

NOTICE CONCERNING COPYRIGHT RESTRICTIONS

This document may contain copyrighted materials. These materials have been made available for use in research, teaching, and private study, but may not be used for any commercial purpose. Users may not otherwise copy, reproduce, retransmit, distribute, publish, commercially exploit or otherwise transfer any material.

The copyright law of the United States (Title 17, United States Code) governs the making of photocopies or other reproductions of copyrighted material.

Under certain conditions specified in the law, libraries and archives are authorized to furnish a photocopy or other reproduction. One of these specific conditions is that the photocopy or reproduction is not to be "used for any purpose other than private study, scholarship, or research." If a user makes a request for, or later uses, a photocopy or reproduction for purposes in excess of "fair use," that user may be liable for copyright infringement.

This institution reserves the right to refuse to accept a copying order if, in its judgment, fulfillment of the order would involve violation of copyright law.

ESTUDIOS PRELIMINARES DE MODELADO DEL CAMPO GEOTERMICO DE LOS AZUFRES: CONVECCION LIBRE EN TEJAMANILES

Mario César Suárez Arriaga

Comisión Federal de Electricidad,
México

Karsten Pruess
Marcelo Lippmann

Earth Sciences Division
Lawrence Berkeley Laboratory
Berkeley, California U.S.A.

RESUMEN

Se está desarrollando un modelo conceptual cuantitativo del sistema hidrotermal Los Azufres, México. Efectuamos simulaciones numéricas del yacimiento con el propósito de investigar algunos aspectos particularmente importantes de ese campo. Aquí presentamos aplicaciones del mecanismo de contraflujo líquido-vapor en "calor ducto" (heat pipe) para explicar el estado inicial y la transferencia de calor dentro del reservorio en zonas bifásicas de líquido o vapor dominante respectivamente durante diferentes estados "naturales" de una sección simétrica idealizada de falla. Se incluyen efectos de bióxido de carbono y de difusión binaria en la fase gaseosa. Exhibimos soluciones para un "estado natural en equilibrio" entre el líquido, el vapor y el CO_2 , balanceados por una inyección constante de calor proveniente de las profundidades del sistema; así como para un sistema con pequeñas descargas por fracturas y fisuras a través de la capa sello. Este último caso incorpora la recarga de fluido multicomponente desde el fondo de la falla. Finalmente mostramos la reproducción por el modelo de los perfiles verticales de presión, temperatura y contenido másico relativo de CO_2 observados en Los Azufres. De ahí deducimos un perfil de saturación del vapor y presión parcial del bióxido de carbono para la zona sur de este yacimiento.

INTRODUCCION

Los Azufres es un yacimiento hidrotermal volcánico contenido dentro de un sistema geológico andesítico con presencia de varias fallas e intenso fracturamiento. Se localiza en el estado de Michoacán, dentro del Eje Neovolcánico Mexicano (al W), a unos 2800 metros sobre el nivel del mar. Está situado en una sierra del mismo nombre, delimitada por valles situados a unos 400 metros abajo de la altitud promedio del campo. El área actualmente explorada por técnicas geológicas, geofísicas y geoquímicas abarca una extensión de aproximadamente 60 km^2 (Fig. 1).

El yacimiento fue descubierto en 1972 durante las primeras exploraciones geológicas. En 1976 la CFE, o Comisión Federal de Electricidad, perforó el primer pozo exitoso Az-01. Hasta el día de hoy se han perforado unos 60 pozos cuyas elevaciones de cabezales varían entre los 2700 y los 3200 msnm. El pozo más somero (Az-41) tiene 452 m de profundidad y el más profundo (Az-44), 3544 m. Con una

capacidad instalada de 80 MWe Los Azufres es el primer campo geotérmico mexicano que produce electricidad a partir de fluidos saturando roca volcánica fracturada. Desde el punto de vista de producción eléctrica, es el segundo en importancia después de Cerro Prieto.

Tejamaniles, el sector sur de Los Azufres está en observación y estudio a fin de detectar tempranamente su comportamiento y respuesta a la extracción constante de 250 kg/s de masa de vapor. El personal de Los Azufres ha acumulado

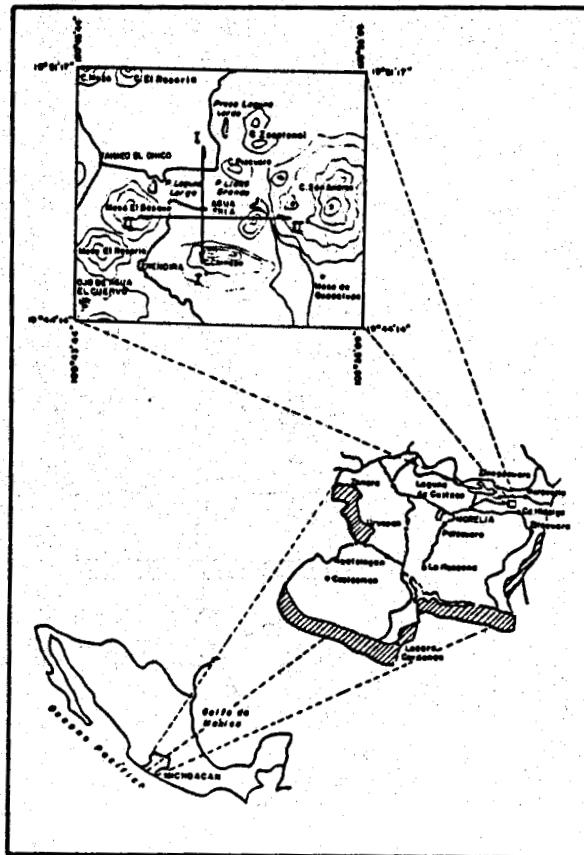


Figura 1. Localización del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México.

gran cantidad de datos durante los últimos 14 años; información que está siendo computarizada (Suárez, 1988). Paralelamente se desarrolla un modelo conceptual cuantitativo integrado del campo mediante la aplicación de técnicas de mineralogía, geoquímica, geofísica y de ingeniería de yacimientos.

A pesar de la gran cantidad de datos existentes, un cuidadoso análisis de registros de presión y temperatura, gases no condensables y datos de producción, muestra muy poca o ninguna estructura temporal. Eso sugiere que el sistema hidrotermal global permanece aún en estado natural quasi-estacionario y que las evoluciones observadas corresponden a efectos muy locales en algunos de los pozos conectados a plantas portátiles (Kruger y o., 1985; Suárez y o., 1986; Hirart, 1988). Por consiguiente en este nivel de desarrollo del campo es muy importante la determinación cuantitativa del estado termodinámico natural del yacimiento, con el objeto de poder comparar su futuro comportamiento durante la explotación más intensa (una planta de 50 MWe empezó a operar a fines de 1988).

En Los Azufres, al igual que en otras regiones geotérmicas, energía térmica es descargada en la superficie. En parte este calor es transferido por conducción y en parte por medio de flujo de fluido multicomponente proveniente del yacimiento. Puentecillas, una falla principal de Tejamaniles, tiene pozos con la más alta calidad de vapor del campo (Figs. 2

y 3). Los gradientes verticales de presión y temperatura medidos son relativamente pequeños; no obstante hay descargas de vapor, gas y calor observables en la superficie del terreno. Este transporte de masa y energía no puede ser explicado por la sola teoría conductiva; un transporte bifásico convectivo debe ocurrir. En este artículo ofrecemos una explicación numérica plausible para esta transferencia de energía térmica por medio de un modelo simplificado de "caloducto" (heat pipe). Este modelo conceptual corresponde a un medio vertical poroso o fracturado, en el cual el calor es transportado desde el fondo por vapor ascendente, el cual se condensa en el techo, expulsando su energía interna; el líquido condensado desciende hacia el fondo para evaporarse nuevamente.

