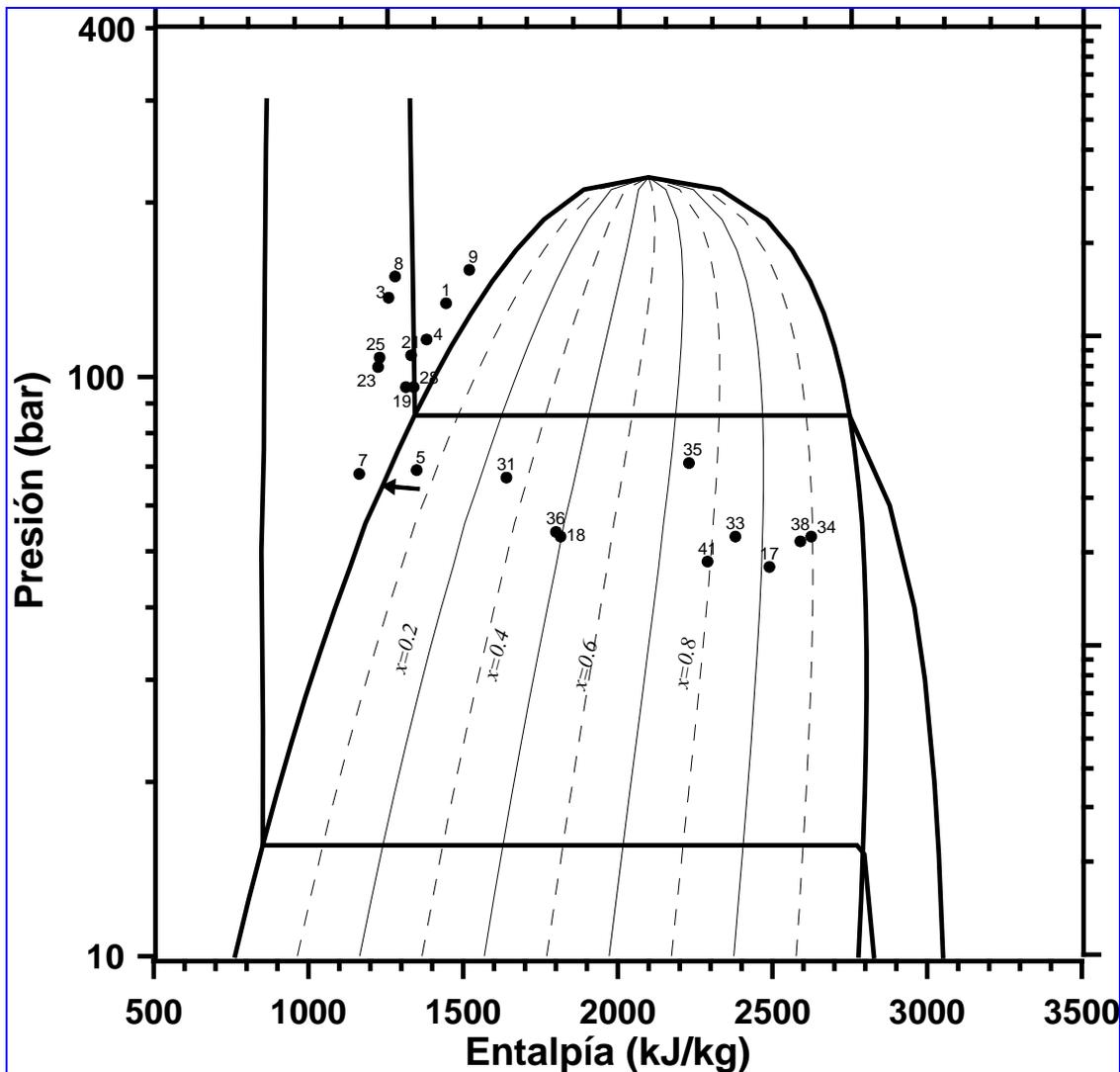


Figura 2.
Diagrama
presión-entalpía
que muestra las
condiciones
termodinámicas
no perturbadas
de los pozos.

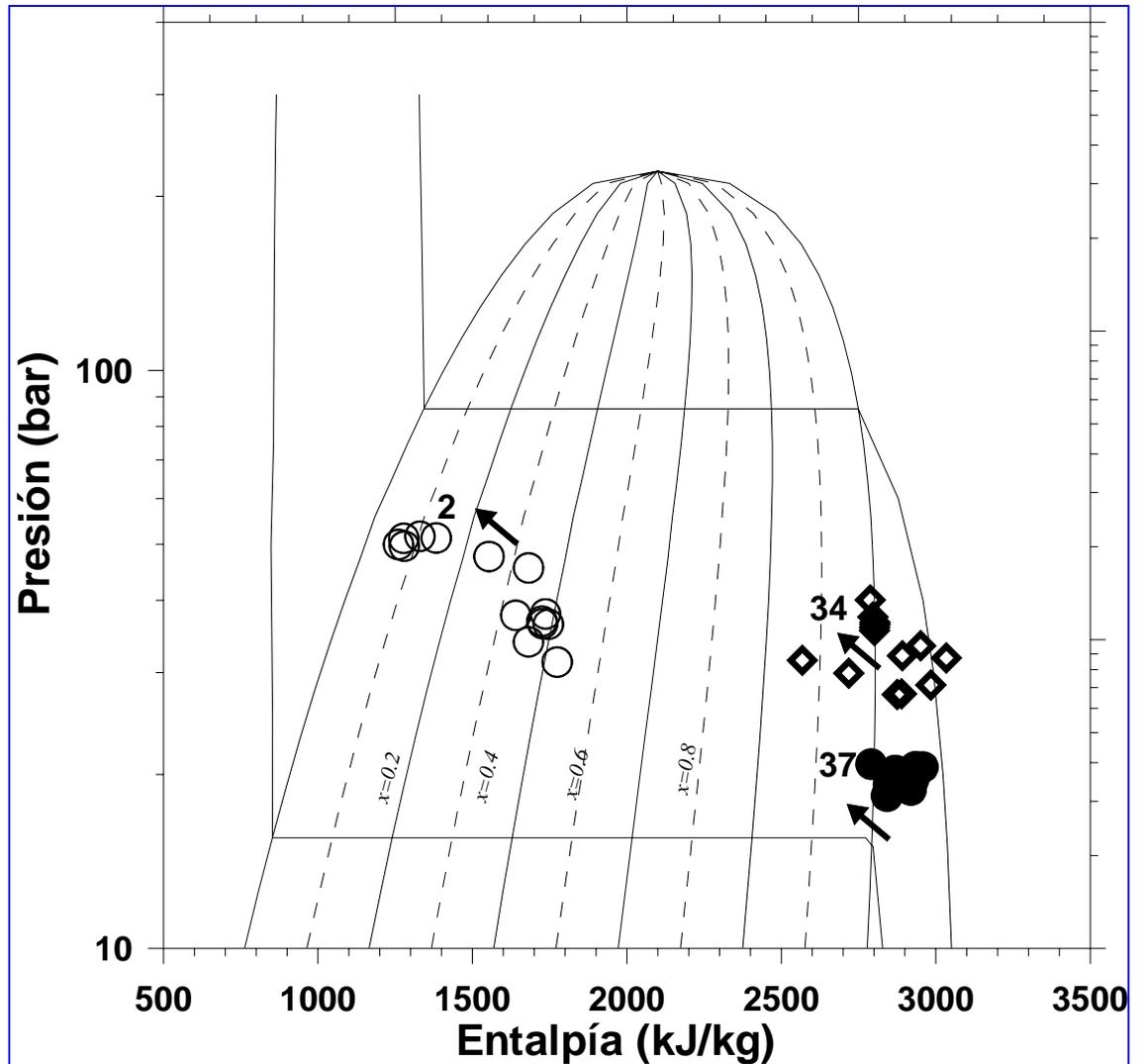
De los pozos estudiados en esta zona del campo, el Az-25 y el Az-26 no parecen recibir fluidos de inyección y desarrollan un proceso de ebullición local (Figura 4). Estos pozos no logran mantener su gasto, la presión a fondo de pozo disminuye y la entalpía se incrementa. De mantenerse esta situación es muy probable que las condiciones a fondo de pozo evolucionen a dos fases vapor dominante y tal vez a vapor sobrecalentado.

Finalmente, en el pozo Az-18 se presenta un proceso de ebullición muy importante.

Los pozos Az-18, Az-25 y Az-26 no parecen estar conectados de manera importante a la red de fracturas que conducen los fluidos de inyección.

En la Figura 5 (Barragán *et al.*, 2003) se muestran los valores isotópicos (δD vs $\delta^{18} O$) de los pozos estudiados de la zona sur. En la figura se observa una línea de pendiente positiva que indica la mezcla de fluidos reinyectados y fluidos del yacimiento. Los pozos que presentan un importante efecto de interferencia son: Az-2, Az-33, Az-34, Az-37 y Az-46. La tendencia negativa se debe al fenómeno convectivo de separación de vapor en el yacimiento con condensación parcial, hallado en el estado inicial (Nieva *et al.*, 1987).

Fig. 3. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas de fondo de los pozos Az-2, Az-34 y Az-37. Las flechas indican aumento de la presión y disminución de la entalpía en el tiempo.



4. Conclusiones

El análisis de los datos químicos, isotópicos y de producción de 13 pozos del campo localizados en la zona sur permitió la identificación de los principales procesos que están ocurriendo en el yacimiento como resultado de las políticas de explotación.

La respuesta a la explotación de la zona sur es compleja, ya que se observan cambios como disminución de presión y gasto, ebullición, enfriamiento, producción de vapor y en algunos casos se observan incrementos en la presión y en las tasas de producción.

En la zona sur, los efectos de la reinyección son los que rigen el comportamiento de muchos de los pozos. De los pozos estudiados los que presentan una importante interferencia de fluidos de inyección son: Az-2, Az-33, Az-34, Az-37 y Az-46.

Aún cuando la inyección de fluidos en la zona sur afecta una cantidad importante de pozos, existen pozos como el Az-18, Az-25 y Az-26 que se encuentran alejados de los pozos inyectoros y que no parecen estar

conectados de manera importante a la red de fracturas que conducen los fluidos de inyección. Por ello desarrollan procesos de ebullición locales o generalizados.

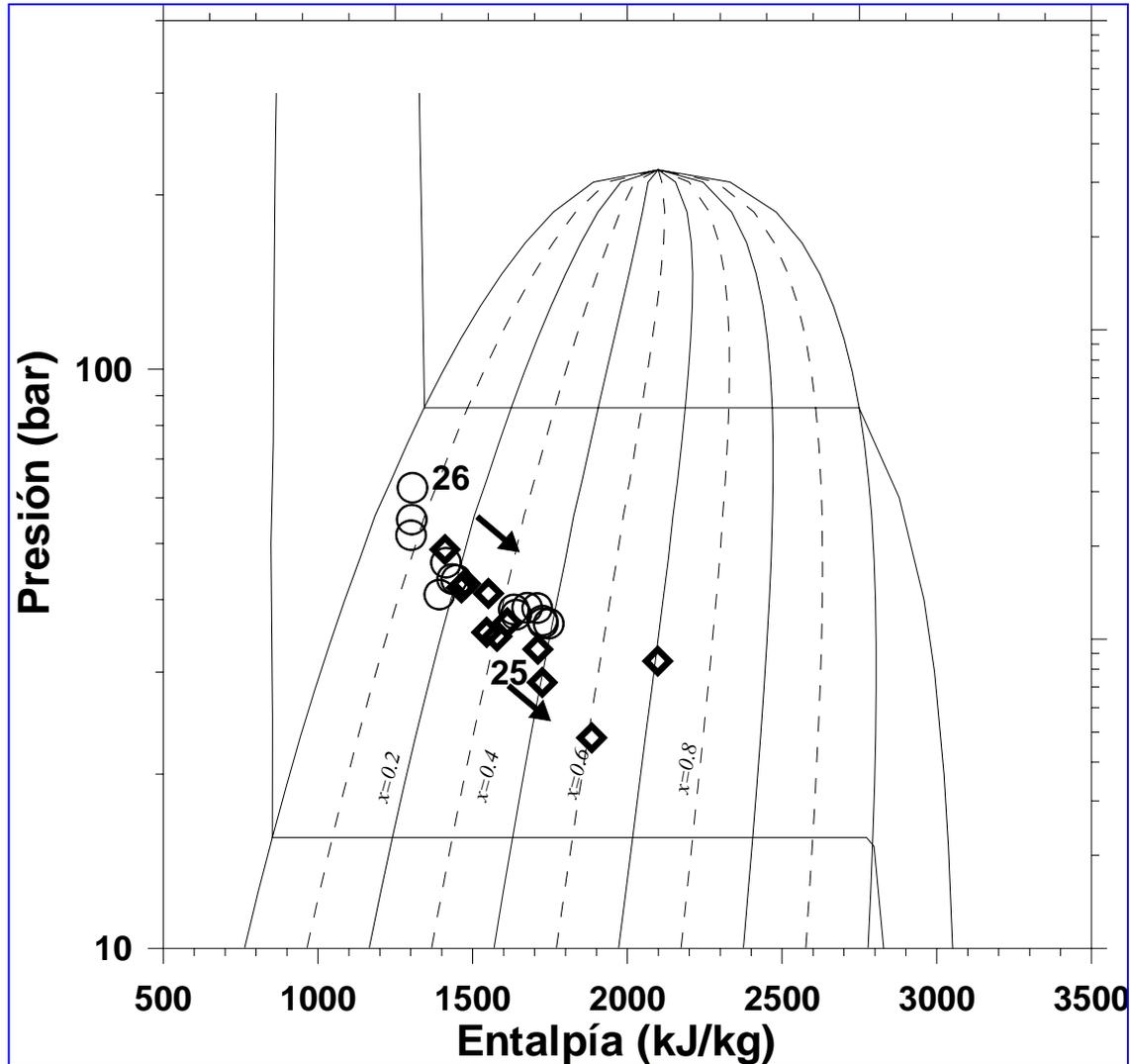


Fig. 4. Diagrama presión-entalpía que muestra las condiciones termodinámicas de fondo de los pozos Az-25 y Az-26. Las flechas indican disminución de la presión y aumento de la entalpía en el tiempo.

Agradecimientos

Los resultados que se presentan en este artículo forman parte del proyecto “Estudio Isotópico de Fluidos de Pozos Productores y de Reinyección del Campo Geotérmico de Los Azufres, Michoacán”, el cual forma parte de los trabajos que lleva a cabo la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE en los campos y zonas geotérmicas de México. Los autores desean expresar su agradecimiento a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, por apoyar la publicación de este trabajo.

Referencias

Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, F. Sandoval, R. Lozada (2003). Chemical, isotopic and production well data analysis for the Los Azufres (Mexico) geothermal field. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 27, pp. 275-279.