Este mecanismo ha sido descrito y reportado por varios autores: White y o. (1971), Truesdell y White (1973), Nathenson (1975), Pruess (1985), Pruess y o. (1987), McKibbin y Pruess (1988), Iglesias y Arellano (1988). Aquí presentamos la simulación de una porción de Tejamaniles como si fuese un caloducto en medio poroso, incluyendo los efectos del bióxido de carbono y los de la difusión binaria de vapor y CO₂ en la fase gaseosa. Presentamos soluciones relativas a estados naturales casi estacionarios del fluido saturando a una región de falla en Tejamaniles con inyección de calor y descarga másica a través de pequeñas fracturas y fisuras en la capa sello, incluyendo recarga de fluido proveniente de niveles profundos.

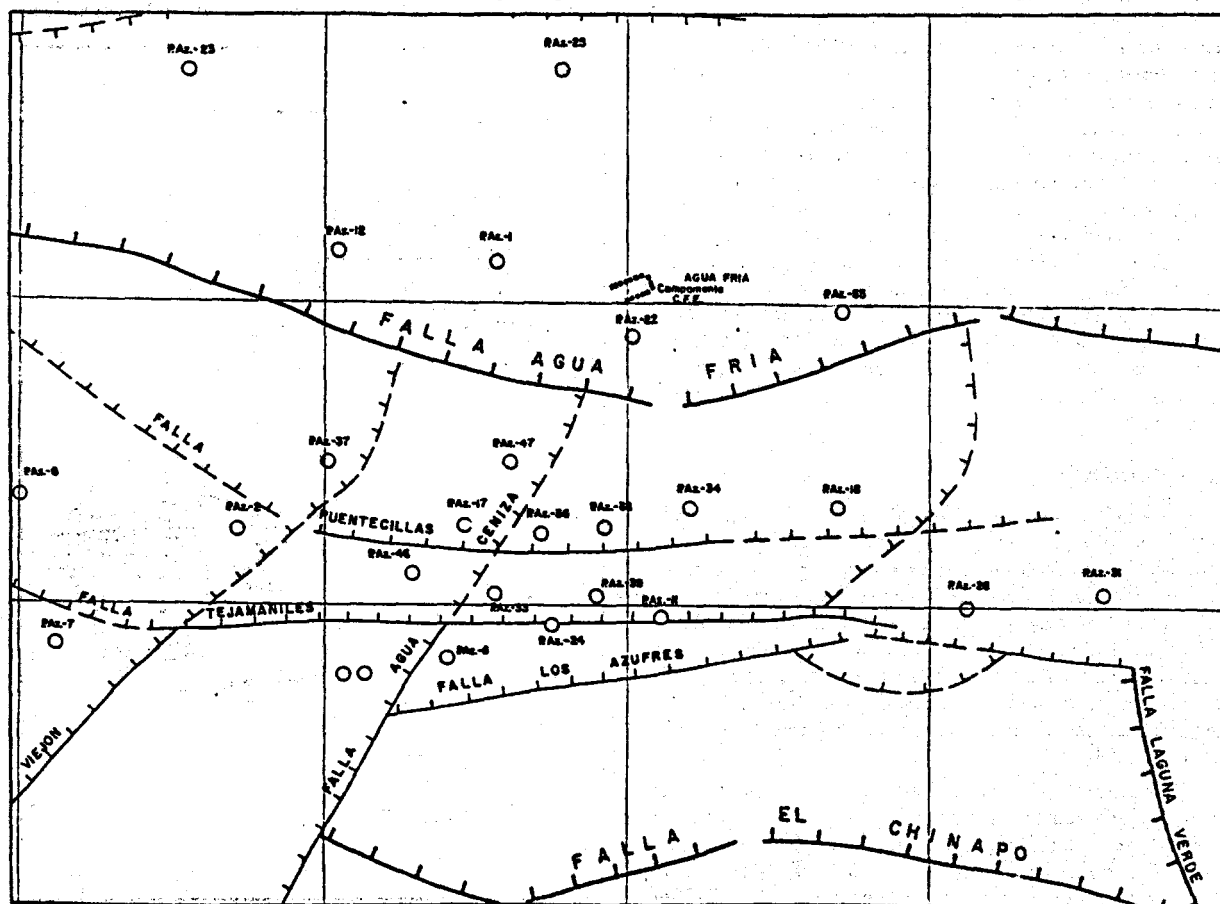


Figura 2. Plano de la zona sur de Los Azufres (Tejamaniles).

BREVE DESCRIPCION DEL CAMPO

La geología, geoquímica y mineralogía del campo han sido descritas y actualizadas en varios reportes internos de la Comisión Federal de Electricidad y en algunas publicaciones internacionales (Gutiérrez y Aumento, 1982; De La Cruz, 1984). Dicho brevemente, el yacimiento consiste en una compleja serie de unidades andesíticas de diversas texturas con presencia de riolitas en los niveles superiores. La disposición de minerales de alteración hidrotermal sugiere una posible geometría del reservorio consistente en un yacimiento principal profundo que descarga fluidos en ascenso a través de dos volúmenes circulatorios en convección libre estrechamente relacionados a sendos subsistemas fracturados que definen dos zonas geotérmicas interconectadas: Marítaro al norte y Tejamaniles al sur, (Cathelineau y o., 1985; Viggiano, 1987).

Una zona central de alta resistividad separa las porciones norte y sur del campo. En ella, a niveles someros, la alteración hidrotermal es muy baja pero, a mayor profundidad (>1800 m), aparece una continuidad de alteración hidrotermal uniendo

ambas zonas. Esta es una prueba preliminar de la existencia de un acuífero profundo que cubre el área asignada al reservorio. El gradiente geotérmico anormal del campo engendra una estructura dómica central suave deformada por la alteración hidrotermal causada por fluidos ascendentes, produciendo dos zonas principales de alteración y descarga. En Tejamaniles esta zona de circulación es estrecha y genera fumarolas, plumas de vapor, lagos de lodo y suelos vaporizantes. Estas manifestaciones superficiales se encuentran esparcidas entre las fallas de Agua Fría y Los Azufres (Fig. 2).

Datos de entalpía y geoquímica muestran que la evaporación ocurre dentro del yacimiento (Nieva y o., 1983). La composición química del fluido alimentador no es la misma en todos los pozos del campo, lo cual sugiere que hay secciones productoras diferentes en varios niveles. No hay evidencias isotópicas de que ocurra alguna mezcla de agua meteórica o de acuíferos superficiales con el fluido geotérmico; por tanto debe haber una capa sello y la posible recarga, de existir, debe ser lateral y profunda.