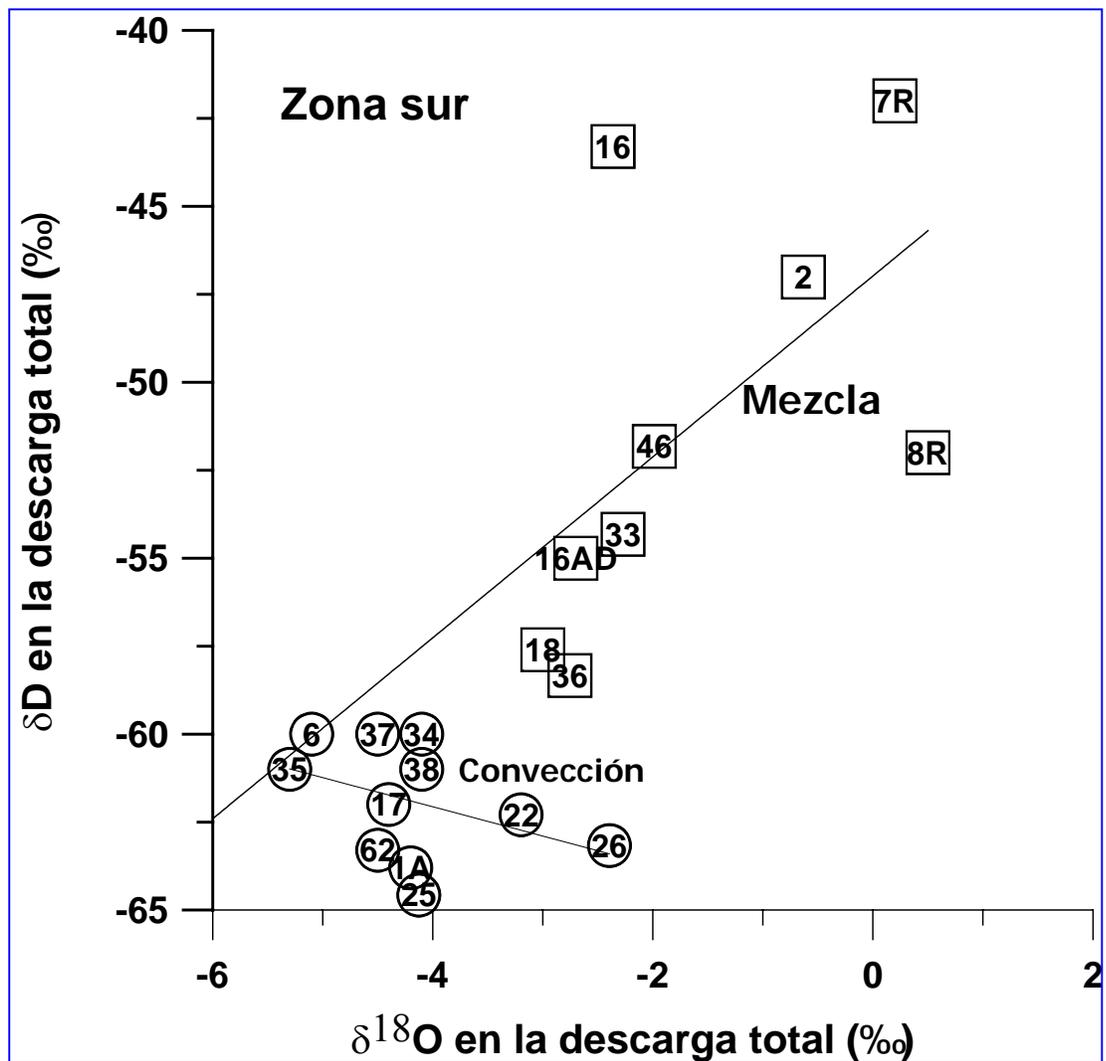


Fig. 5. δD vs $\delta^{18}O$
O de los pozos
de la zona sur del
campo.

- Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, F. Sandoval (2004). Respuesta a la explotación (1982-2002) del yacimiento geotérmico de Los Azufres Mich., (México). Parte I: Zona norte. *Geotermia Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 16 (1), pp. 11-21.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, R. González, J. Hernández, J. Martínez (2003). Chemical and isotopic ($\delta^{18}O$, δD) behavior of the Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to exploitation. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 27, pp. 281-285.
- Fournier, R.O., R.W. Potter II (1982). A revised and expanded silica (Quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*, 3-12.
- Goyal, K.P., C.W. Miller, M.J. Lippmann (1980). Effects of measured wellhead parameters and well scaling on the computed down-hole conditions in Cerro Prieto wells. *Proc. 6th Workshop Geothermal Reservoir Engineering*, SGP-TR-50, pp. 130-138.
- Nieva, D., R. Nieva (1987). Developments in Geothermal Energy in Mexico - Part Twelve. "A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources". *Heat Recovery Systems & CHP*, Vol. 7, No. 3, pp. 243-258.

- Nieva, D., M. Verma, E. Santoyo, R.M. Barragán, E. Portugal, J. Ortiz, J.L. Quijano (1987). Chemical and isotopic evidence of steam up-flow and partial condensation in Los Azufres reservoir. *Proc. 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, pp. 253-259.
- Quijano-León, J.L., L.C.A. Gutiérrez-Negrín (2000). Geothermal production and development plans in Mexico. *Proc. World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 355-361.
- Torres, M.A., M. Flores (2000). Reservoir behavior of the Los Azufres geothermal field, after 16 years of exploitation. *Proc. World Geothermal Congress 2000*, Kyushu-Tohoku, Japan, pp. 2269-2275.

Riesgos geomorfológicos e hidrológicos en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México

Eleazar Arreygue Rocha^{1,2}, Víctor Hugo Garduño Monroy¹, Paolo Canuti², Nicola Casagli², y Alberto Iotti²

¹ Depto. de Geología y Mineralogía, IIM, UMSNH (++52-443-316-8355), Morelia, Mich., México.

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Firenze, Italia.

arrocha@zeus.umich.mx

Resumen

La población de la Ciudad de Morelia se ha triplicado en los últimos veinte años. Esto ha incrementado sustancialmente los riesgos geomorfológicos (deslizamientos de masas de tierra y bloques) e hidrológicos (inundación de zonas habitacionales), entre otros. Se analizan y actualizan estos riesgos en dos de los principales elementos identificados en la ciudad que son el llamado escarpe La Paloma y el Río Chiquito, describiendo sus características y los factores que los vuelven elementos de peligro para las zonas habitacionales ubicadas en su cercanía.

Palabras Clave: Geomorfología, hidrología, zonas de riesgo, Morelia, deslizamientos de tierra.

Geomorphologic and hydrologic risks in Morelia City, Michoacán, Mexico

Abstract

The population of the City of Morelia has increased threefold in the last 20 years. The growth has increased the geomorphologic risks (landslides of mass and blocks) and hydrologic risks (flooding in residential zones). We analyze and update these risks for two major areas of the city: the so-called slope of La Paloma and the Chiquito River. We describe the characteristics of these zones, including risk factors for the residential zones surrounding them.

Keywords: Geomorphology, hydrology, risk zones, Morelia, landslides.

1. Introducción

La realidad económica y social de un país en vías de desarrollo, como México, se refleja, entre otros aspectos, en la expansión indiscriminada de los centros urbanos o industriales y, en consecuencia, en las condiciones de riesgo hidrológico y geomorfológico a que se exponen por la falta de conocimiento de los peligros de tipo estructural, geológicos y geohidrológicos a que están expuestos.

Las dificultades de una correcta administración del territorio en México, nacen de la falta de conocimiento de los riesgos mencionados, por la ausencia de estudios del terreno antes de ser utilizados. Contribuye también la inexacta o nula valoración de la problemática actual en las zonas habitacionales expuestas a estos tipos de riesgos.

Es indispensable la realización de un plan urbano que tome muy en cuenta el equilibrio hidrogeológico del área, que debe estar en posibilidad de unir la aptitud de un terreno con su destino efectivo de uso del suelo. Un plan adecuado de expansión urbana tiene como base el conocimiento profundo del territorio, desde un punto de vista geológico, geomorfológico e hidrológico, gracias a una serie de estudios indispensables para conocer las condiciones de la zona a utilizar.

En este trabajo se describen los elementos de riesgo geomorfológico e hidrológico en la Ciudad de Morelia, enfatizándose los casos del escarpe La Paloma y el Río Chiquito, con el objetivo de ofrecer un panorama real de la problemática que ha venido enfrentando la ciudad en la últimas dos décadas, en las que ha experimentado un crecimiento poblacional vertiginoso.

La Ciudad de Morelia y su municipio se encuentran localizados al norte-oeste del Estado de Michoacán (Fig. 1), a los 19° 42' de latitud norte y 101° 11' de longitud oeste, con una altura promedio de 1941 msnm. El municipio cubre una superficie de 1308 km², con una extensión de la planicie de 25 km de oriente a poniente y de 15 km de norte a sur. Rodeando a la ciudad se encuentran los volcanes de Atécuaro y Punhuato, de edad Mioceno-Plioceno, y los volcanes Quinceo-Las Tetillas y El Águila, de edad cuaternaria. Estos últimos forman parte del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM).



Fig. 1. Localización de la Ciudad de Morelia, Mich.

2. Crecimiento urbano en Morelia

La Ciudad de Morelia tiene un origen colonial. Fue fundada el 18 de mayo de 1541 (Ruiz, 1992). Las primeras construcciones fueron hechas en la parte más alta del valle entonces conocido como Valle de Guayangareo, donde podían estar resguardadas de los periódicos desbordamientos de los ríos Grande, Chiquito y La Hoya, que cruzan la planicie en diferentes puntos.

En 1898 la extensión de la ciudad era todavía comparable con la de la época colonial y Morelia cubría un área de aproximadamente 287 hectáreas. El desarrollo de la ciudad mantuvo sus valores modestos hasta

casi 1980, cuando la superficie ocupada era de unas 1900 hectáreas y la población de unos 300 mil habitantes. A partir de 1983 la ciudad ha sufrido un rápido incremento en su expansión urbana, acelerada aún más por los terremotos de la Ciudad de México de septiembre de 1985 que provocaron un fuerte flujo migratorio hacia Morelia (Vargas, 1994), y así la población actual rebasa el millón de habitantes (Fig. 2). Esta situación propició una expansión urbana sobre tierras de agostadero y bosques (López-Granados, 1999).

En la Figura 3 se representa la evolución en el tiempo del desarrollo urbano de Morelia, y se marcan los principales elementos geomorfológicos presentes en el área. Las áreas edificadas actuales y las obras civiles han invadido ampliamente zonas caracterizadas, en estudios previos, como de fuerte riesgo hidrológico (Arreygue *et al.*, 1998, 1999, 2002).

En los últimos veinte años las construcciones han llegado a la base de la ladera conocida como La Paloma, que se ubica al sur de la ciudad (Fig. 3), caracterizada por un elevado grado de inestabilidad y que ha sido escenario de diversos deslizamientos en masa, tanto pequeños como grandes.

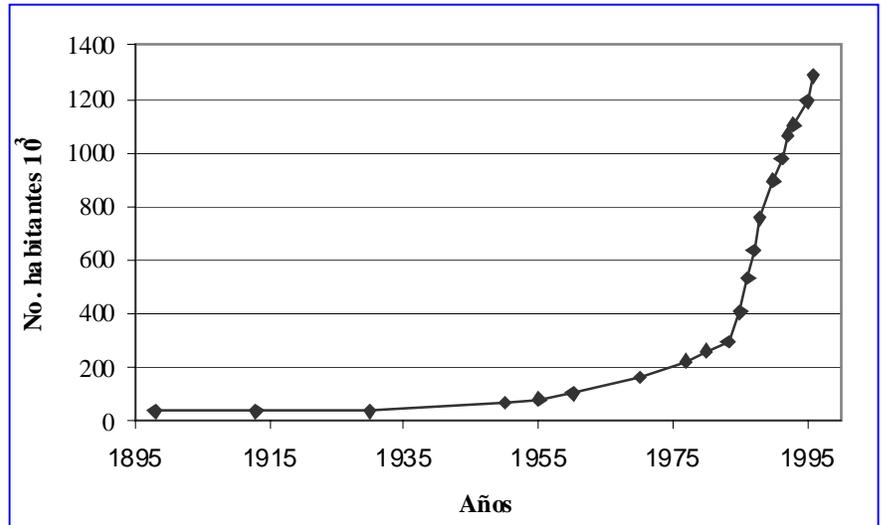


Fig. 2. Incremento de la población en Morelia

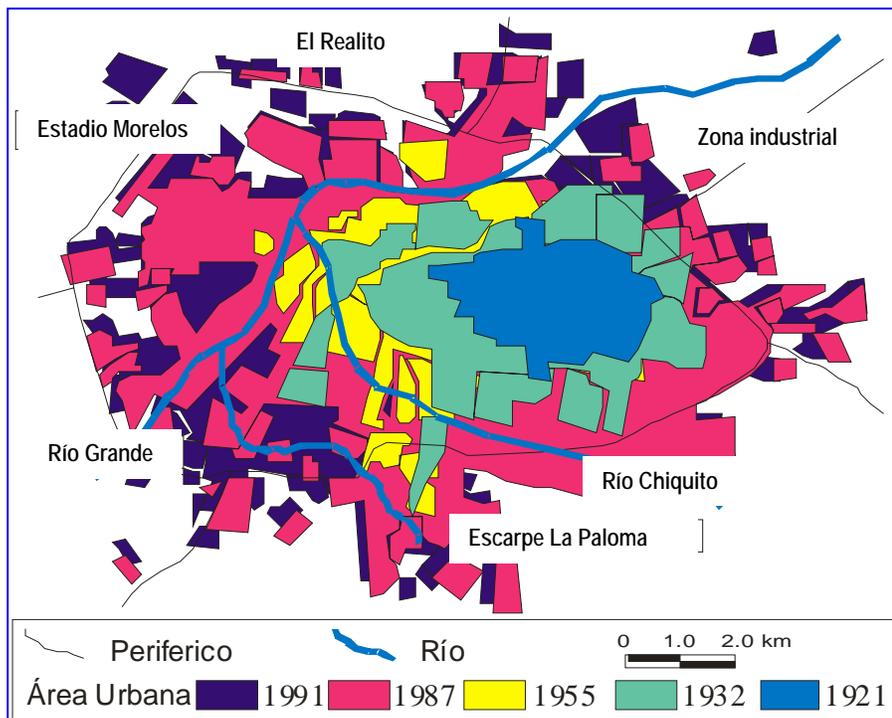


Fig. 3. Desarrollo urbano de la ciudad de Morelia de 1921 a 1991

3. Geología

Estratigrafía

Desde un punto de vista estratigráfico se pueden reconocer diferentes unidades litológicas (Fig. 4). Partiendo de la parte baja se encuentra una primera unidad de composición andesítica llamada Mil Cumbres que constituye el substrato más profundo del área. Estos materiales se encuentran aflorando en diferentes partes

de la ciudad, tienen una edad comprendida entre los 24 y los 8 Ma, (SARH, 1977; Pasquaré *et al.*, 1991) y su espesor supera los 800 m.

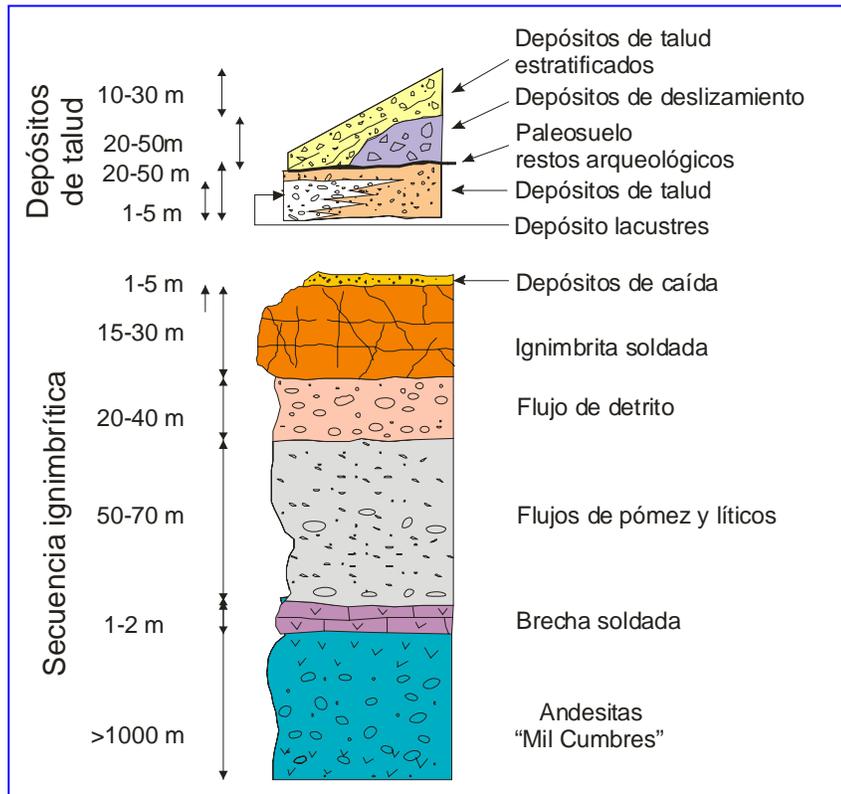


Fig. 4. Secuencia estratigráfica de la Ciudad de Morelia

de flujos riolíticos fracturados con espesor de 15 a 30 m. Todos estos paquetes de rocas piroclásticas y lavas son de composición riolítica y carácter calcoalcalino (Pasquaré *et al.*, 1991). Cierra la secuencia un depósito de cenizas de caída con un espesor variable de 1 a 5 m, que se ha denominado Alegría. Por su posición estratigráfica se ha considerado del Cuaternario (inferior a 500 mil años).

Sobreyaciendo a la Cantera de Morelia, se encuentran productos ligados a depósitos lacustres que en el área de Morelia tienen un espesor máximo de 50 m (Israde-Alcantara y Garduño-Monroy, 1999). Estos depósitos se pueden observar en el talud de La Paloma.

En el mismo escarpe de La Paloma, pero topográficamente más arriba, se encuentran depósitos de derrumbes separados de los anteriores por niveles de paleosuelos. En la parte más alta se encuentran brechas de talud estratificadas, con espesor de 2 a 4 metros.

Marco geológico-estructural

La Ciudad de Morelia forma parte del Cinturón Volcánico Mexicano. Como tal, es una zona geológicamente joven, caracterizada por la presencia de una fuerte actividad sísmica ligada a la presencia de numerosas fallas activas de dirección NE-SW y E-W con desarrollo e importancia regional. Pertenecen al sistema de fallas Acambay-Morelia. Las fallas activas NE-SW presentan procesos de deslizamiento (*creep-falla*) asociados con desplazamientos verticales que en 1996 fueron medidos en 6 cm/año (Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

Sobre las andesitas se encuentra una secuencia piroclástica con un espesor máximo de 200 m aproximadamente, llamada Cantera de Morelia, la cual fue depositada por una fase explosiva asociada a los centros volcánicos que rodean a la ciudad, de una edad inferior a los 15 Ma (Garduño-Monroy *et al.*, 1999). Esta secuencia aflora de manera aislada en toda la ciudad y de manera continua en el escarpe La Paloma. Está constituida por una secuencia piroclástica que se puede dividir en diferentes intervalos: en la base se encuentra una brecha consolidada por calor que representa el contacto con el substrato andesítico y el espesor de esta brecha, en los límites donde aflora, es de 1 a 2 metros. Más arriba se encuentra una ceniza de caída aérea de color blanco, poco cementada, con espesor de 50 a 70 m. Sigue un nivel de conglomerados y brechas volcánicas con espesor de 20 a 40 m. Arriba se encuentra un nivel continuo consolidado

La orientación de las estructuras con expresión morfológica es E-W. Sin embargo, se conocen también lineamientos menores de dirección N-S, entre los cuales está la estructura por la que corre el Río Chiquito.

4. Riesgo geomorfológico asociado al escarpe de La Paloma

El escarpe de La Paloma (Fig. 5) constituye uno de los elementos geomorfológicos principales de la ciudad de Morelia. Está situado en la parte sur de la ciudad y se extiende con dirección E-W. Su altura máxima es de aproximadamente 200 m. La parte oriental está constituida principalmente de material andesítico, mientras en la parte occidental se observan materiales piroclásticos.

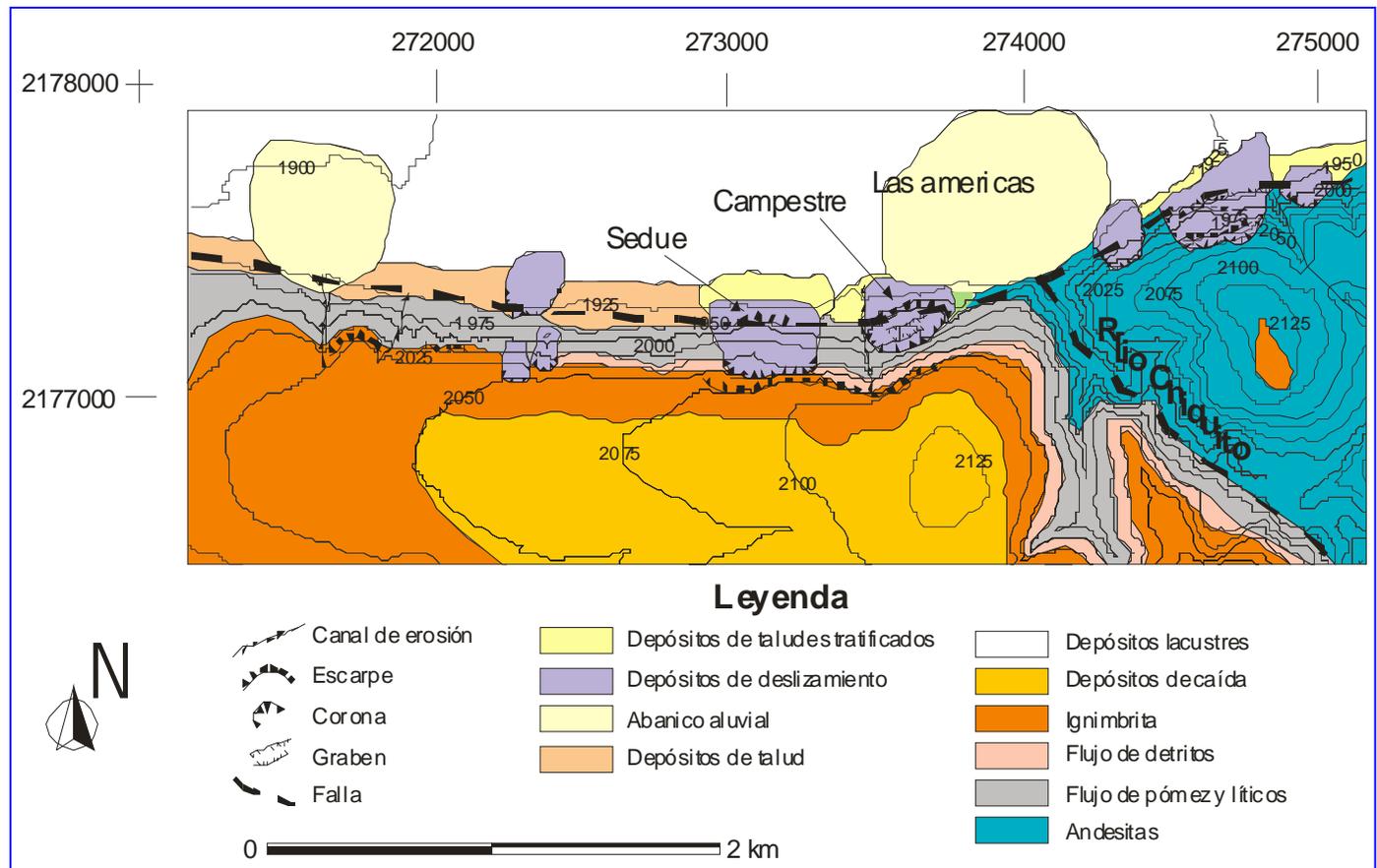


Fig. 5. Carta geológica del escarpe de La Paloma

Desde un punto de vista geológico-estructural el acantilado representa el flanco de un graben y, por lo tanto, corresponde a una falla normal con evidencias de actividad muy reciente (Arreygue-Rocha *et al.*, 1998, 1999, 2002; Garduño-Monroy, 2001).

La tipología de los movimientos observados es variada y está relacionada con las características litológicas de los materiales. Las dimensiones de los fenómenos que han ocurrido en el escarpe resultan extremadamente variables. En esta zona se pudieron reconocer fenómenos de deslizamientos roto-traslacionales (Varnes, 1978, 1984; Canuti y Casagli, 1994), tanto en la andesita como dentro de la secuencia piroclástica. Además, se detectaron en el mismo escarpe fenómenos de caída y volcamiento de bloques de rocas piroclásticas consolidadas. Varios bloques con volúmenes de 1 a 15 m³, que se han detenido a la mitad del talud y que son susceptibles de nuevos movimientos, están asociados con estos fenómenos. Estos bloques, debido a la

ausencia de obstáculos morfológicos en su trayectoria, pueden llegar a la zona habitada ubicada en la parte inferior del escarpe (Arreygue-Rocha *et al.*, 1998, 1999, 2002; Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

Deslizamientos en materiales piroclásticos

Existen fenómenos de deslizamientos roto-traslacionales que sólo afectan a la secuencia piroclástica de la Cantera de Morelia, visibles únicamente en la parte occidental del escarpe de La Paloma.

Los fenómenos principales de deslizamiento estudiados son dos grandes movimientos: el deslizamiento denominado SEDUE (acrónimo de la anterior Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología, actual Secretaría de Urbanismo y Medio Ambiente) y el deslizamiento conocido como del Campestre. Existen además otros deslizamientos de dimensiones más pequeñas que representan un interés menor, pero que en caso de tener movimientos podrían ocasionar daños a las zonas habitadas (Fig. 5). La presencia de un sistema mayor de discontinuidades paralelas a la orientación de la falla principal (E-W, inclinación 45°) pudo haber constituido una línea de debilitamiento a lo largo de la cual se produjeron los deslizamientos en masa.

El deslizamiento de la SEDUE constituye el movimiento de mayor dimensión. Tiene aproximadamente 600 m de largo, 400 m de ancho y 40 m de espesor. Sin embargo, no se puede excluir que el fenómeno esté en realidad compuesto por dos grandes deslizamientos contiguos que con el tiempo se unieron en un único gran movimiento (Arreygue-Rocha *et al.*, 1998, 1999, 2002; Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

Se realizó una sección de la zona donde ocurrió el deslizamiento y se propone una posible reconstrucción a profundidad del movimiento. En la corona se encuentran grandes fracturas y trincheras con orientación paralela al escarpe, que evidencian una continua actividad del fenómeno, debido a la falta de detritos y de suelo dentro de las fracturas (Fig. 6).

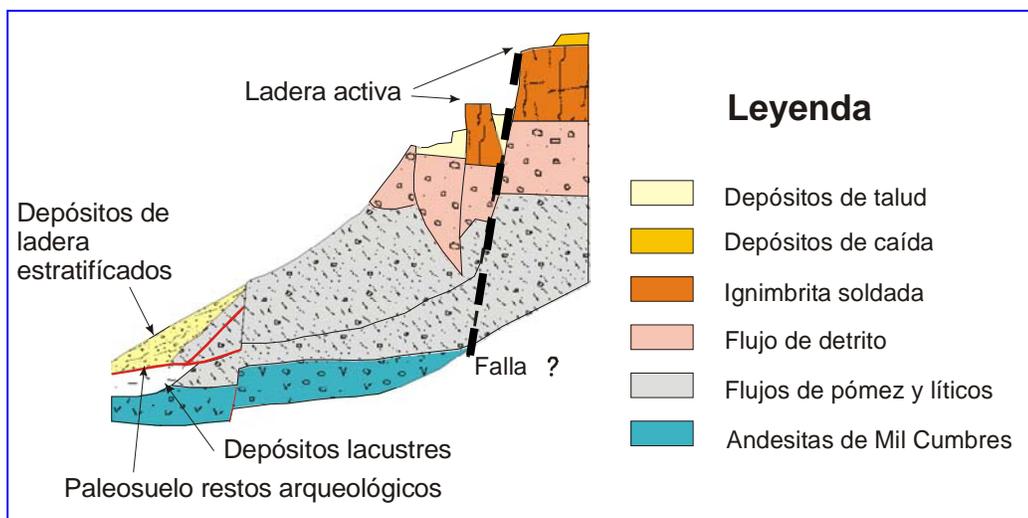


Fig. 6. Sección vertical con el deslizamiento de la SEDUE

El deslizamiento del Campestre, por su parte, es un movimiento roto-traslacional con dimensiones menores al anterior (400 m de ancho, 250 m de largo y 30 m de profundidad). Este cuerpo inestable se distingue por la presencia de una amplia área plana (mesa), inmediatamente debajo de la corona que ha quedado en la parte alta del escarpe de la falla La Paloma. Se cree que esta área fue habitada por la cultura Pirindas, como lo atestiguan los restos de cerámica que se han encontrado, enterrados, en la base del escarpe (Arreygue-Rocha *et al.*, 1998, 1999, 2002; Garduño-Monroy *et al.*, 2001).

5. Riesgo hidrológico

En Morelia hay diferentes áreas sujetas a inundaciones. El rápido crecimiento urbano ha hecho que en los últimos veinte años gran parte de estas áreas hayan sido invadidas por asentamientos habitacionales. La consecuencia lógica es un aumento del riesgo hidrológico.

Parte del cauce natural del Río Chiquito fue modificado sin tomar en cuenta sus características hidrológicas. En el nuevo cauce no se respetó la altura de sus márgenes, ya que éstas se encuentran por arriba del nivel de las calles aledañas, incrementando el riesgo hidráulico.

Además, se han construido demasiados puentes que representan un obstáculo para la escorrentía cuando se presentan periodos de lluvias excepcionales. Así, los materiales arrastrados por el agua durante su descenso se acumulan en los primeros puentes al ingresar a la ciudad, formándose diques que propician desbordamientos y posteriores inundaciones de áreas donde actualmente hay asentamientos urbanos.

En este estudio sólo se analiza el caso del Río Chiquito, afluente de la margen derecha del Río Grande, ya que se trata del dren con problemas hidrológicos más significativos.

La cuenca hidrográfica del Río Chiquito tiene una extensión de 85 km² hasta la confluencia con el Río Grande. El área drenada es de 81,21 km² hasta la estación hidrométrica Chiquito, que estuvo funcionando hasta 1989 y que está ubicada 3,8 km aguas arriba de la confluencia con el Río Grande. El cauce del río en su tramo urbano fue rectificado en 1939 y en particular sus secciones fueron redimensionadas para un gasto máximo de proyecto de 125 m³ por segundo (SARH, 1977).

Actualmente el cauce está afectado por una fuerte sedimentación y por una espesa cobertura vegetal, lo que produce una sensible reducción del área hidráulica y un aumento en el riesgo de inundaciones en las zonas inmediatamente adyacentes al curso de la corriente. Estudios efectuados por la SARH (1985) sobre la capacidad hidráulica efectiva del Río Chiquito, sin considerar los puentes, dan un valor de gasto de 70 m³/s.

La limitada capacidad del Río Chiquito para desalojar la escorrentía se comprueba por las inundaciones que han ocurrido en algunas colonias aledañas. En la gráfica de la Figura 7 se reporta la información obtenida con base en una recopilación hemerográfica de notas aparecidas en el diario *La Voz de Michoacán* durante el periodo 1955-1995. En estos cuarenta años hubo un total de trece eventos excepcionales, siete de los cuales ocurrieron durante el mes de agosto, tres en septiembre, y uno en los meses de abril, junio y julio. Por lo tanto, hay un 77% de probabilidad de que, de haber una inundación, ésta ocurra en los meses de agosto y septiembre, mientras que la probabilidad se reduce a sólo un 8% para los meses de abril a julio.

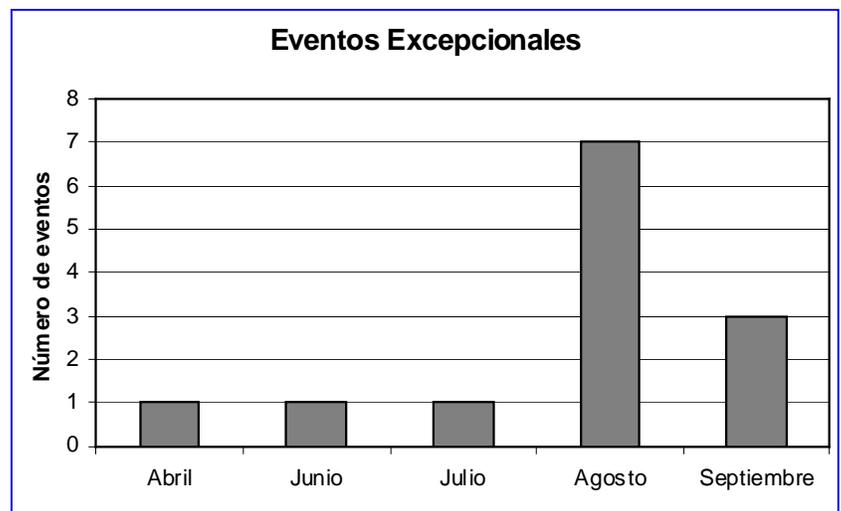


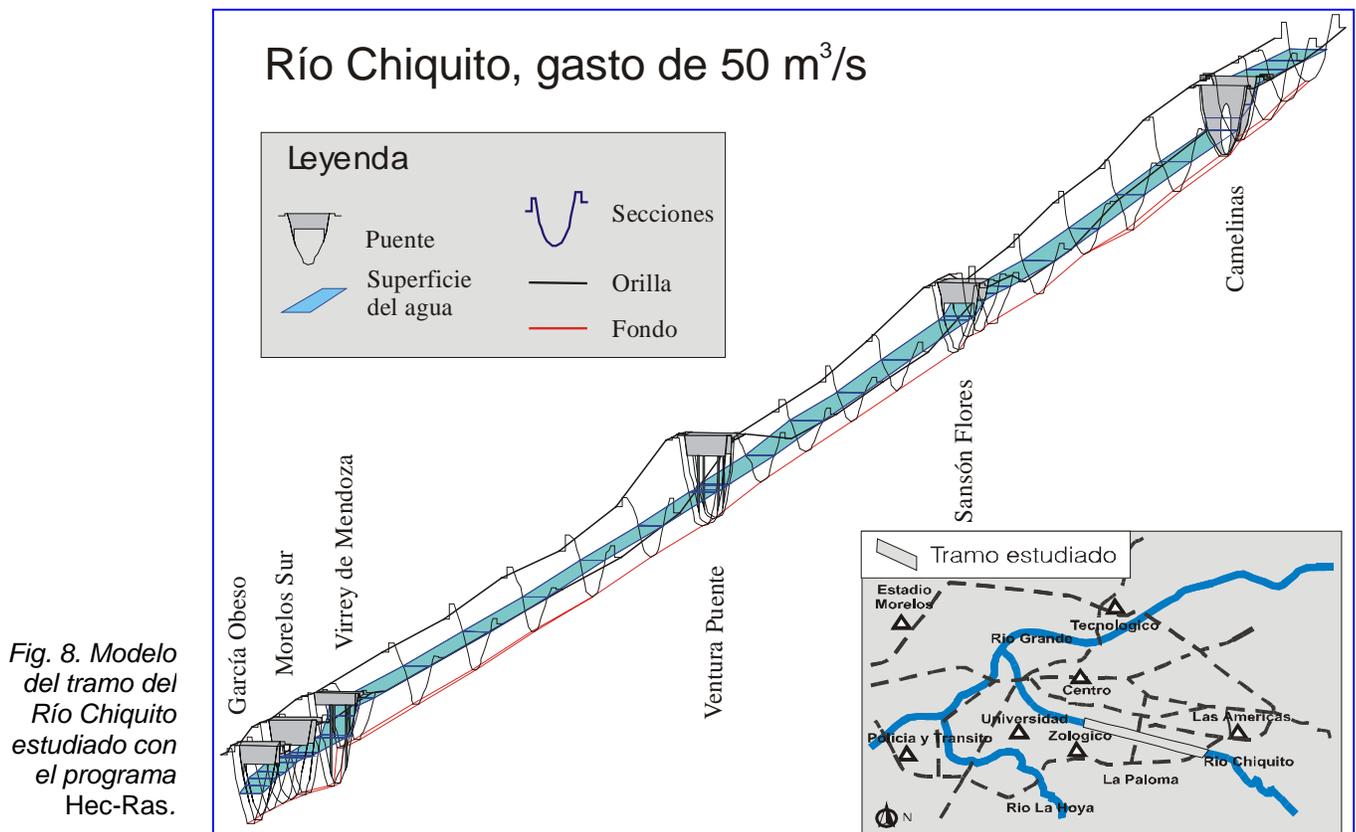
Fig. 7. Noticias históricas sobre inundaciones provocadas por el Río Chiquito en el periodo comprendido de 1955 a 1995.