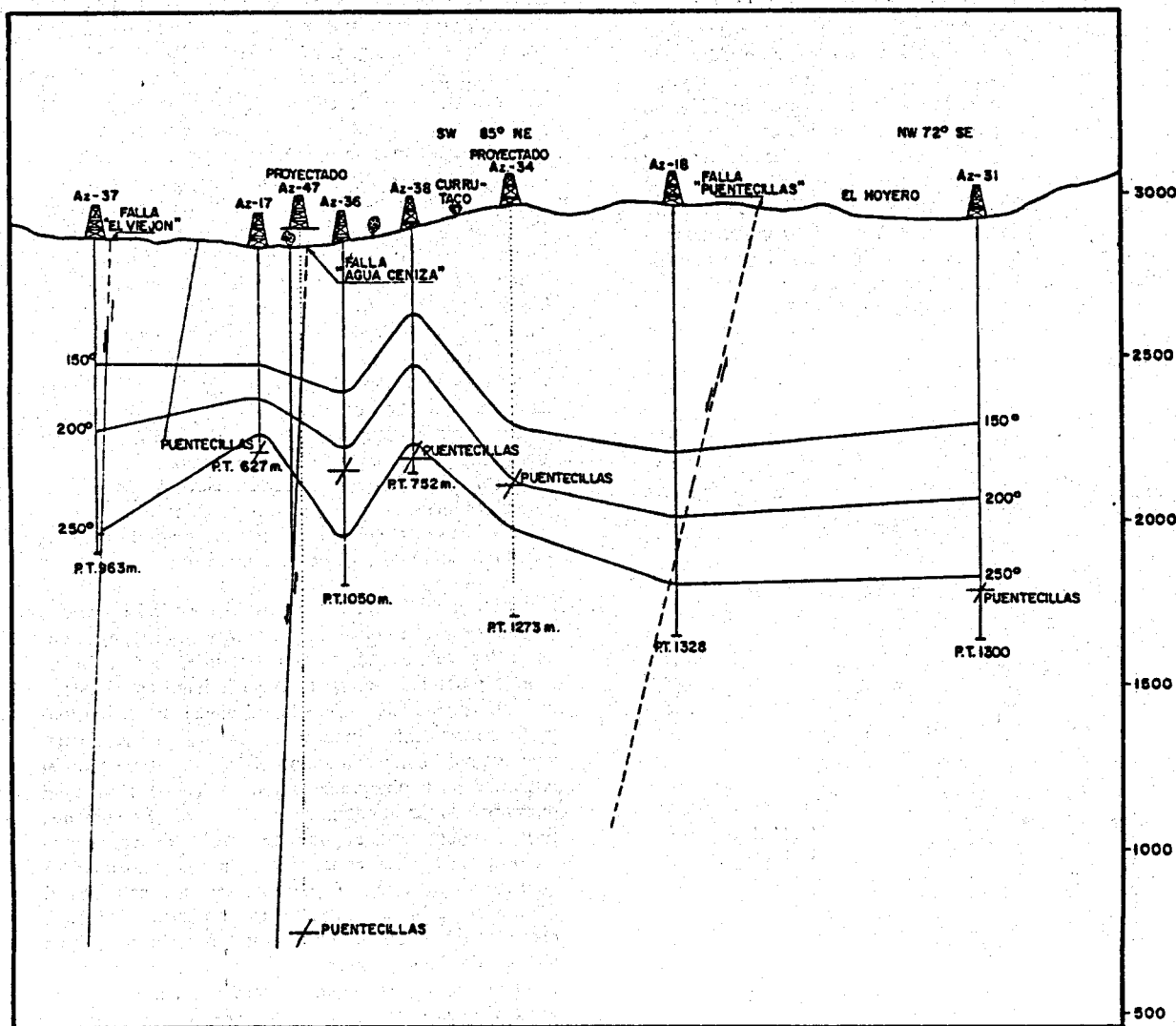


Figura 3. Algunas isotermas en Tejamaniles.

La fracción másica de CO₂ contenida en el fluido producido es distinta en diferentes pozos. Varía entre 0.2% (pozo Az-4) y 8.5% (pozo Az-34) con la descarga de vapor a una presión de separación de 10 bar (Quijano y o., 1987). El contenido más alto de CO₂ se ha encontrado en pozos someros de alta calidad de vapor localizados en la vecindad de la falla Puenteillas. En esa área hay un gradiente en la concentración de CO₂, positivo en dirección W-E. El análisis de datos geoquímicos del campo (Quijano y o., 1987; Nieva y o., 1987) muestra que la concentración de componentes volátiles del fluido (e.g., CO₂) decrece con la profundidad, y la concentración de componentes no volátiles (e.g. ión cloruro), se incrementa.

La figura 4 muestra la distribución vertical de la fracción másica de CO₂ disuelta en el líquido y en el vapor calculada por Nieva y otros (1987) a partir de datos de varios pozos de Los Azufres. El esquema puede explicarse por un proceso resultante de un flujo vertical ascendente acompañado de condensación parcial de vapor con liberación de calor. El mismo mecanismo puede explicar la distorsión de isotermas mostradas esquemáticamente en la figura 3: la pendiente negativa de la curva correspondería a la trayectoria "fría" del líquido en descenso, mientras que la pendiente positiva podría ser la trayectoria "caliente" del vapor en ascenso. Esta imagen concuerda bien con el modelo mineralógico exhibido en la figura 5. Las figuras 6 y 7 muestran los perfiles de presión y temperatura medidos en varios pozos de Tejamaniles. En ellas se aprecia claramente que a partir de los 1600 msnm y hasta los 2250 msnm, sus gradientes son pequeños indicando una distribución de propiedades termodinámicas vaporestáticas; mientras que entre 0 y 1550 msnm esa misma distribución corresponde a condiciones hidrostáticas ebullentes.

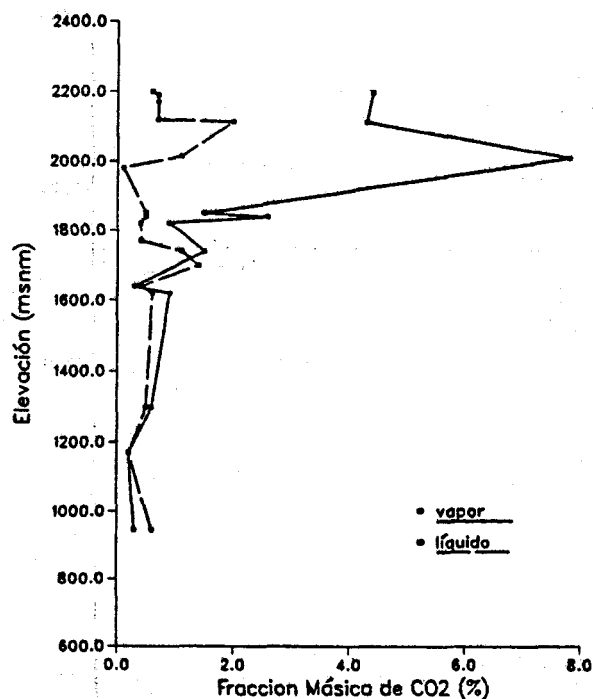


Figura 4. Perfil de CO₂ (fracción másica) en Los Azufres.

PREVIOS MODELOS PARA LOS AZUFRES

Se han hecho varios estudios preliminares de simulación para este campo tanto por personal de CFE como por algunas instituciones externas y que sólo se han reportado internamente (Suárez, 1985). El objetivo principal de esos trabajos fue el de estimar el contenido másico-energético y la posible longevidad del sistema sujeto a explotación comercial. La conclusión general de tales estudios fue que el yacimiento puede tener suficiente potencial para generar 110 MWe durante 20 años.

Por otra parte, E. Iglesias, V. Arellano y colaboradores (1985a, 1985b, 1986, 1988) han realizado trabajos sustanciales y detallados sobre el flujo vertical unidimensional de fluido y calor en el yacimiento de Los Azufres. Un vistazo general sobre esos estudios puede resumirse como sigue:

- (a) Han elaborado un método simple para determinar las distribuciones naturales de presión y entalpía en reservorios bifásicos con aplicación a Los Azufres (Iglesias y o., 1985a). El método consiste básicamente en analizar datos de producción para estimar la presión y entalpía fluente en el intervalo productor de 4 pozos de Maritaro (Az-4, 9, 28 y 41) y 6 en Tejamaniles (Az-31,33,34,35,36 y 38). Estos valores, dependientes de los gastos, son extrapolados a condiciones de cierre obtenidas por registros de presión. Para separar la información del pozo mezclada con la de la formación se emplea un simulador numérico de pozo; de esta forma se estima la presión y entalpía fluyentes de la formación. Los resultados son: En el sector sur de Los Azufres el fluido que alimenta a la mayoría de los pozos analizados es bifásico en estado natural. La calidad de vapor no es homogénea sino que varía entre 0% y 90%. El fluido en el sector norte en su estado natural, es 100% líquido. Suponiendo que los pozos estudiados sean representativos de todo el sistema, el perfil vertical de la presión del fluido es representado aproximadamente por un perfil ebullente casi hidrostático (boiling-point-to-depth) desde el fondo del yacimiento hasta unos 1800 msnm. De este punto hacia arriba existe un perfil de presión vertical característico de sistemas de vapor dominante. Los resultados permiten a los autores sugerir la existencia de un nivel piezométrico profundo, extendido sobre unos 12 km² a 1100 msnm.
- (b) A partir del análisis de datos provenientes de 23 pozos (8 en el norte y 15 en el sur), Iglesias y otros (1985b) calcularon los valores de presión, entalpía, saturación de líquido y calidad de vapor del yacimiento en su estado natural. Su análisis sugiere la existencia de un acuífero profundo caliente, extenso, sin recarga superficial significativa. Una capa sello debe existir sobre todo el sistema y puede observarse la transición entre la parte del reservorio de líquido dominante, a la de vapor dominante. El yacimiento, desde el punto de vista hidráulico, es continuo de sur a norte, conclusión acorde con los modelos químico y mineralógico. Bajo condiciones naturales el líquido comprimido profundo asciende hasta los 1200 msnm en donde empieza a ebulir formando una región bifásica de líquido dominante, que se extiende hasta los 1700 msnm. En ese punto se forma una nueva región vertical bifásica de vapor dominante extendida hasta los 2400 msnm; de ahí el vapor sobrecalentado fluye hacia la superficie a través de fracturas en la capa sello. Los

autores concluyen que el sistema hidrotermal es probablemente joven, en o cercano al estado de equilibrio. Por lo tanto la recarga natural puede estimarse en términos de la descarga natural. El llamado "domo de vapor" resulta ser en realidad una zona bifásica con una alta calidad de vapor como fase dominante.