La cuenca hidrológica del Río Chiquito tiene condiciones morfológicas tales que, aun cuando los valores de gasto regular no son elevados, la geometría del cauce constituye un desagüe inadecuado bajo condiciones críticas, es decir cuando ocurren avenidas extraordinarias (Arreygue-Rocha *et al.*, 1998, 1999).

Análisis hidrológico del Río Chiquito

Se estudió un tramo urbano del Río Chiquito, que se extiende una longitud de 3380 metros entre el puente de la Avenida Camelinas hasta el puente de la calle García Obeso. El desnivel que se observa en este tramo es de 17.25 metros. Los datos relativos a las secciones transversales y a las características geométricas de los puentes corresponden al archivo oficial de la Secretaría de Recursos Hidráulicos.

Para el análisis se utilizó el programa *Hec-Ras*, que permite crear perfiles de la superficie del flujo. Además permite calcular los perfiles de los regímenes subcríticos, supercríticos y mixtos. Todo ello se calcula con base en las ecuaciones del perfil, que se subdividen en secciones transversales que convengan: coeficiente de Manning para el canal principal, coeficientes de velocidad, evaluación de pérdidas por fricción, pérdidas por contracción y expansión, determinación de la profundidad (tirante) crítica, aplicación del momento y limitaciones de flujo uniforme. Esto hace posible evaluar el desplazamiento del perfil libre en condiciones de movimiento permanente del río, las condiciones geométricas de las secciones y el valor del gasto, y, en el caso del Río Chiquito, pone especial atención en el efecto de los puentes considerando su geometría.



En el tramo estudiado hay seis puentes vehiculares, que atraviesan el río en las calles siguientes, partiendo aguas arriba de la corriente: Avenida Camelinas, Sansón Flores, Ventura Puente, Virrey de Mendoza, Morelos Sur y García Obeso (Fig. 8). Las secciones longitudinales de estos puentes son muy variadas, pues hay algunos con longitud de más de 40 metros (Avenida Camelinas), hasta puentes de menos de 10 metros. Sus secciones transversales también varían, ya que van desde los 9,54 m² (Avenida Camelinas) hasta los 71,1

m² (Avenida Ventura Puente). Además, dos de los puentes (Ventura Puente y Virrey de Mendoza) tienen cuatro columnas rectangulares cimentadas en el lecho del río, las cuales constituyen un obstáculo al paso de la corriente (Arreygue-Rocha *et al.*, 1998, 1999).

Se consideraron 30 secciones transversales del río (Fig. 8), a las cuales se les asignaron dos valores distintos del coeficiente de Manning: 0,033 para el fondo (por las características naturales del fondo del cauce), y 0,041 para las márgenes, debido a la presencia de vegetación sobre los taludes.

El programa arroja como resultado que, en el tramo considerado, el gasto máximo que puede contener sin problemas el cauce del río es de 50 metros cúbicos por segundo. Esta cifra es un promedio para la longitud estudiada, ya que, por ejemplo, en el puente de la Avenida Camelinas el cauce puede admitir un flujo de agua ligeramente mayor, de hasta 54 m³/s. Por lo tanto, cualquier lluvia que ocasione un flujo superior a esos 50 m³/s a lo largo del cauce provocará desbordamientos que inundarán las zonas habitadas en ambos márgenes del río.

Análisis de Gumbel con los gastos máximos del Río Chiquito

Con la finalidad de efectuar una estimación de los posibles tiempos de retorno de los valores del gasto máximo del Río Chiquito, se realizó un análisis según la ley de los valores extremos de Gumbel (Aparicio, 1993), tomando los datos de los gastos máximos registrados en la mencionada estación hidrométrica Chiquito.

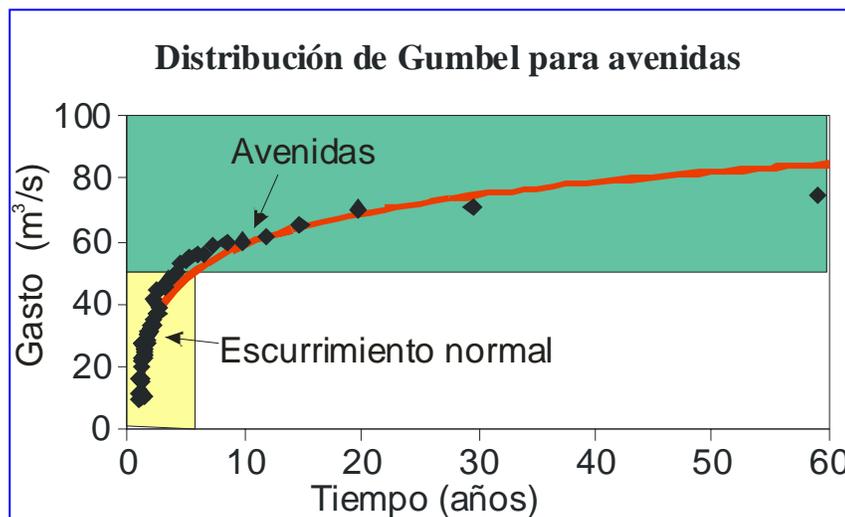


Fig. 9. Análisis de Gumbel para los gastos máximos del Río Chiquito en el período 1927-1989.

La información disponible es para el período 1927-1989, con la cual se obtuvieron los resultados que se reportan en la Figura 9, indicando que para una capacidad máxima de 50 m³ por segundo el tiempo de retorno es de 5 a 7 años. Si se considera la capacidad máxima de 70 m³/s, que reporta la SARH (1985), sin tomar en cuenta los puentes, el tiempo de retorno resultante es de aproximadamente 20 años (Fig. 9).

Por lo tanto, es de esperar que aproximadamente cada cinco años las áreas habitacionales aledañas a los márgenes del Río Chiquito sufran inundaciones, particularmente las áreas

cercanas a los puentes mencionados en el capítulo precedente.

6. Conclusiones

Aún de manera preliminar, este trabajo presenta las condiciones actuales de riesgo geomorfológico e hidrológico en dos de los elementos de riesgo identificados en la ciudad de Morelia: el escarpe de La Paloma y un tramo urbano del Río Chiquito.

El escarpe de La Paloma es producto de una falla normal activa de dirección E-W con caído hacia el sur, que a su vez es la parte meridional de un graben. En la zona hay riesgo de deslizamientos roto-traslacionales de tierra y caídas de bloques que pueden llegar a las zonas habitacionales ubicadas en la parte inferior.

El Río Chiquito es el afluente principal de la margen derecha del Río Grande, con una cuenca hidrográfica de 85 km². Su cauce fue modificado, y su capacidad máxima de proyecto, que fue de 125 m³/s, actualmente se ha reducido a 70 m³/s, sin considerar los puentes en el tramo urbano de 3,4 km de longitud que se estudió. Para un flujo máximo de 50 m³/s tomando en cuenta los puentes, es de esperar que cada cinco a siete años ocurran desbordamientos que inunden las zonas habitacionales de sus márgenes, según el análisis de Gumbel aplicado. En este caso, hay un 77% de probabilidad de que la inundación ocurra en agosto o septiembre, y un 23% de probabilidad de que ocurra en el periodo abril-julio. En los demás meses del año prácticamente no hay riesgo de inundación.

Referencias

- Aparicio Mijares, F.J. (1993). *Fundamentos de hidrología de superficie*. Segunda reimpresión. Editorial Limusa, México, 303 p.
- Arreygue, E., P. Canuti, A. Iotti y V.H. Garduño-M. (1998). Hydrogeological hazard in the urban area of Morelia, Mich. (Mexico). *Proceedings of the Eight International Congress of the Association for Engineering Geology and the Environment*, pp. 2245-2250.
- Arreygue R., E., P. Canuti, N. Casagli, A. Iotti y V.H. Garduño M. (1999). Las condiciones de riesgo hidrogeológico en la Ciudad de Morelia, (Michoacán, México), Patrimonio Mundial de la Humanidad. En *Asamblea Internacional y Congreso Mundial de Conservación del Patrimonio Monumental de ICOMOS* (Internacional Council on Monuments and Sites): Roma, 14 p.
- Arreygue-Rocha E., V.H. Garduño-Monroy, Paolo Canuti, Nicola Casagli, Alberto Iotti y Sergio Chiesa (2002). Análisis geomecánico de la inestabilidad del escarpe La Paloma en la Ciudad de Morelia, Michoacán, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 19 (2), pp. 91-106.
- Canuti, P., and N. Casagli (1994). Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana. En: *Atti del convegno "Fenomeni Franosi e Centri Abitati"*, Bologna, 27 Maggio 1994, CNR – GNDICI, Regione Emilia Romagna.
- Garduño-Monroy, V.H., G.M. Rodríguez-Torres, I. Israde-Alcántara, 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*, Unión Geofísica Mexicana, 9 (2), pp. 8-93.
- 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*, 18 (1), pp. 37-54.
- Israde-Alcantara, I., and V.H. Garduño-Monroy (1999). Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting. The evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central western Michoacan, Mexico): *Palaecogeography, Palaecology*, 15 (1-3), pp. 209-227.

- López-Granados, E.M. (1999). Cambio de uso de suelo y crecimiento urbano en la ciudad de Morelia, Michoacán. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 134 p. Inédito.
- Pasquaré, G., L. Ferrari, V.H. Garduño, A. Tibaldi, and L. Vezzoli (1991). Geology of the central sector of the Mexican Volcanic Belt, Status of Guanajuato and Michoacán: *Geological Society of America, Map and Chart series*, Boulder, Co., MCH072, 1 mapa, 22 p.
- Periódico *La Voz de Michoacán* (1950-1996).
- Ruiz, J.F. (1992). *Estampas de su pasado: Morelia, Michoacán*. Sociedad Quinto Centenario, Morelia, Mich., México. 200 p.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) (1977). Estudio geohidrológico preliminar del Valle de Morelia – Queréndaro, Michoacán, México. 201 p. Inédito.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) (1985). Estudio hidrológico: “Obras de Protección a la Ciudad de Morelia, Mich., en el Cauce del Río Chiquito de Morelia”. 50 p. Inédito.
- Vargas-Uribe, G. (1994). El crecimiento urbano-territorial de Morelia (1921-1993). *Ciencias Nicolaítas*, 7, pp. 24-49.
- Varnes, D.J. (1978). Slope movements types and processes. In: Schuster, R.L., Krizeck, R.J. (eds.), *Landslides, analysis and control*. National Academy of Sciences, Transportation Research Board, Special Report, 176, pp. 11-33.
- Varnes, D.J. (1984). *Landslide hazard zonation. A review of principles and practice*. United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO), Natural Hazards Series, 3, 63 p.

Actualización del modelo geológico conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto, BC.

Héctor Lira Herrera

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto
Carretera Pascualitos-Pescaderos km 26,5, Mexicali, BC, CP 21100. hector.lira@cfe.gob.mx

Resumen

Se presenta el modelo geológico conceptual actualizado del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto. La tectónica extensional que originó la Provincia de Cuencas y Cordilleras (*Basin and Range*) del oeste de Estados Unidos y noroeste de México durante el Terciario Superior, en el área de Cerro Prieto dio como resultado la formación de una cuenca de tipo medio graben, entre las fallas Cerro Prieto e Imperial (Cuenca Cerro Prieto), en la que se interpreta la existencia de fallas lístricas con dirección predominante noroeste-sureste y noreste-suroeste, que se escalonan en forma general al NE. La zona de debilidad cortical generada durante el Terciario permitió el emplazamiento de un intrusivo de composición básica dentro de la cuenca tectónica, el cual ha sido asociado con una anomalía magnética, denominada Nuevo León; este intrusivo ha sido alimentado por nuevas intrusiones magmáticas originadas por la actual tectónica extensional del Golfo de California. Las rocas más antiguas identificadas en la zona están compuestas por gneiss y esquistos de biotita de edad Pérmico-Jurásico, y tonalitas del Jurásico-Cretácico que están en contacto con granitos del Cretácico, que en conjunto representan el basamento de la región. La columna litológica en el subsuelo de la cuenca tectónica de Cerro Prieto está formada por un basamento compuesto por granitos del Cretácico; un paquete arcilloso representado por lutitas grises con intercalaciones de areniscas, lutitas cafés del Terciario y lodolitas, con un espesor promedio de 2700 m, que descansan sobre el basamento; y, finalmente, sedimentos clásticos de edad Cuaternaria producto del material depositado por el Río Colorado y los abanicos aluviales de la Sierra Cucapá, compuestos por gravas, arenas y arcillas que cubren al paquete de lutitas, alcanzando un espesor promedio de 2500 m. Los fluidos que alimentan al yacimiento geotérmico son calentados al pasar por la zona donde se localiza el intrusivo básico (fuente de calor) y migran a través de las fallas lístricas hacia estratos permeables (areniscas), que se localizan dentro del paquete de lutitas grises terciarias.

Palabras clave: Cerro Prieto, modelo geológico, litología del subsuelo.

Update of the conceptual geological model for the geothermal reservoir in Cerro Prieto, BC

Abstract

An updated, conceptual geologic model is presented for the geothermal reservoir in Cerro Prieto geothermal field. The tectonic extension that formed the Basin and Range Province of the Western United States and Northwestern Mexico during Upper Tertiary in the Cerro Prieto area resulted in the formation of a half-graben tectonic basin between the Cerro Prieto and Imperial faults. Called the Cerro Prieto basin, it includes listric faults, predominately northwest-southeast and northeast-southwest trending, stepped generally to the northeast. The zone of cortical weakness, formed during the Tertiary, allowed an intrusion of basic rock associated with the magnetic anomaly known as Nuevo Leon. The intrusive rock has been fed by new magmatic intrusions originated by the present tectonic extension of the Gulf of California. The oldest rocks identified in the area are gneiss and biotite-schists of Permian-Jurassic age and tonalites of Jurassic-Cretaceous age in contact with Cretaceous granites, all representing the regional basement. The lithologic

column in the subsurface of the Cerro Prieto basin is formed by a basement of Cretaceous granites; an argillaceous package resting on the basement composed of gray shales with interleaves of sandstone, Tertiary brown-shales and mudstones, with an average thickness of 2700 m; clastic sediments of the Quaternary age deposited mainly by the Colorado River and alluvial fans of the Cucapá Range, comprised of gravel, sands and clays with an average thickness of 2500 m, covering the shales. The fluids feeding the geothermal reservoir heat as they pass through the zone where the basic intrusive is located (the heat source) and migrate through the listric faults toward the permeable layers of sandstone located within the gray shales.

Keywords: Cerro Prieto, geological model, subsurface lithology.

1. Introducción

El Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP), con 720 MWe de capacidad instalados, es el segundo campo más importante del mundo en la generación de electricidad, utilizando la energía calorífica localizada en el subsuelo. El CGCP se localiza dentro de la región geotérmica del Valle de Mexicali, que forma parte de la cuenca de Salton, en la porción noreste del estado de Baja California, en el límite entre el Batolito Peninsular y el sistema transcurrente de San Andrés, 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, entre los meridianos 115°12' y 115°18' longitud Oeste, y los paralelos 32°22' y 32°26' de latitud Norte (Figura 1).

Los primeros modelos conceptuales sobre el CGCP fueron presentados por Alonso y Moser en 1964 y por Mercado en 1968 (Alonso *et al.*, 1985; Puente y De la Peña, 1979), que proponen una cuenca con unidades geológicas generalizadas. Cobo (1979, 1981) y Corona (1996) presentan modelos con una descripción más a detalle de la secuencia estratigráfica que rellena la cuenca tectónica, que se caracteriza por bloques escalonados formados por fallas normales, aunque no muestran la ubicación de la fuente de calor que da origen a los fluidos hidrotermales que se encuentran en el yacimiento geotérmico de Cerro Prieto.

La información obtenida con la perforación de más de 300 pozos y los estudios geológicos y geofísicos realizados desde 1958 en el CGCP, han permitido conocer las condiciones geológicas del subsuelo y tener un panorama general del comportamiento del sistema geotérmico. Sin embargo, es necesario actualizar eventualmente el modelo geológico, a fin de auxiliar en la localización y estimación de condiciones geológicas de nuevas zonas de producción y de inyección, dentro y en los alrededores del campo geotérmico. Por lo tanto, este trabajo tiene como objetivo presentar un modelo geológico conceptual actualizado sobre el yacimiento del campo de Cerro Prieto, incluyendo la ubicación probable de la fuente de calor.

2. Marco geológico superficial

La zona geotérmica del Valle de Mexicali se localiza dentro de la cuenca de Salton, la cual abarca desde el Mar de Salton en la porción sur del estado de California, Estados Unidos, hasta el Golfo de California, y forma parte del sistema tectónico de San Andrés, formado por fallas transcurrentes con desplazamientos normales, de dirección predominante NW-SE. Las fallas más importantes reconocidas en la zona son las de Cucapá, Imperial, Cerro Prieto y Michoacán (Figuras 1 y 2).

El escalonamiento en dirección noreste de las fallas Cucapá, Cerro Prieto y Michoacán origina, junto con la falla Imperial del lado oriental, una cuenca tectónica con una profundidad aproximada de 5200 metros rellena de sedimentos aluviales y deltaicos, que abarcan edades desde el Terciario hasta el Reciente y una extensión aproximada de 25 km.

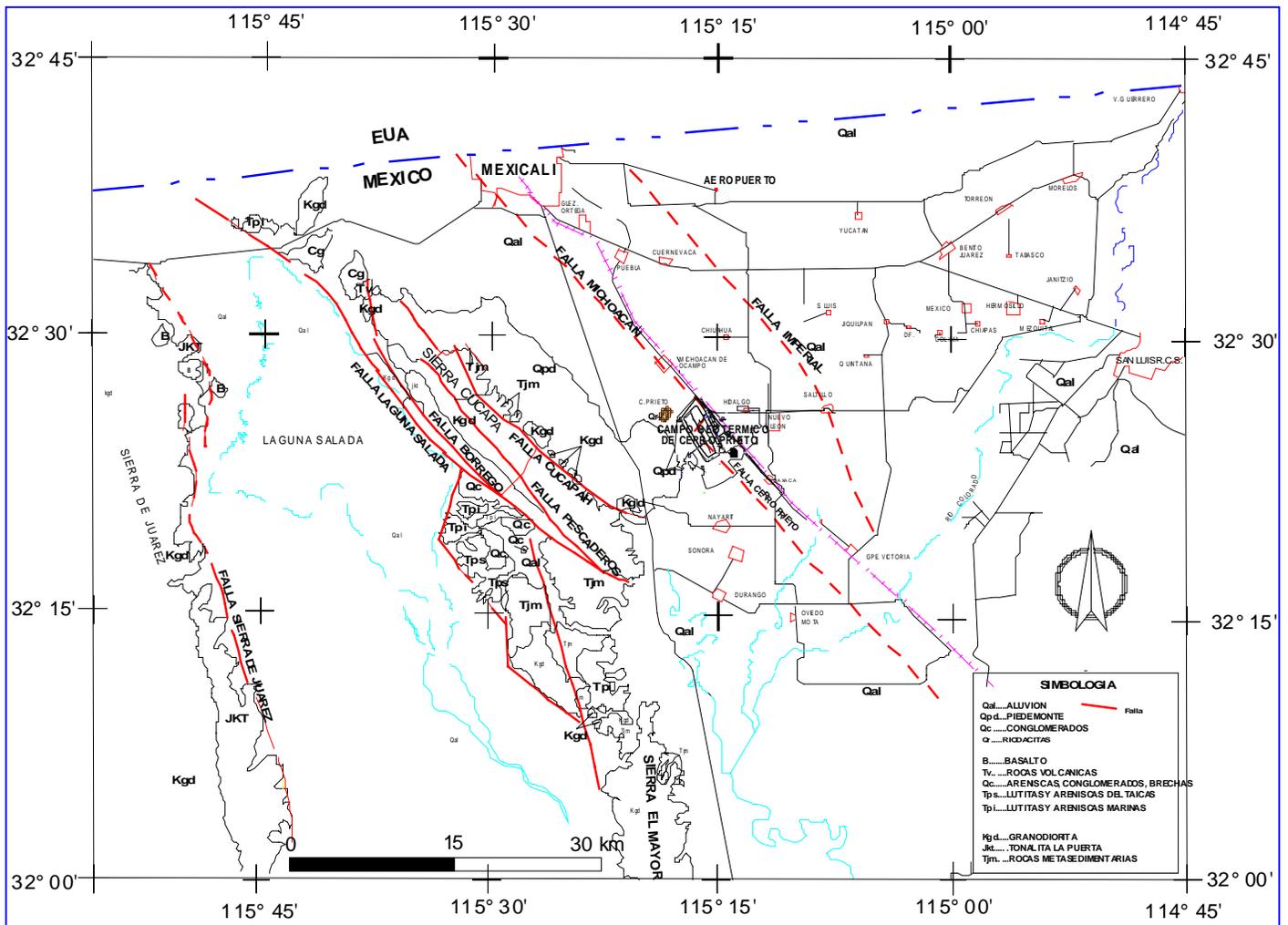


Fig. 1 Mapa geológico del Valle de Mexicali

Rocas Prebatolíticas

Afloran al oeste del CGCP en la porción noreste de las sierras de Cucapá y el Mayor (Fig. 1). Representan las rocas más antiguas de la región y están caracterizadas por metasedimentos (Tjm) de edad Pérmico-Jurásico (Siem, 1992), compuestos por gneis cuarzofeldespáticos, esquistos de cuarzo-mica, mármoles, anfibolitas y cuarcitas. Es muy probable que los metasedimentos se encuentren dentro de la cuenca tectónica, formando parte del basamento.

Rocas Batolíticas

Son rocas intrusivas que forman parte del Batolito Peninsular y están representadas por tonalitas del Jurásico-Cretácico (Jkt), que se encuentran intrusionando a las rocas metamórficas paleozoicas, y por granitos y granodioritas del Cretácico Inferior (Kgd) (Barnard, 1968; Gastil *et al.*, 1975), los cuales afloran en su mayor parte en la Sierra Cucapá, al oeste del CGCP, y forman el basamento regional (Fig. 1).

Rocas Post-Batolíticas

Están representadas por dacitas y andesitas miocénicas (Tv) localizadas en la porción norte de la Sierra Cucapá (Barnard, 1968) (Fig. 1). Domos riodacíticas (Qr) forman la estructura volcánica de Cerro Prieto, la

cual consta de dos centros eruptivos que se superponen. Ambos domos están asociados a flujos e intrusiones riódacíticas con una edad de 110 mil a 10 mil años (Boer, 1979).

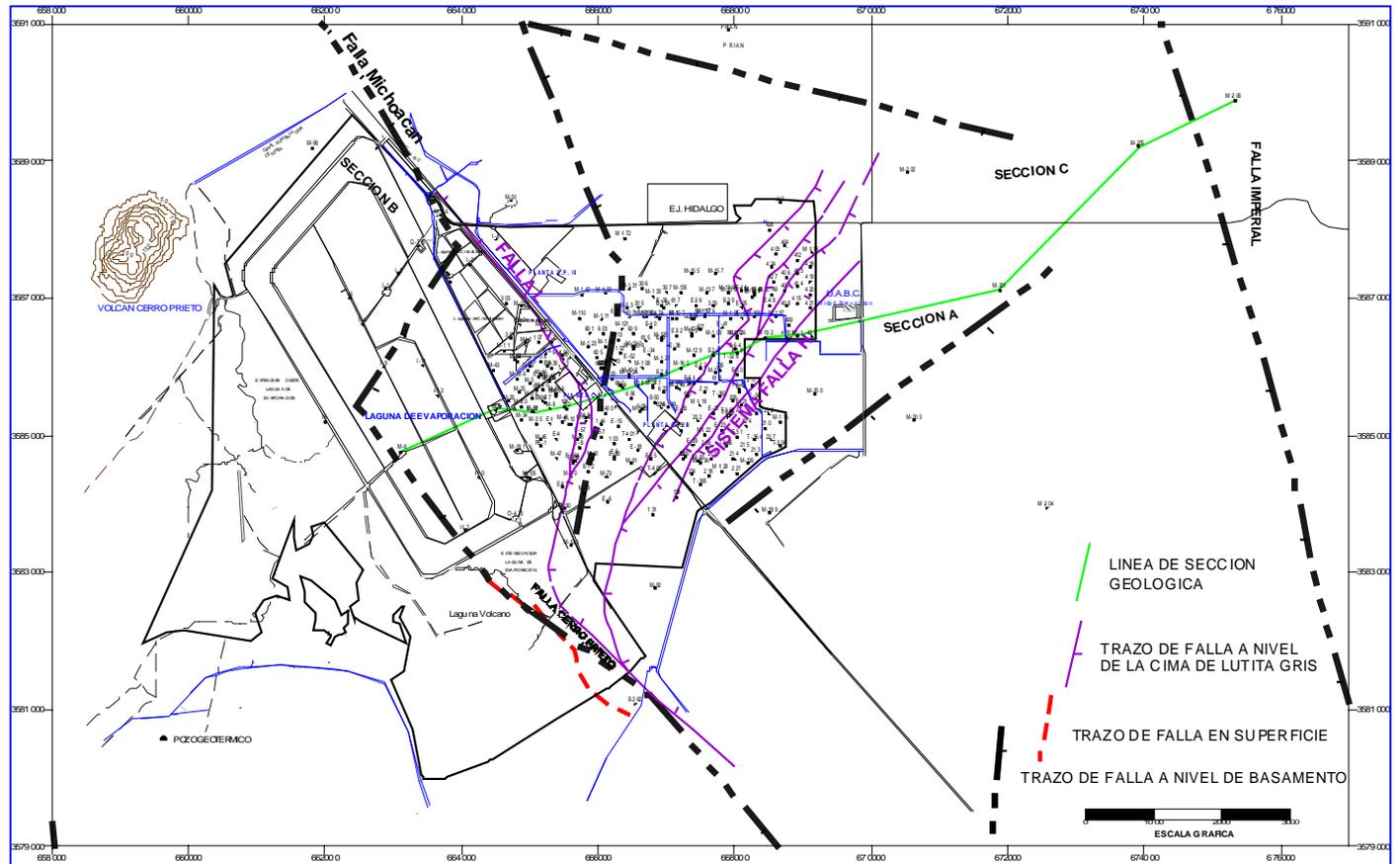


Fig. 2. Plano tectónico del campo de Cerro Prieto

Sedimentos depositados en el Terciario Superior están representados por lutitas de color gris con intercalaciones de areniscas, que alcanzan espesores del orden de los 3000 metros. Estas rocas se encuentran cubiertas por lutitas de color café que sobreyacen a sedimentos aluviales y deltaicos plio-cuaternarios (Qal) (Cobo, 1979), que fueron aportados principalmente por el Río Colorado y rellenan la cuenca tectónica de Cerro Prieto. Estos sedimentos están compuestos por conglomerados y depósitos no consolidados de arena, grava, arcilla, limo y cantos rodados que en conjunto alcanzan un espesor de 2500 metros.

3. Geología del subsuelo

La información obtenida con la perforación de 321 pozos hasta 2004 y con el análisis mineralógico realizado a las muestras de canal, ha permitido definir cinco unidades litológicas principales: el Basamento, la Lutita Gris, la Lutita Café, las Lodolitas y los Sedimentos Clásticos No Consolidados, que se describen a continuación de la más antigua a la más reciente.

Basamento

Pérez (1996) presenta un modelo geológico estructural para la zona de Cerro Prieto, integrando en un solo plano los modelos gravimétricos y magnetométricos existentes, y diferenciando la existencia de tres tipos de basamento que en este trabajo se han denominado Terreno Norteamérica (TNA), Terreno Baja California

(TBC) e Intrusivo Máfico (IM) (Fig. 3). El más antiguo de esos basamentos es el TNA y está representado por rocas metamórficas del Paleozoico-Mesozoico. Le sigue en antigüedad el TBC, estando representado por rocas graníticas del Cretácico. El IM es un intrusivo de composición básica de probable edad Terciario Superior-Plioceno (?), localizado a profundidad entre la falla Cerro Prieto y la falla Imperial. Su presencia se deduce de la anomalía magnética interpretada entre estas dos fallas, y está relacionado probablemente con la fuente de calor que alimenta al yacimiento geotérmico actual.

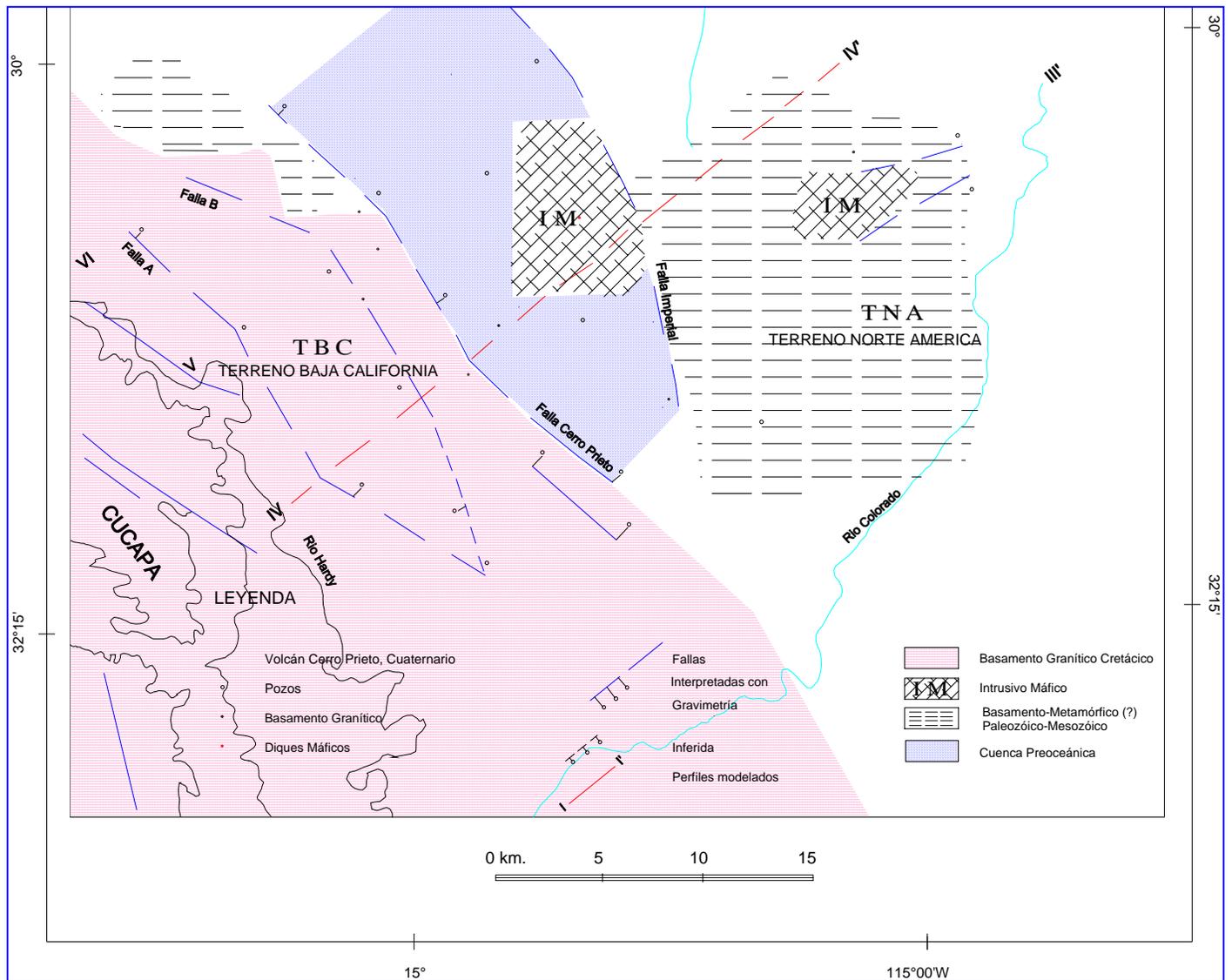


Fig. 3. Modelo de basamento para la zona de Cerro Prieto (Modificado de Pérez, 1996)

En el campo geotérmico, rocas del basamento han sido identificadas en los pozos M-3 (a 2547 m de profundidad), M-96 (2792 m), S-262 (1478 m), I-5 (2250 m) e I-12 (1758 m), tratándose en todos los casos de rocas graníticas de edad Cretácico Tardío, y que por tanto serían parte del Terreno Baja California (TBC). El basamento se profundiza hacia el oriente, dando origen a una cuenca tectónica que alcanza profundidades estimadas de 5200 metros entre las fallas Imperial y Cerro Prieto.