- (c) En un documento posterior, Iglesias, Arellano y Ortíz (1986), basándose en un modelo de caloducto unidimensional, estimaron las tasas de flujo de masa y energía, la permeabilidad y las funciones de permeabilidad relativa para Los Azufres. Estos nuevos resultados verifican las conclusiones de estudios anteriores. El mejor ajuste del gradiente de presión natural implicó una permeabilidad de 0.08 md, una saturación de líquido residual de 0.04 y una saturación nula de vapor residual. Para obtener el ajuste se requirió el uso de funciones de permeabilidades relativas de fractura con $k_{rl} + k_{rg} = 1$ (Grant y o., 1982). Las tasas de flujo de masa y energía calculadas resultaron iguales a $6.9 \times 10^{-8} \text{ kg/s/m}^2$ y 0.2 W/m^2 respectivamente. Considerando un área de 30 km^2 , infirieron una descarga térmica natural de unos 6 MW para todo el campo.
- (d) En reciente publicación, Iglesias y Arellano (1988) propusieron una nueva categoría de sistemas naturales hidrotermales intermedios entre líquido-dominante y vapor-dominante, que se caracterizan por un perfil de presión "VAPLIQ", el cual es casi vaporestático en las porciones someras del sistema y casi hidrostático ebullente en profundidad. Consideran a Los Azufres como el prototipo de este nuevo tipo de sistemas y con el apoyo de un modelo vertical unidimensional establecen que una condición necesaria para la existencia de sistemas hidrotermales bifásicos es la de que el flujo térmico vertical deba ser mayor que un valor mínimo fijo dependiente solamente de la presión y de la conductividad térmica en el punto de ebullición del sistema. Este valor mínimo es típicamente de 1 a 4 veces el valor promedio del flujo térmico terrestre. Bajo esta perspectiva un mecanismo de caloducto sólo puede existir si el correspondiente flujo de calor excede ese valor mínimo y la permeabilidad vertical en el punto de ebullición del sistema es menor que

un parámetro dependiente a su vez de la presión y conductividad térmica del reservorio en el punto de ebullición. Este parámetro varía entre $1 \text{ y } 3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$. Sus estimaciones de valores para Los Azufres son:

$$\begin{aligned} \text{Flujo Térmico Vertical} &= 0.128 \text{ W/m}^2 \\ \text{Flujo Másico Vertical} &= 8.26 \times 10^{-10} \text{ kg/s/m}^2 \\ \text{Permeabilidad del punto ebullente} &= 1.5 \times 10^{-19} \text{ m}^2 \\ \text{Permeabilidad zona vapor dominante} &= 1.0 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

SIMULACIONES NUMERICAS DEL ESTADO ESTABLE

Para comprender el comportamiento del reservorio de Los Azufres efectuamos simulaciones numéricas hasta obtener un estado termodinámicamente estable que ya no evolucione con el tiempo. Durante estos estudios tratamos de utilizar datos e información real de campo pero, con frecuencia, esto ha sido difícil porque muchos datos importantes son preliminares o incompletos. El principal objetivo de este trabajo es el de mostrar un proceso físico razonable acorde con aspectos observables del yacimiento, en vez de tratar de reproducir detalles particulares medidos con grados desconocidos de certidumbre (Suárez, 1987).

Con el propósito de modelar numéricamente una porción de la falla Puentecillas en Tejamaniles, idealizamos su compleja geología con la creación de un volumen simétrico vertical unidimensional dividido en 29 elementos volumétricos dispuestos así (Fig. 8): 25 elementos sucesivos (HTP01 al HTP25) representan a la falla conductiva, unidos por un área unitaria de contacto permeable de 20 m de espesor cada uno. El elemento HTP25 simula el fondo de la columna de andesitas en contacto con el acuífero profundo. El elemento HTP01 es el contacto del "caloducto poroso" con la capa sello, la cual es representada por 4 elementos: FRT00, FRT01, FRT02 y FRT03 con las dimensiones indicadas en la figura 8. El bloque FRT00 queda en contacto con la atmósfera simulada por un enorme volumen a las condiciones atmosféricas promedio de Los Azufres ($T = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $P = 0.73 \text{ bar}$).

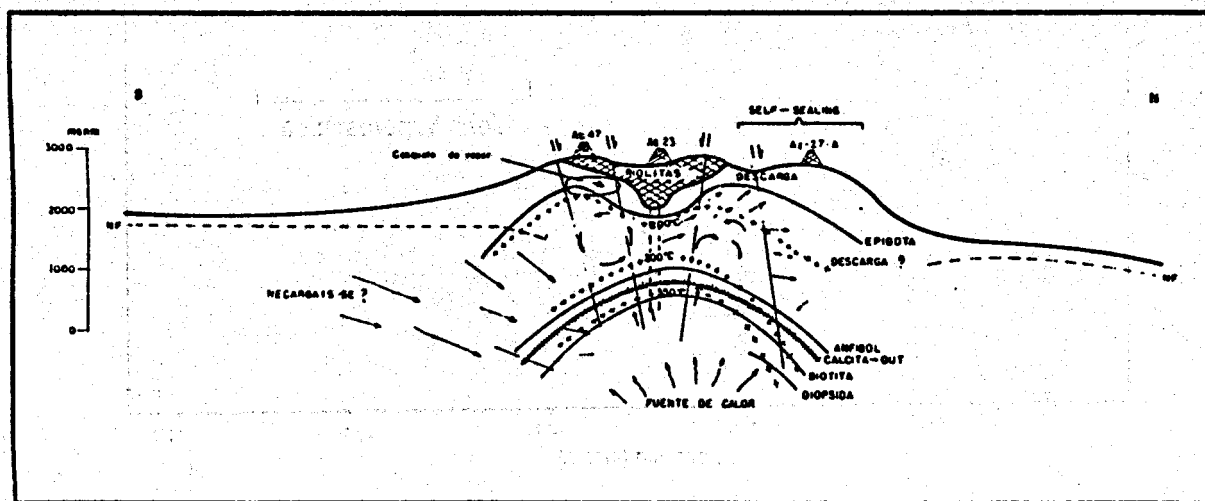


Figura 5. Modelo mineralógico de Los Azufres.