Unidad de Lutita Gris

Esta unidad se formó a partir de sedimentos continentales que rellenaron la cuenca tectónica, y descansa directamente sobre el basamento granítico (TBC) y el intrusivo máfico (IM). La unidad está compuesta por

lutitas y lutitas limolíticas que varían de color gris claro a negro, con intercalaciones de areniscas, que en conjunto dan un espesor promedio, para toda la unidad, de 3000 metros (Fig. 4). La cima de esta unidad se localiza a 398 m de profundidad en la porción oeste del campo (pozo M-6), y se profundiza hacia el oriente alcanzando los 2847 m en el pozo M-201. Por su posición estratigráfica se le ha asignado una edad tentativa de Terciario, probablemente Mioceno Tardío (Puente y De la Peña, 1978; Cobo, 1979). Cotton y Von der Haar (1979) informan sobre la presencia de microfósiles de *Cassigerinella chipolesis* del Terciario Medio, en los pozos M-38 y M-11 en el área de Cerro Prieto Uno.

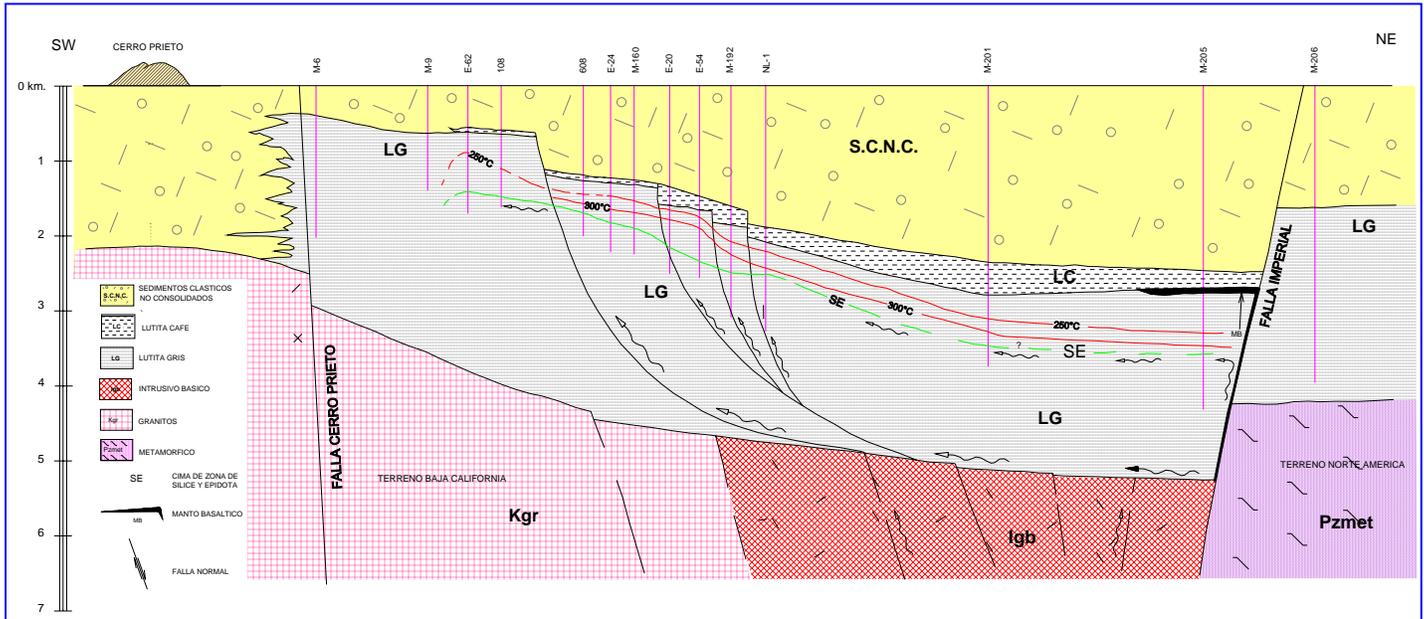


Fig. 4. Sección geológica general A (Para ubicación ver Fig. 2)

Dentro de las lutitas grises se presentan horizontes lenticulares de areniscas permeables, compuestas por fragmentos de cuarzo y escaso feldespato (arcosas), de grano fino a grueso, bien clasificadas, de color blanco (Cobo, 1979), con espesores que van desde unos cuantos centímetros a los 300 m, y porosidad del orden del 22%. Estas areniscas son las que alojan a los fluidos del yacimiento geotérmico (Fig. 4).

Unidad de Lutita Café

Lutitas y lutitas limolíticas de color café descansan en gran parte sobre la unidad de Lutita Gris, presentando intercalaciones de areniscas y arenas muy permeables de color crema, de medianamente a bien clasificadas, cementadas principalmente por carbonatos, con espesores variables propios de ambientes de alta energía. El espesor de esta unidad varía desde unos cuantos metros hasta 500 m (Figura 4). La cima se localiza a una profundidad aproximada de 600 metros en la porción oeste del campo, profundizándose hacia el este hasta alcanzar los 2502 m de profundidad en el pozo M-205.

Lodolitas

Se encuentran sobreyaciendo a las unidades de Lutita Gris y Lutita Café. Su distribución es muy errática y se localizan principalmente en la porción centro oriental del campo geotérmico. Presentan un típico color café con intercalaciones ocasionales de arenas y gravas pobremente consolidadas.

Sedimentos Clásticos No Consolidados

Sobreyacen a las unidades anteriores y están compuestos por arcillas, limos, arenas y escasas gravas, con espesores que varían desde los 400 m hasta los 2500 m. Su comportamiento en el subsuelo es similar al de las demás unidades, encontrándose que su base es más somera en la porción oeste del campo y más profunda en el este (Fig. 4). A esta unidad se le ha asignado una edad del Cuaternario no diferenciado (Cobo, 1981).

4. Minerales hidrotermales

La interacción de los fluidos geotérmicos de alta temperatura con las rocas sedimentarias antes descritas, ha provocado la alteración hidrotermal de los minerales primarios a profundidad, dando como resultado la formación de nuevos minerales secundarios. Estos minerales secundarios han reemplazado en mayor o menor grado al cemento original de las areniscas, de tal modo que ahora estas rocas presentan como cementante una determinada asociación de minerales de origen hidrotermal. Se han identificado cuatro asociaciones o zonas de mineralización, que reflejan las temperaturas que tenía el yacimiento antes de su explotación y que, de menor a mayor temperatura, son las siguientes (Elders *et al.*, 1978; Cobo, 1979):

- Zona con cementante de carbonato de calcio. Es la primera en aparecer a profundidad, generalmente en las areniscas dentro de las unidades de Lodolitas y de Lutita Café; está asociada a temperaturas que van de los 100 a los 200°C.
- Zona con cementante de carbonato de calcio y sílice. Esta zona se encuentra generalmente por debajo de la zona anterior, dentro de la unidad de Lutita Gris. Las temperaturas de los fluidos en esta zona oscilan entre los 150 y los 250°C.
- Zona con cementante de sílice, escaso carbonato y epidota, o zona de transición. Se localiza por debajo de la zona precedente, con temperaturas del orden de los 250°C. A partir de esta zona se localiza el yacimiento geotérmico comercialmente aprovechable.
- Zona con cementante de sílice y epidota. Por debajo de las zonas anteriores y ya dentro de la unidad de lutita gris, se encuentra una zona en la que el cementante de las areniscas está constituido básicamente por minerales de sílice y epidota, cuya temperatura de formación ocurre a partir de los 230°C. En forma general, la cima de la zona de sílice y epidota se localiza a partir de los 1400 m de profundidad en la porción oeste del campo y se profundiza hacia el este, donde se encuentra alrededor de los 3600 m (Fig. 4). La isoterma actual de 300°C concuerda bastante bien con la cima de la zona de sílice y epidota, y a partir de ella quedan terminados la mayoría de los pozos productores.

5. Tectónica

Durante el Terciario Tardío existió en el occidente de Estados Unidos y noroeste de México una tectónica extensional que dio origen a la Provincia de Cuencas y Cordilleras (*Basin and Range*). Axen (1995) ha apuntado que el CGCP se localiza dentro de la "provincia extensional del Golfo que es una zona principalmente de fallamiento normal Mioceno-Plioceno y de topografía de cuencas y sierras... En el Mioceno Tardío-Plioceno Temprano, la extensión generalizada NNE-WSW en la provincia extensional del Golfo creó o amplió el proto-golfo de California antes de la formación de corteza oceánica y del moderno sistema transforme en el golfo".

Un modelo que puede explicar la formación de la cuenca tectónica de Cerro Prieto es el propuesto por Frostick y Stell (1993) (Fig. 5), que describe la formación de cuencas en márgenes de placas divergentes y al que denominan rifts con generación de litosfera (*lithosphere-generated rifts*). De acuerdo con ese modelo, la subsidencia es la primera expresión del *rifting*, y es ocasionada por la extensión que sufre la placa lo que a su vez causa el alargamiento y el adelgazamiento de la litosfera. Entre las principales características de este modelo está el desarrollo temprano de la cuenca de hundimiento, la cual suele atrapar el drenaje de un río. La

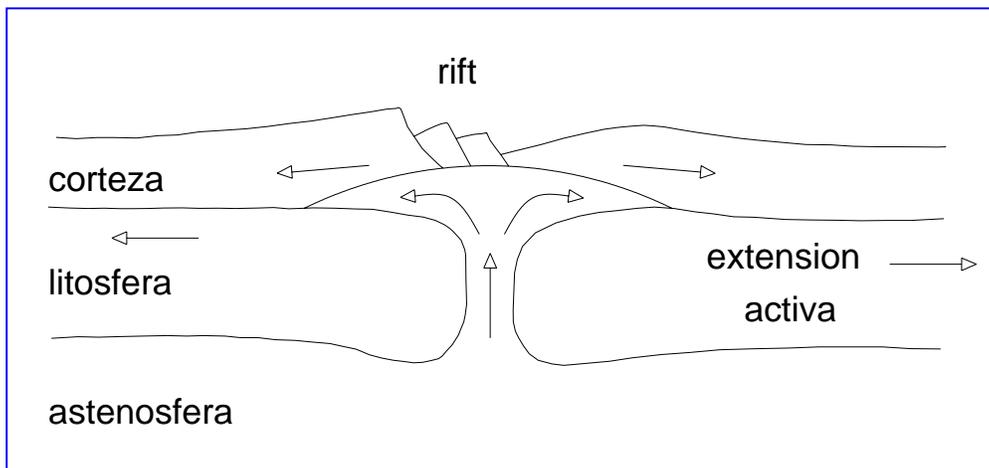


Fig. 5. Modelo de formación de rifts, según Frostick y Stell (1993)

subsistencia temprana y la atracción del drenaje ocasionan una abundante sedimentación clástica y el llenado de la cuenca de hundimiento con depósitos fluviales y lacustres, los cuales se extienden hasta más allá del límite del rift.

Ledezma (1998), por su parte, indica que el modelo pasivo puede explicar la formación de cuencas extensionales o de rift. Este modelo se caracteriza

porque los esfuerzos tectónicos horizontales son el mecanismo principal de formación de la cuenca, presentándose cuatro etapas: extensión, formación de cuencas, relleno sedimentario y vulcanismo. “...Los rifts continentales (valles extensionales terrestres) son comúnmente asimétricos en la mayoría de sus componentes... El elemento principal lo constituye un medio graben... La porción sur de *Basin and Range* puede ser un ejemplo de lo anterior. La manera de acomodar la extensión en los bloques superficiales es mediante el desarrollo de juegos de fallas lístricas normales” (Ledezma, 1998). Durante la etapa de extensión existen emplazamientos magmáticos importantes en la corteza en amplias regiones.

6. Conclusiones

La tectónica extensional que durante el Terciario Superior dio origen a la Provincia de Cuencas y Cordilleras (*Basin and Range*) del occidente de Estados Unidos y noroeste de México, en el área de Cerro Prieto tuvo como resultado la formación de una cuenca del tipo medio graben, entre las fallas Cerro Prieto e Imperial, que está caracterizada por fallas lístricas con dirección predominante NW-SE y NE-SW, las cuales se escalonan en forma general al NE, originando que todo el paquete sedimentario se profundice en esa dirección y por consiguiente el yacimiento geotérmico también.

En respuesta al fallamiento extensional, esta región fue subsidiando paulatinamente, al grado de que hace 10 a 8 millones de años llegó a estar inundada por aguas del Océano Pacífico (Pérez, 1996). La zona de debilidad cortical generada durante el Terciario permitió el emplazamiento, dentro de la cuenca de Cerro Prieto, de un intrusivo de composición básica que ha sido asociado con la denominada anomalía magnética Nuevo León, y que ha sido alimentado por nuevas intrusiones magmáticas originadas por la actual tectónica extensional del Golfo de California.

Como resultado de la actividad tectónica, en la zona del campo de Cerro Prieto se originaron las fallas Imperial y Cerro Prieto, de orientación NW-SE, que afectan al basamento y delimitan la cuenca tectónica en esa zona. Dentro de la cuenca se han formado fallas lístricas que afectan al paquete sedimentario lutítico, con dos direcciones NW-SE (Falla L) y NE-SW (Sistema de la Falla H; ver Fig. 2).

La tectónica extensional que sigue afectando actualmente a la zona de Cerro Prieto está utilizando las estructuras preexistentes, como son las fallas Cerro Prieto, Michoacán e Imperial, para dar origen a una cuenca de dispersión.

El resultado de estos eventos geológicos ha propiciado la formación del yacimiento geotérmico, cuyo modelo conceptual es el siguiente. Los sedimentos terciarios lutíticos con intercalaciones de areniscas constituyen la capa almacenadora, ya que permiten el almacenamiento de los fluidos hidrotermales. Estos son calentados al pasar por la zona donde se localiza el intrusivo básico (asociado con la anomalía magnética Nuevo León), que constituye la fuente de calor, al oriente de la actual zona de explotación, y migran a través de las fallas lístricas hacia los estratos permeables constituidos por las areniscas. Los paquetes superiores de lutitas forman la capa sello. Fluidos de menor temperatura están recargando el yacimiento a través de pozos de inyección localizados en la porción oeste del campo con objeto de mantener la presión del yacimiento (Fig. 6).

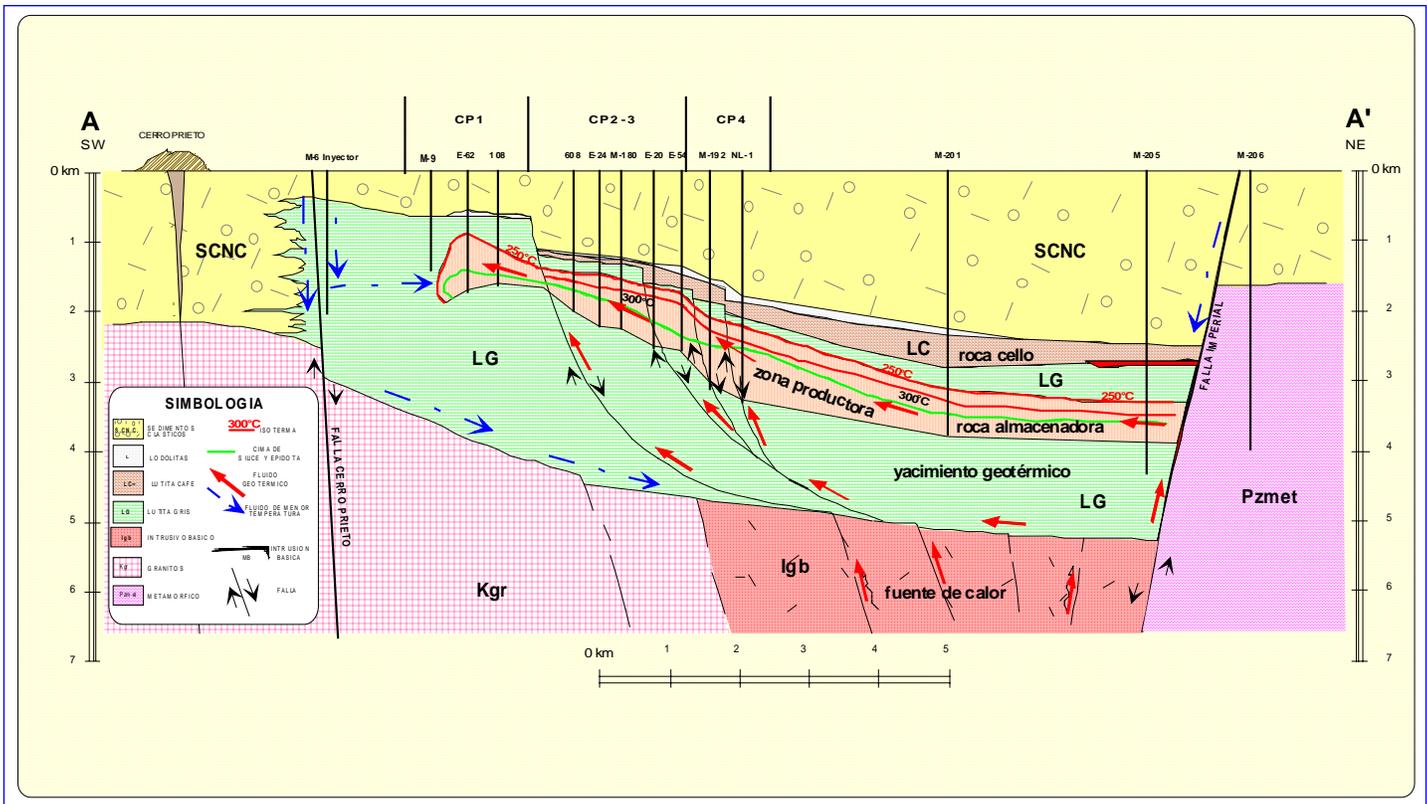


Fig. 6. Modelo conceptual del yacimiento geotérmico de Cerro Prieto (Para ubicación de la sección, ver Fig. 2)

Referencias

- Alonso E., H., González S. A., y Razo M., A. (1985). Geología de los yacimientos geotérmicos de México. Reporte Interno DEX 3/85, CFE. Inédito.
- Axen, G. (1995). Extensional segmentation of the Main Gulf Escarpment, Mexico and United States. *Geology*, Vol. 23, No. 6, pp. 515-518.
- Barnard, F.L. (1968). Structural Geology of the Sierra de los Cucapá, Northeastern Baja California, Mexico, and Imperial County. Unpublished Doctoral Dissertation, University of California.
- Boer, J. (1979). Paleomagnetism of the Quaternary Cerro Prieto, Crater Elegante, and Salton Buttes volcanic domes in the northern part of the Gulf of California rhombochasm. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 91-98.

- Cobo R., J.M. (1979). Geología y mineralogía del campo geotérmico de Cerro Prieto, B.C. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 103-114.
- Cobo R., J.M. (1981). Configuración de los cuerpos litológicos de lodolita, lutita café, lutita gris, zonas de sílice y epidota, y sus relaciones con la tectónica del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Proceedings of the Third Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 29-42.
- Corona, M. (1996). Actualización del modelo geológico del campo de Cerro Prieto. Informe técnico interno RE-009/96, CFE. Inédito.
- Cotton, M.L., and Von der Haar, S. (1979). Microfossils from Cerro Prieto geothermal wells, Baja California, Mexico. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 162-168.
- Elders, W.A., Hoagland, J.R. and McDowell, S.C. (1978). Hydrothermal mineral zones in the geothermal reservoir of Cerro Prieto. *Proceedings of the First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico*, pp. 68-75.
- Frostick, L.E. and Stell, R.J. (1993). Sedimentation in divergent plate-margin basin. *Int. Ass. Sediment., Spec. Pub.* 20, pp. 111-128.
- Gastil, R.G., Phillips, R.P. and Allison, E.C. (1975). Reconnaissance geology of the State of Baja California. *Geological Society of America, Mem.* 140, 170 p.
- Ledezma, J. (1998). Apuntes del curso sobre cuencas extensionales. Facultad de Ciencias Marinas, Universidad Autónoma de Baja California. Inédito.
- Lyons, D.J. and Van de Kamp, J. (1979). Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field. *Proceedings of the Second Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Mexico*, pp. 173-186.
- Pérez P., R.F. (1996). Análisis de los mapas de potencial gravimétrico y magnético del sistema geotérmico Cerro Prieto, Baja California, México. Tesis de Licenciatura en Geofísica, Universidad Autónoma de Nuevo León. Inédito.
- Puente C., I, y De la Peña, A. (1979). Geología del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Proceedings of the First Symposium on the Cerro Prieto Geothermal Field, Baja California, Mexico*, pp. 17-37.
- Quintanilla, M. (1990). Caracterización tectónica del campo geotérmico de Cerro Prieto con base en el análisis petrológico y magnético del subsuelo. Tesis de Maestría en Ciencias, Centro de Investigación Científica y Estudios Superiores de Ensenada, B.C. Inédito.
- Siem, M. (1992). The structure and petrology of Sierra El Mayor, Northeastern Baja California, Mexico. Unpublished Master Thesis, University of San Diego State, California.

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.

Control de la Corrosión

M.L. Berndt y A.J. Philippacopoulos

Brookhaven National Laboratory, NY

Resumen extenso del artículo original, publicado en el *Bulletin del Geothermal Resources Council (GRC)* Volumen 33, No. 1, Enero - Febrero de 2004, reproducido con permiso del editor. Resumen y traducción por José Luis Quijano León.

El daño a las tuberías de acero por corrosión o erosión-corrosión en las instalaciones geotérmicas es un asunto común y, en ocasiones, costoso. En ambientes corrosivos severos la vida útil de las tuberías puede ser menor de cinco años e incluso de un año. Un programa general de prevención de la corrosión y mantenimiento incluye la selección de los materiales, detalles de diseño, uso de recubrimientos o inhibidores, modificación de la química de los fluidos, observación y uso de pruebas no destructivas. Este artículo trata sobre desarrollos recientes de pruebas no destructivas y técnicas de reparación que pudieran aplicarse a la industria geotérmica.

Pruebas no destructivas (PND)

Mediante métodos de PND se puede detectar la corrosión en sus etapas tempranas. El método seleccionado debe ser congruente con el tipo de proceso corrosivo. Algunos métodos son más adecuados para corrosión uniforme, otros para corrosión localizada. Un ejemplo de esta última es la corrosión por picaduras (*pitting*) aisladas o en racimos, o las estrías y hendiduras por erosión-corrosión.

La probabilidad de detectar la corrosión por picaduras mediante la medición puntual ultrasónica de espesor de tuberías es escasa. Además, el método es poco práctico para inspeccionar grandes longitudes de tuberías. Se requiere, más bien, un método que permita barrer tramos largos de tubería desde una localización, que no sea necesario remover grandes cantidades de recubrimiento aislante y que cubra el 100% del volumen inspeccionado. El método de ondas guiadas de largo alcance cumple con estos requisitos.

Los sistemas comerciales disponibles consisten en un anillo de transductores piezoeléctricos múltiples acoplados en forma seca, abrazado a la superficie externa del tubo, o una banda sensora "magnetostrictiva" que se envuelve alrededor de tubo. En el primer caso, los sensores piezoeléctricos se fijan en la localización deseada y, desde ahí, envían ondas en ambas direcciones y se reciben las señales reflejadas. El recubrimiento aislante sólo se retira en donde se fija el dispositivo. Es posible utilizar múltiples modos de onda. La onda reflejada se analiza para detectar las picaduras que aparecen como pinchos en la gráfica de amplitud vs distancia.

El alcance del método depende de diversos factores. El rango ideal es del orden de 50 m en ambas direcciones, pero puede alcanzar hasta 175 m. En arreglos complejos el rango es de 10 a 20 m. El límite de detección del defecto es de 5 a 10% del grosor del tubo. La temperatura máxima de operación varía de 70 a 160°C, por lo que puede usarse en sistemas de reinyección o en vaporductos fuera de servicio. Se puede obtener más información sobre este método en los sitios: www.guided-ultrasonics.com y www.plantintegrity.com.

El dispositivo magnetostrictivo consiste en dos conjuntos de bobinas inductivas que envuelven al tubo. La bobina transmisora genera un campo magnético variable que, a su vez, da lugar a la propagación de una onda

elástica en las paredes del tubo debida al efecto magnetostrictivo. Las ondas se propagan hasta 30 m en ambos sentidos. La segunda bobina se usa para detectar los cambios en la inducción magnética del tubo, debidos al efecto magnetostrictivo inverso una vez que la onda ha pasado. Con ello se obtiene una gráfica de amplitud vs distancia en la que se pueden detectar los defectos. Este dispositivo puede trabajar a altas temperaturas, siendo el límite la temperatura de Curie del material del sensor. Puede consultarse alguna información sobre sistemas comerciales en el sitio: www.mkckorea.com.

Evaluación de la resistencia remanente



Una vez que se han detectado y cuantificado los defectos, es necesario estimar la resistencia remanente de la tubería y predecir su vida útil. Existen varios métodos determinísticos que se aplican a tuberías bajo presión y corroídas por la parte externa. Algunos de ellos son: ASME B31G, RSTRENG 0.85dL, RSTRENG Effective Area y DNV RP-F101. Estos métodos usan expresiones matemáticas que relacionan algunos parámetros geométricos de los defectos con las propiedades mecánicas de la tubería y con otros factores.

Los métodos de elementos finitos se usan para analizar la influencia de diferentes tamaños y formas de defectos en la presión de falla del tubo. Las predicciones de estos métodos han sido comparadas con pruebas experimentales, resultando bastante exactas.

Adicionalmente, el método de diferencias finitas se usó para validar los métodos determinísticos. Se encontró que estos últimos subestiman la resistencia remanente de la tubería, lo cual podría llevar a reemplazarla antes de que sea necesario.

Otro aspecto interesante es la comparación entre corrosión interna y externa. Es decir, ¿un tubo con defectos de corrosión internos falla a la misma presión que un tubo con defectos externos? A primera vista la respuesta parece ser positiva, si las geometrías de los defectos y las propiedades de los materiales son las mismas. Sin embargo, la respuesta puede ser diferente si la geometría de la corrosión y la distribución espacial varían de manera más amplia. Estos casos pueden ser estudiados con diferencias finitas.

Métodos de reparación y su aplicabilidad

La tubería dañada puede ser reemplazada, reparada u operada a menor presión. La reparación en sitio ofrece grandes ventajas. El método tradicional, consistente en cortar el tramo dañado y soldar uno nuevo, puede ser sustituido por el uso de camisas externas rellenas de epoxi, abrazaderas y refuerzo compuesto.

Las tuberías geotérmicas se corroen en su interior, lo cual debe tenerse en cuenta al escoger el método de reparación. También debe considerarse que, una vez reparada la tubería, la corrosión puede continuar en el interior si no se modifica la química de los fluidos mediante alguna técnica como la inyección de inhibidores.

Las abrazaderas consisten, por lo común, de algún tipo de elastómero encasillado en camisas cilíndricas o en dos mitades de conchas. Las abrazaderas se sujetan con pernos a la tubería. Estas abrazaderas son adecuadas para reparaciones localizadas, no para tramos largos. La mayoría de los elastómeros comerciales no son capaces de soportar las temperaturas de los vaporductos. Existe un fluoro-elastómero, conocido como "Aflas" que puede soportar hasta 230°C durante tres meses. Otro elastómero para altas temperaturas es el "Paraflúor".

Las camisas rellenas de epoxi también se usan para reforzar tuberías con corrosión interna. El sistema consiste de dos mitades de concha de acero que se sueldan longitudinalmente y, posteriormente, se ligan con epoxi a la superficie externa del tubo. La lechada de epoxi sirve para transferir los esfuerzos del tubo a la camisa.

Las envolturas compuestas se están usando cada vez más en la reparación de tuberías. Estos materiales consisten de fibra de vidrio o carbón en una matriz de resina epóxica, poliéster o viniléster. Las fibras se entretajan con una fábrica direccional o al azar, lo que permite restablecer la resistencia axial y la tangencial. Esta tecnología puede aplicarse a tramos relativamente largos y a tuberías de grandes diámetros. El grosor de la envoltura es del orden de 1,5 cm. También pueden usarse en recipientes, venteos y otras estructuras.

Los métodos de aplicación de las envolturas pueden agruparse en dos: envoltura húmeda o vendaje previamente fraguado. En el primer caso, el refuerzo de entramado de fibra se impregna con resina y se envuelve alrededor del tubo, tensionando. La cara externa del tubo se prepara antes de la instalación. En el segundo caso, se tiene un rollo de vendaje previamente tratado con resina. Un extremo de la venda se fija al tubo con adhesivo y se continúa envolviendo el tubo, aplicando adhesivo entre cada capa de vendaje. Este método puede ofrecer un resultado más confiable que el método húmedo.

Las presiones máximas de operación son de 100 bar aproximadamente para las camisas rellenas de epoxi y de 50 bar para las envolturas compuestas. Sin embargo, las temperaturas máximas de operación de los sistemas comerciales son de alrededor de 150°C, lo cual limita su aplicación en vaporductos.

Otra alternativa son los recubrimientos internos. Estos han sido usados con éxito en tuberías de agua y de gas. En geotermia se deben tener en cuenta las temperaturas altas y las elevadas tasas de erosión. Un buen recubrimiento interno tendría la ventaja adicional de evitar o, al menos mitigar, la corrosión por un tiempo prolongado.

La decisión de reparar una tubería depende, en primer lugar, de una detallada evaluación del daño por corrosión, mediante pruebas no destructivas, en la que se determine la localización y geometría de los daños. También se debe estimar la probabilidad de aumento de los daños e identificar el mecanismo de corrosión. Con esta información se puede evaluar el método más adecuado, considerando las presiones y temperaturas de trabajo de las tuberías. Igualmente, debe evaluarse la capacidad de la tubería reparada de soportar los esfuerzos, especialmente si la corrosión continúa. Por último, se debe evaluar la viabilidad económica de la reparación, en función de la vida útil que se espera de la tubería reparada.

El Mundo de la Energía

(Con información recopilada por Alfredo Mañón Mercado)

□ El consumo de energía se duplicará en países en desarrollo

La demanda de recursos energéticos en los países en desarrollo casi se duplicará en las próximas dos décadas y seguirá basada fundamentalmente en combustibles fósiles, lo que provocará un importante aumento de las emisiones de CO₂. Esta es una de las principales conclusiones recogidas en el informe Perspectiva Internacional de Energía 2004 que dio a conocer la Administración de Información de Recursos Energéticos de Estados Unidos (EIA).

El informe estima que para 2025 el consumo mundial de recursos energéticos aumentará un 54% en promedio. En los países en desarrollo el aumento será del 91%, el cual se cubrirá sobre todo con carbón y otros combustibles fósiles, por lo que es posible que se registre un sustancial aumento en las emisiones de dióxido de carbono en el mundo, a pesar de los esfuerzos de los países industrializados para reducir sus propias emisiones. En los países de Europa Oriental y la ex Unión Soviética el consumo crecerá un 42%, mientras que en los países industrializados el ascenso estimado en el periodo considerado es de un 33%.

El consumo mundial neto de electricidad casi se duplicará, pasando de 13 290 millones de kWh en 2001 a 23 072 millones en 2025. El carbón seguirá siendo un importante componente en los mercados mundiales de electricidad y seguirá dominando muchos mercados de países asiáticos y en desarrollo. Para el gas natural, el pronóstico es un aumento del 67% en el periodo. También crecerá la generación de electricidad con energía nuclear en todo el mundo, pasando de 2 521 millones de kWh en 2001 a 3 032 millones en 2025.