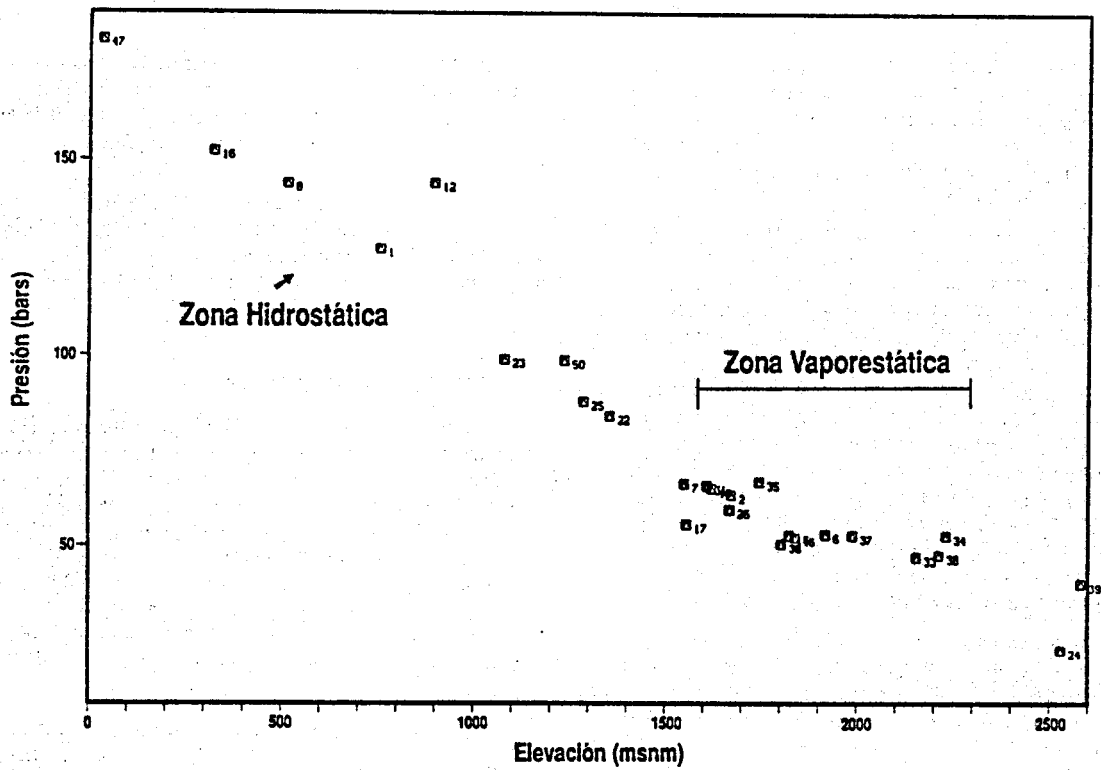


Figura 6. Perfil de presiones en Tejamaniles.

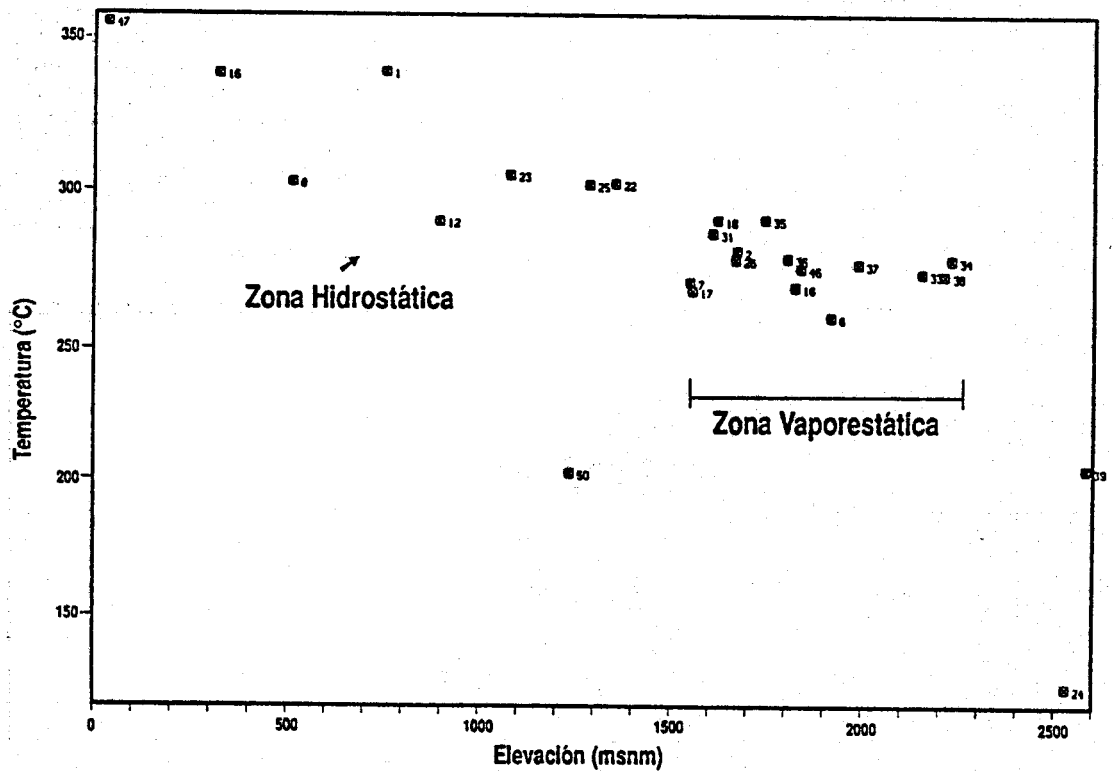


Figura 7. Perfil de temperaturas en Tejamaniles.

Los perfiles observados de presión y temperatura se muestran en las figuras 6 y 7. El flujo total de calor es dado por:

$$Q_t = Q_{cond} + Q_{conv}$$

Con,

$$Q_{cond} = \lambda \cdot dT/dz = (1.79 \text{ W/m}^\circ\text{C}) \cdot (0.007 \text{ }^\circ\text{C/m}) = 0.013 \text{ W/m}^2$$

para valores $z > 1600$ msnm (región de vapor dominante). Este valor corresponde a un flujo de calor conductivo pequeño y es 10 veces menor que el promedio del Eje Neovolcánico Mexicano (García, 1983). El flujo total de calor en la superficie de Los Azufres nunca ha sido medido. Al oeste de la falla Puentecillas la profundidad de la isoterma de $150 \text{ }^\circ\text{C}$ es entre 250-300 m, que corresponde a un gradiente vertical de temperatura de aproximadamente $0.5 \text{ }^\circ\text{C/m}$, y a un flujo conductivo de calor cerca de la superficie de unos 0.9 W/m^2 . Hemos supuesto un flujo total de calor vertical promedio igual a 1 W/m^2 . Esto implica un $Q_{conv} = 0.987 \text{ W/m}^2$ para la región superior de vapor dominante del sistema. Se realizaron varias simulaciones correspondientes a diferentes condiciones de frontera: inyección de calor en un sistema cerrado (Caso 1); inyección de calor y fluido ($\text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$) con descarga a través de fisuras en la capa sello (Casos 2 y 3). La falla fue idealizada como una matriz porosa con pequeñas fracturas para obtener una permeabilidad vertical efectiva de 10^{-17} m^2 en la capa sello y $50 \times 10^{-15} \text{ m}^2$ en el reservorio.

La mayor parte de los parámetros empleados en los cálculos se obtuvieron de datos reales medidos en campo (Suárez, 1985; Contreras y o., 1988) exhibidos en la Tabla 1. Los cálculos se hicieron con MULKOM, el simulador multicomponente desarrollado en el Laboratorio de Lawrence Berkeley, con una ecuación de estado para agua-dióxido de carbono (Pruess, 1988; O'Sullivan y o., 1985).

DISCUSION DE RESULTADOS

La simulación principia asumiendo condiciones termodinámicas homogéneas en todo el sistema (ver Tabla 1). En respuesta a la inyección de calor desde el fondo el sistema pasa por una evolución transiente, alcanzando eventualmente un estado estable. Las condiciones del estado estable logrado en el Caso 1 se usaron como condiciones iniciales para los Casos 2 y 3, los cuales incluyen recarga y descarga de fluido a través de las fronteras inferior y superior respectivamente. Los resultados numéricos para los tres estados estables alcanzados se exhiben en las figuras 9 a 14.