En cuanto al consumo de petróleo, el informe estima que aumentará de 77 millones de barriles diarios en 2001 a 121 millones de barriles diarios en 2025. Estados Unidos, China y el resto de Asia

en desarrollo representan casi el 60% del crecimiento estimado del consumo mundial de petróleo.

El incremento en el uso de combustibles fósiles conllevará un sustancial aumento de las emisiones de CO₂ a la atmósfera, las cuales se estima que crecerán de 23 900 millones de toneladas métricas en 2001 a 27 700 millones en 2025.

El informe estima un crecimiento moderado en las energías renovables, que se deberá a la conclusión de proyectos hidroeléctricas actualmente en construcción en países en desarrollo, sobre todo de Asia. En el mundo industrializado, el principal incremento ocurrirá en la energía eólica.

El informe completo está disponible en:

<http://www.eia.doe.gov/oiaf/ieo/index.html>

□ Museo londinense de ciencia utilizará electricidad derivada de desechos humanos

El Museo de la Ciencia en Londres, Inglaterra, anunció su intención de usar excremento humano para generar energía eléctrica, a fin de economizar sus gastos y mostrar a los visitantes cómo se puede generar un recurso energético alternativo.



Cada año, cerca de tres millones de personas visitan el recinto y la mayoría utiliza los baños. El director del museo comentó que como la entrada es gratis, esta

sería una buena manera en la que los visitantes contribuyan a pagar la energía que consume el inmueble. Detalló que el proceso para generar el biogás se produce de la mezcla de gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica realizada por acción bacteriana en condiciones anaerobias y que termina generando electricidad.

Si este proyecto se concreta, generará alrededor de mil 530 kW de electricidad, suficientes para encender 15 mil lámparas todos los días, que en realidad son menos de las que iluminan al museo, pero que ayudarían a reducir sus costos.

Más información en:

<http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/3895975.stm>.

□ Plátanos para generar electricidad

Ingenieros australianos crearon un generador eléctrico alimentado por plátanos descompuestos y esperan construir una central de energía. Si todo sale de acuerdo con lo planeado, podría construirse una central de energía con capacidad para proveer electricidad a 500 viviendas.



Banana Power

En la actualidad, un tercio de la cosecha anual de 20 mil toneladas de la región australiana de Queensland se pierde porque la fruta es muy pequeña o está maltratada. El método a emplear es dejar que los

plátanos se descompongan en vasijas selladas y luego utilizar el gas metano que generan para mover una turbina eléctrica.

Sin embargo, los científicos reconocen que su tecnología tiene un defecto: se necesita una enorme cantidad de plátanos para generar una pequeña cantidad de energía.

Más información en:

<http://dsc.discovery.com/news/afp/20040830/banana.html>.

□ Empieza construcción de una planta solar termoeléctrica en Sevilla

La empresa española Abengoa inició en junio de 2004 la construcción de su planta solar termoeléctrica Sanlúcar Solar en el municipio de Sanlúcar La Mayor, Sevilla. Con una capacidad de 11 MW, será la más grande de Europa y la primera central solar de torre central del mundo de carácter comercial.

El proyecto supone una inversión de 33 millones de euros, de los cuales la Unión Europea aportará 5 millones y la Junta de Andalucía otros 1,2 millones. Además, cuenta con créditos reembolsables a bajo interés del Ministerio de Educación y Ciencia de España y de otras instituciones y bancos.

La central tendrá 624 helióstatos o espejos móviles, cada uno de 120 metros cuadrados de superficie, que reflejarán y concentrarán la luz del sol en un punto situado en una torre de más de cien metros de altura. El calor será aprovechado para producir vapor de agua a alta temperatura que moverá una turbina para producir electricidad. Al entrar en operación, en junio de 2006, se espera que generará 24 GWh al año, energía suficiente para abastecer a unas diez mil familias.

Esta central es sólo la primera de una serie de centrales termosolares que, según la empresa Abengoa, alcanzarán 100 MW de capacidad en los próximos siete años. Por lo pronto, esta empresa construirá también en las inmediaciones una central solar fotovoltaica de 1,2 MW.

Más información en: <http://www.abengoa.es>.

□ Alemania inaugura la mayor planta de energía solar del mundo

La mayor central de energía solar del mundo se ha inaugurado en la ciudad de Espenhain, cerca de Leipzig, Alemania. La planta ha sido construida sobre lo que fue una de las industrias más contaminantes de la antigua República Democrática Alemana. Con 33 500 paneles solares modulares monocristalinos y una capacidad instalada de 5 MW, la central será suficiente para abastecer a unos 1800 hogares.

La inversión para este inmenso parque solar ascendió a 20 millones de euros. Se estima que la planta de Leipzig evitará la emisión de 37 mil toneladas de dióxido de carbono cada año.

En el terreno de 16 hectáreas donde se levanta la planta se había construido en 1937 una central transformadora de lignito que llegó a generar el 7% de las emisiones totales de dióxido de azufre de ese país. La contaminación era tan nociva que algunos días la policía tenía que iluminar con antorchas los bordes de la carretera cercana a la fábrica para evitar accidentes. La antigua central fue derruida tras la reunificación alemana para convertirla en un vertedero, que recibió la calificación de "zona de desastre ambiental".

Más información en:

<http://www.elmundo.es/elmundo/2004/09/08/ciencia/1094657759.html>

❑ **Colector solar térmico como precalentador en planta carboeléctrica**

Un colector solar comercial para utilizarse como parte de una planta carboeléctrica, comenzó a producir energía a principios de junio de 2004 en el valle de Hunter, 250 km al noroeste de Sidney, Australia. Tiene una capacidad nominal de 1,2 MWt, y es el primero de tipo CLFR (*Compact Linear Fresnel Reflector*).

El colector CLFR cubre un área aproximada de 1800 m² y consta de varias filas de espejos planos que reflejan los rayos solares hacia un mismo plano fijo ubicado a una altura de 10 metros sobre el nivel del colector. En el plano de concentración, construido con materiales de alta absorción solar, se calienta agua hasta obtener vapor a una temperatura aproximada de 285°C. Este vapor se utiliza para precalentar el agua de alimentación que llega a la caldera. En consecuencia, se utiliza menos carbón para generar la misma cantidad de electricidad, reduciendo así las emisiones específicas de CO₂ de la planta.

Más información en:

<http://www.solarheatpower.com>

❑ **Irradiación de energía solar hacia la Tierra**

El proyecto *Space Solar Power*, en el que participan las agencias espaciales de Estados Unidos (la NASA), de la Unión Europea (la ESA), de Canadá (CSA) y de Japón (NASDA), tiene como objetivo evaluar la posibilidad de utilizar satélites para satisfacer la demanda energética mundial irradiando energía solar hacia la Tierra.

Entre los proyectos más avanzados que se presentaron en una reciente reunión en Granada, España, convocada por la ESA, destaca uno japonés de situar en órbita una minicentral solar de un costo similar a una terrestre. El proyecto ha sido probado con éxito en laboratorio, si bien para que llegue a ser realidad falta por desarrollar la tecnología que permita enviar a la Tierra toda esa energía (por microondas o láser).

Más información en:

<http://spacesolarpower.nasa.gov>

❑ **Avances en energía mareomotriz**

En Escocia se presentó un nuevo proyecto denominado *Sea Snail*, que consiste en una nueva turbina para producir energía eléctrica a partir de las mareas, desarrollada por la Universidad Robert Gordon de Aberdeen. El proyecto, que ha recibido una subvención de 229 mil euros, se encuentra en la fase de fabricación de un prototipo. La turbina medirá 20 metros de largo y se probará en aguas más o menos profundas.

En las costas de las islas Shetland, también en Escocia, se ha venido probando otro sistema de aprovechamiento de la energía de las mareas mediante una turbina llamada *Stingray*, inventada por la compañía escocesa Engineering Business, que es un aparato oscilante en el que las olas actúan sobre un colector montado encima de un brazo móvil. El aparato se instala en el fondo del mar, a profundidades de 20 a 30 metros.



Otra compañía, Abritish, ha inven-

un sistema de energía de marea simple que es relativamente fácil de instalar y tiene poco impacto en el ambiente. El sistema *TidEl* utiliza un par de turbinas flotantes que son ancladas con cadenas al fondo del mar. Los generadores subacuáticos operan en ambos sentidos de la corriente marina provocada por la marea, tendrán álabes de 15 metros de longitud y podrán generar cerca de 1 MW.

Más información en: <http://www.fco.gov.uk>

□ **Producción de hidrógeno a partir de aceite de girasol**

Investigadores británicos han desarrollado un método para la producción de hidrógeno de uso energético a partir de aceite de girasol. El sistema fue presentado en la última convención de la Sociedad Química Americana celebrada en agosto de 2004. El prototipo de generador utiliza aceite de girasol, vapor de agua y dos catalizadores, uno basado en níquel y otro en carbono. El hidrógeno obtenido es de una gran pureza (90%), produciéndose dióxido de carbono y metano como subproductos.

Las pilas o celdas de combustible de hidrógeno son unidades de energía basadas en este elemento, en el que muchos ven la energía del futuro, especialmente para su uso en automóviles.

Más información en:

<http://www.anl.gov/PCS/acsfuel/fuel2004.htm>.

□ **Generación de electricidad con flujo de gas por nanotubos**

Investigadores del Instituto Indio de la Ciencia, en Bangalore, demostraron en 2003 que el flujo de líquidos a través de nanotubos de carbón de una sola capa genera un voltaje en dirección del flujo. Este fenómeno es específico de los nanotubos de carbón, y no se presenta en grafito, por ejemplo.

Recientemente los mismos investigadores han demostrado un fenómeno similar en el flujo de gases en nanotubos de carbón. Sin embargo, en contraste con el flujo de líquidos, el efecto observado en gases no es exclusivo de nanotubos.

Los semiconductores también lo exhiben, lo cual se debe a una interacción del principio de Bernoulli y del efecto de Seebeck. Las diferencias de presión a lo largo de líneas aerodinámicas en el flujo de gas dan lugar a diferencias de temperatura a través de la muestra, que alternadamente producen un voltaje.

Más información en:

<http://www.nature.com/cgi-taf/>

□ **El “graviplano”**

En la convención de 2004 de la *National Business Aviation Association*, la compañía Hunt Aviation presentó su tecnología del “graviplano” (*gravityplane*). Es una tecnología híbrida que utiliza la gravedad y el viento para que una nave vuele sin combustible, permitiéndole despegues y aterrizajes verticales e inclusive amarizajes.

El graviplano crea un ciclo continuo entre dos fuerzas gravitatorias de efectos opuestos: a) la flotación, como fuerza ascendente, causada por el empuje gravitacional de la tierra que resulta mayor sobre la atmósfera que sobre el gas helio del interior del aparato, para ganar energía potencial por altura; b) la aceleración de la gravedad para lograr planear hacia abajo y hacia delante, convirtiendo así la energía potencial ganada en energía cinética. El avión puede alternar descensos y ascensos, mediante el simple procedimiento de extraer aire de la atmósfera del derredor y comprimirlo, ganando peso y perdiendo flotación, o expulsando a la misma atmósfera el aire comprimido para perder peso y ganar altura de nuevo.

El graviplano despega inicialmente al liberar helio que llena grandes bolsas en su interior. A cierta altura empieza a extraer y comprimir aire para ganar peso y descender, pudiendo planear grandes distancias por el diseño especial de sus alas. El navío lleva también unas turbinas de aire que permiten generar y almacenar energía eléctrica, que se emplea más tarde para bombear y comprimir el aire y para otros usos menores.

Más información en:

<http://www.fuellessflight.com>

XII Asamblea Anual de la Asociación Geotérmica Mexicana

Luis C.A. Gutiérrez-Negrín

El 5 de noviembre de 2004 se realizó la duodécima asamblea general ordinaria de la Asociación Geotérmica Mexicana (AGM) en Juriquilla, Qro., en el marco de la IV Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra (IV RNCT), celebrada del 31 de octubre al 5 de noviembre en el mismo sitio.

La IV RNCT fue convocada por la Sociedad Geológica Mexicana para conmemorar su centenario, y fue respaldada por otras nueve sociedades mexicanas de profesionistas relacionados con las Ciencias de la Tierra, una de las cuales fue la AGM. Resultó un éxito inesperado, ya que contó con más de 800 participantes. El libro de resúmenes de las ponencias contiene 745 trabajos, la mayor parte de los cuales se presentó en forma de conferencias orales o en tipo cartel. Las presentaciones orales se agruparon en cuatro simposia, 21 sesiones especiales y 14 sesiones regulares. Hubo trece pláticas magistrales e invitadas, una de las cuales fue Generación de Energía Eléctrica de Origen Geotérmico en México, presentada por Alejandro Abril Gaspar, actual presidente de la AGM.



La presidenta saliente de la AGM, Rosa María Barragán, y el presidente entrante, Alejandro Abril, durante la conferencia de este último.

La Sesión Especial 15 se dedicó a celebrar los Cien Años de Utilización de la Energía Geotérmica y fue organizada por la AGM. Se presentaron los trabajos técnicos siguientes:

1. Generación de energía eléctrica de origen geotérmico en México. A. Abril Gaspar.
2. Aplicación de los sistemas de información geográfica al campo geotérmico de Los Humeros, Estado de Puebla, México. J.G. Lara Cuero, C. Yáñez Gracia, R. Hernández Zúñiga y R.M. Prol Ledesma.
3. La energía geotérmica desde el inicio de la humanidad hasta el siglo XX. C. Suárez Arriaga.
4. Análisis de la actividad sísmica en el campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS. Y.T. Antayhua Vera, J.F. Lermo Samaniego, F. Romero Ríos, Y.I. Bernal

Esquia, D. Vega Rocha y M. Chavacán.

5. Modelado geoquímico de fluidos en el sistema hidrotermal costero de Bahía Concepción, Baja California Sur, México. R.E. Villanueva Estrada, R.M. Prol Ledesma, I.S. Torres Alvarado, C. Canet Miquel.

6. Aplicación del método inverso para una caracterización óptima de los campos geotérmicos de México. A. Hernández Ochoa.

7. Respuesta del yacimiento de Los Azufres, Michoacán, a la explotación. V.M. Arellano Gómez, M.A. Torres Rodríguez y R.M. Barragán Reyes.

8. Primera estimación de las reservas geotérmicas del Estado de Querétaro. E. Iglesias Rodríguez, R. Torres Rodríguez y J.I. Martínez Estrella.

9. Estudio de los efectos de la explotación del yacimiento de Los Azufres a través de la modelación de equilibrio químico de fluidos producidos durante 1998-2002. R.M. Barragán Reyes, V.M. Arellano Gómez, F. Sandoval Medina, S. Amaya Cruz y E. Tello Hinojosa.

10. Geoquímica de manantiales termales de la zona de Piedras de Lumbre, Chih., México. E. Tello Hinojosa.

11. Efecto de la compresibilidad en rocas consolidadas y no consolidadas. P. García Manuel y E. Contreras López.

Después de la sesión técnica se dio inicio a la asamblea de la AGM, conducida por la Presidenta saliente, Rosa María Barragán Reyes, bajo la agenda siguiente:



Miembros de la Asociación Geotérmica Mexicana asistentes a la asamblea de Juriquilla, Qro.

1. Lectura del acta aprobada de la XI Asamblea General Ordinaria.
2. Informe del Consejo Directivo saliente.
3. Informe del Tesorero de la AGM.
4. Elección del nuevo Consejo Directivo.

5. Toma de posesión del Consejo Directivo para el periodo 2005-2006.
6. Asuntos generales.

Previamente a la asamblea se habían distribuido las boletas de votación para el nuevo consejo directivo. De acuerdo con los estatutos de la AGM, el Vicepresidente en funciones ocupa el cargo de Presidente en el periodo inmediato siguiente, por lo que la membresía debe votar por los puestos de vicepresidente, secretario, tesorero, prosecretario y protesorero. Se eligió a dos escrutadores para contabilizar los votos, quedando integrado el Consejo Directivo 2005-2006 de la manera siguiente:

Presidente: Alejandro Abril Gaspar (CFE)
Vicepresidente: José Luis Quijano León (CFE)
Secretario: Rogelio Vázquez González (CICESE)
Tesorero: Luis C.A. Gutiérrez Negrín (CFE)
Prosecretario: Alfonso García Gutiérrez (IIE)
Protesorero: Octavio Lázaro Mancilla (UABC)

Después de la toma de protesta, Alejandro Abril, flanqueado por parte de los nuevos consejeros, expresó su satisfacción por la oportunidad de encabezar a la asociación, y manifestó su compromiso por continuar su fortalecimiento, manteniéndose abierto a las diversas propuestas que fueron presentadas en el último punto de asuntos generales.

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, 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, 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.