El Caso 1 presenta un calor ducto de vapor dominante sobrepuesto a otro calor ducto de líquido dominante. Esto es evidente en la discontinuidad del perfil de presiones cerca de los 650 m de profundidad (Fig. 9) y asociada a la aguda caída en la saturación de vapor (Fig. 10). En contraste, los Casos 2 y 3 muestran un perfil de presiones casi hidrostático en el yacimiento y una baja saturación de vapor indicativa de condiciones de predominio del líquido. Los gradientes de presión en la capa sello son mayores en los Casos 2 y 3, lo cual se requiere para poder mantener la descarga de fluido hacia la atmósfera. A causa de la mayor hermeticidad de la capa sello, las más altas presiones ocurren en el Caso 3. Un hecho interesante en el Caso 1 es el desarrollo de un calor ducto de vapor dominante "parásito" en la capa sello arriba de la zona de condensación, a

la altura de la frontera con el reservorio (Fig. 10). En la capa sello los gradientes de temperatura son esencialmente conductivos en todos los casos y más pequeños abajo en el yacimiento permeable (Fig. 11). La figura 12 muestra que las presiones parciales del CO_2 son pequeñas en la mayor parte del reservorio, incrementándose hasta altos valores en la zona de condensación. Esta observación concuerda con los resultados obtenidos por McKibbin y Pruess (1988), quienes notaron que el CO_2 tiende a acumularse en la zona de condensación, en el techo del calor ducto. Las presiones parciales del CO_2 son grandes a través de la capa sello. Los Casos 2 y 3 incluyen los efectos de la difusión CO_2 -vapor, que se habían despreciado en el Caso 1. La figura 12 muestra que la difusión binaria tiende a incrementar la presión parcial del CO_2 hasta cierta profundidad en el yacimiento debajo de la zona de condensación.

En las figuras 13 y 14 se presenta una comparación con datos de campo. Se observa que los resultados del Caso 1 con-

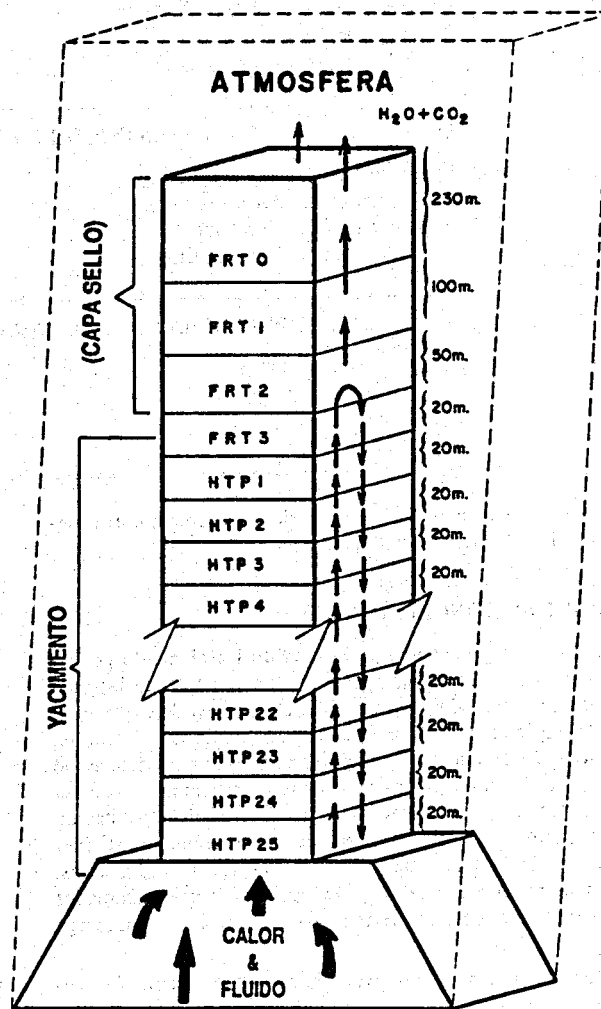


Figura 8. Modelo geométrico de una porción de falla en Tejamaniles. El calor y fluido provienen del acuífero profundo de líquido comprimido por debajo del elemento HTP25.

TABLA 1. PARAMETROS PARA LAS SIMULACIONES NUMERICAS

PARAMETROS PETROFISICOS	VALOR
Espesor de la Capa Sello	400 m
Espesor del Yacimiento	500 m
Densidad de Roca en Capa Sello	2150 kg/m ³
Densidad Matriz del Yacimiento	2300 kg/m ³
Permeabilidad Capa Sello	1.0 × 10 ⁻¹⁷ m ²
Permeabilidad Yacimiento	50 × 10 ⁻¹⁵ m ²
Porosidad en Capa Sello	0.01
Porosidad del Yacimiento	0.10
Conductividad Térmica de Roca	1.79 W/m°C
Calor Especifico de Roca	1165 J/kg°C
PARAMETROS DEL FLUIDO	VALOR
Presión Capilar	despreciable
Exponente de Difusión Binaria	1.8
Coefficiente Difusividad del Vapor	1.38 × 10 ⁻⁵ m ² /s
Saturación Residual de Líquido	0.30 (Corey)
" " " Vapor	0.05 (Corey)
CONDICIONES INICIALES	VALOR
Presión Total Inicial	40.0 bar
Temperatura Inicial	242.5 °C
Saturación Inicial de Vapor	0.35
Presión Parcial Inicial de CO ₂	5.0 bar
PARAMETROS DE INYECCION/DESCARGA	VALOR
Inyección de Calor	1.0 W/m ² (Casos 1,2,3)
Inyección de Agua	1.0 × 10 ⁻⁷ kg/s (Casos 2,3)
Inyección de CO ₂	5.0 × 10 ⁻⁹ kg/s " "
Extracción de Fluido	1.0 × 10 ⁻⁷ kg/s (Caso 2)

cuerdan razonablemente con las presiones y temperaturas medidas en Los Azufres, sector sur.

SUMARIO Y CONCLUSIONES

El campo geotérmico de Los Azufres está regido por un mecanismo de transferencia de calor proveniente de las profundidades y que ocurre a través de un proceso de contraflujo líquido-vapor conocido como "calorducto". Hemos iniciado un estudio de las condiciones termodinámicas naturales del campo por medio de simulaciones numéricas de secciones verticales idealizadas, unidimensionales. Los parámetros de la formación y las condiciones fueron escogidas representando el área alrededor de la falla Puentecillas en el sector Tejamaniles. Cierta número de modelos alternativos fueron simulados incluyendo flujo de calor vertical así como recarga y descarga de agua y CO₂.

Nuestros resultados preliminares demuestran la coexistencia de condiciones de líquido y vapor dominante en calorducto a diferentes profundidades, mostrando una concordancia semicuantitativa con las presiones y temperaturas observadas en el yacimiento. Encontramos que el bióxido de carbono se acumula cerca el techo del reservorio y en la capa

sello. El trabajo continúa para incorporar detalles más realistas dentro del modelo numérico. Una buena representación del estado natural del yacimiento es un requisito previo para el subsecuente desarrollo de modelos de explotación que pudieran proporcionar guías para el futuro desarrollo y administración del campo.

RECONOCIMIENTO

César Suárez expresa su agradecimiento a la División de Ciencias de la Tierra del Laboratorio de Lawrence Berkeley por el apoyo técnico y la hospitalidad brindada durante una visita de cooperación binacional entre la Comisión Federal de Electricidad de México y el Departamento de Energía de los Estados Unidos (Julio-Agosto, 1988). El desarrollo de este trabajo ha sido financiado en parte por: The Assistant Secretary for Conservation and Renewable Energy, Office of Renewable Energy Technologies, Geothermal Technology Division of the U.S. Department of Energy, bajo el contrato No. DE-AC03-76SF00098.

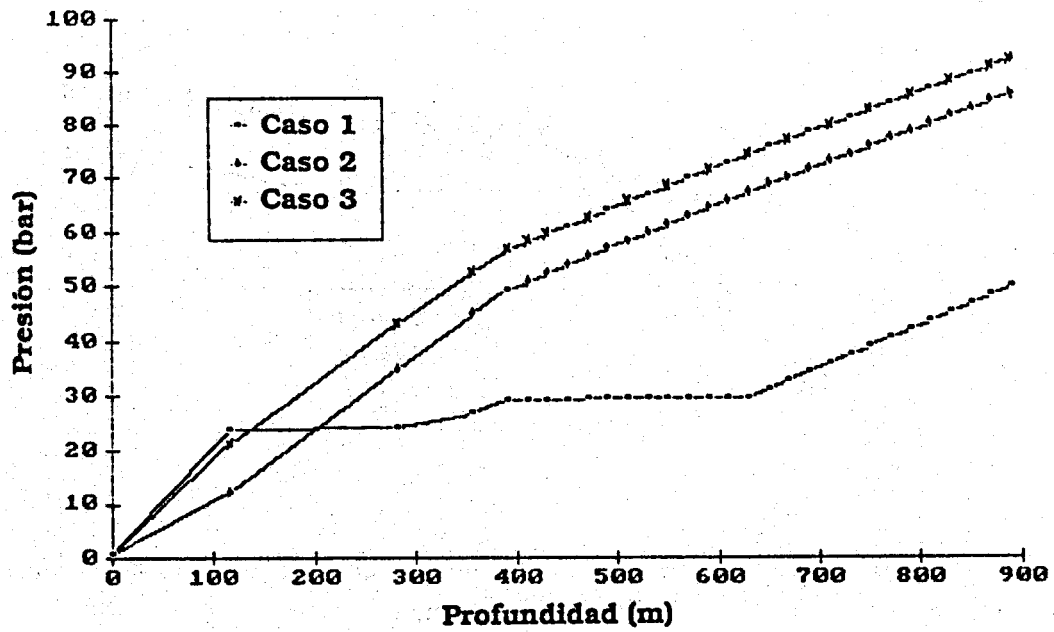


Figura 9. Perfiles de presiones calculadas para los Casos 1, 2 y 3.

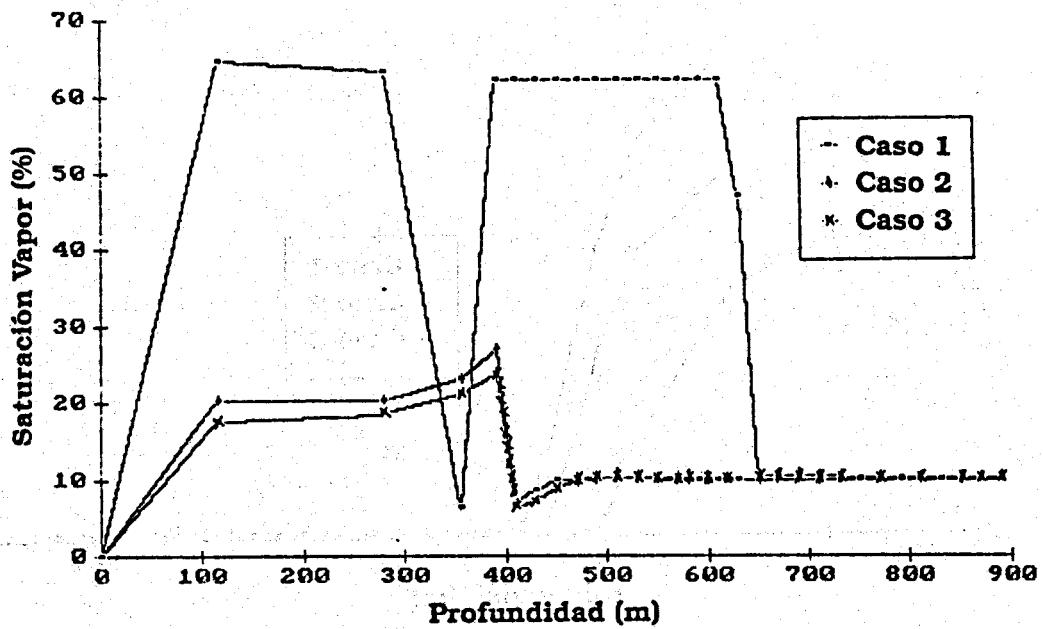


Figura 10. Perfiles de saturaciones de vapor calculadas para los Casos 1, 2 y 3.

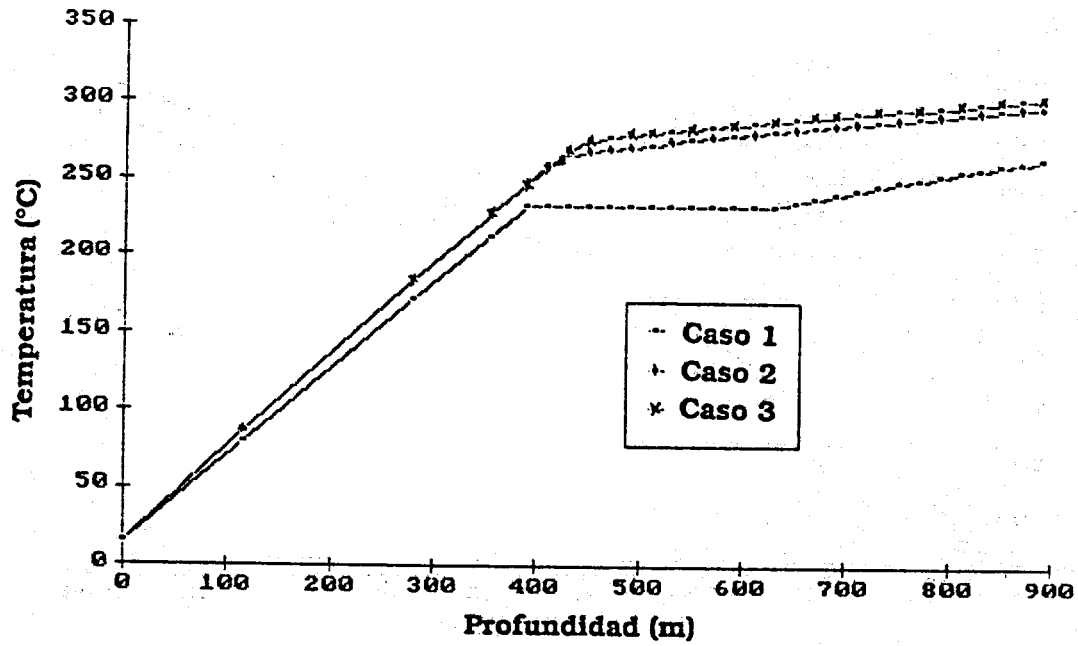


Figura 11. Perfiles de temperaturas calculadas para los Casos 1, 2 y 3.

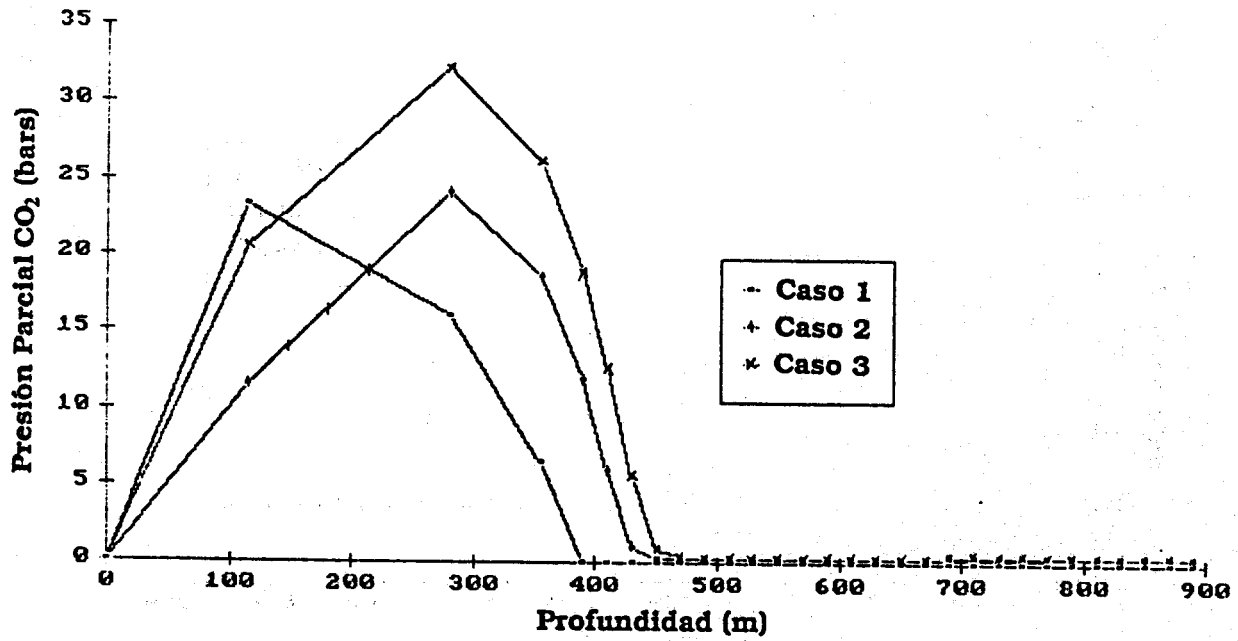


Figura 12. Perfiles de presiones parciales de CO₂ calculadas para los Casos 1, 2 y 3.

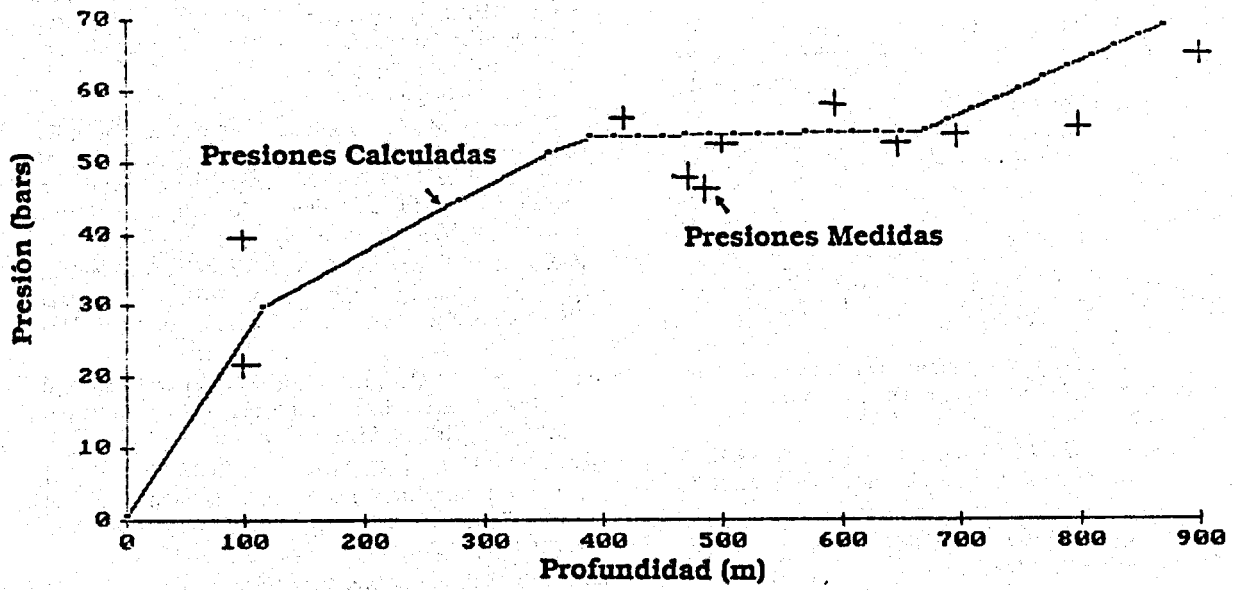


Figura 13. Comparación de presiones para el Caso 1.

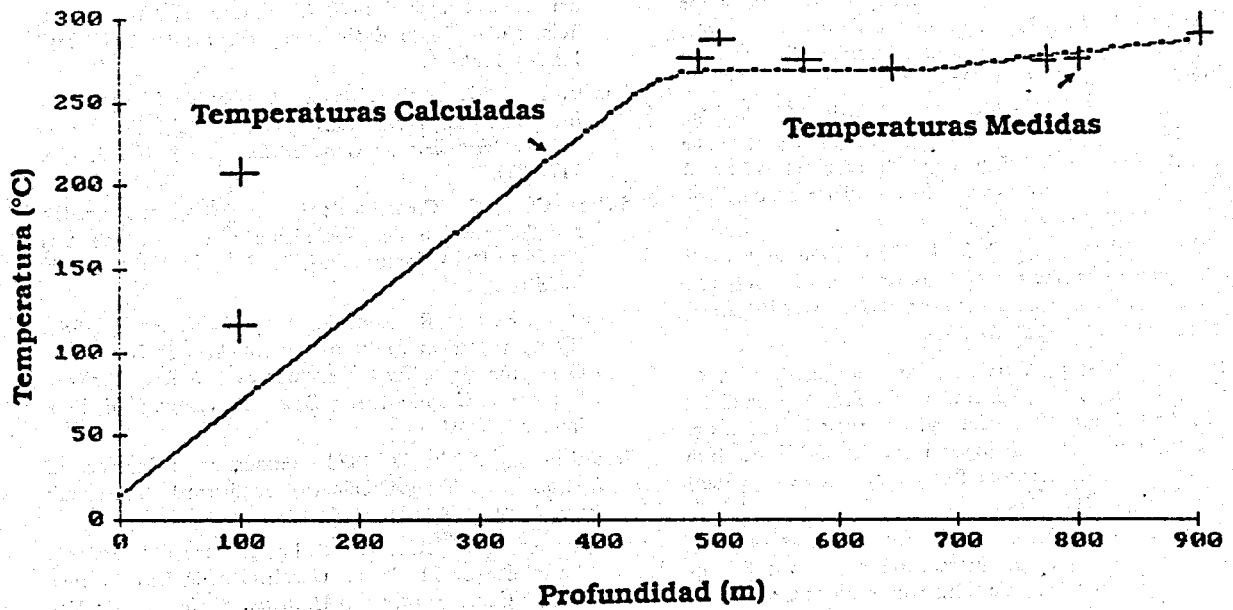


Figura 14. Comparación de temperaturas para el Caso 1.

REFERENCIAS

- Cathelineau, M., Oliver, R., Nieva, D. y Garfias, A., 1985. 'Mineralogy and Distribution of Hydrothermal Mineral Zones in Los Azufres (Mexico) Geothermal Field'; *Geothermics*, Vol. 14, No.1, (pp. 49-57).
- Contreras, E., Domínguez, B., Iglesias, E., García, A. y Huitrón, R., 1988. 'Compendio de Resultados de Mediciones Petrofísicas en Núcleos de Perforación del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich.'; *Geotermia-Revista Mex. de Geoenergía*, Vol. 4, No. 2, (pp. 79-105).
- De La Cruz, V., 1984. 'Modelo Geotérmico Conceptual del Campo de Los Azufres, Mich.'; Dpto. Exploración CFE, Rep. Int. No. GG1184.
- García, G., 1983. 'Curso Informativo sobre Métodos Termométricos de Exploración'; Dpto. Exploración CFE, Rep. Int. No. GF1383.
- Grant, M., Donaldson, I. y Bixley, P., 1982. 'Geothermal Reservoir Engineering'; Academic Press, New York, N.Y.
- Gutiérrez, N. y Aumento, F., 1982. 'The Los Azufres (Mich., México) Geothermal Field'; 26th Int. Geo. Congress, *J. Hydrol.*, Vol. 56 (pp. 137-162).
- Hiriart, L. G., 1988. 'The Mexican Experience with Modular Power Plants: Generation and Brine Disposal'; Proc. 10th New Zealand Geothermal Workshop, University of Auckland, Auckland, NZ (pp. 23-30).
- Iglesias, E. y Arellano, V., 1988. 'El Campo Geotérmico de Los Azufres: Prototipo de los Sistemas Hidrotermales "VAPLIQ"'; *Geotermia-Revista Mex. de Geoenergía*, Vol. 4, No. 1, (pp. 229-246).
- Iglesias, E., Arellano, V., Garfias, A., Miranda, C. y Aragón, A., 1985a. 'The Natural Thermodynamic State of the Fluids in the Los Azufres Geothermal Reservoir'; Proc. 10th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA (pp. 241-246).
- Iglesias, E., Arellano, V., Garfias, A., Miranda, C. y Aragón, A., 1985b. 'A One Dimensional Vertical Model of the Los Azufres, Mexico, Geothermal Reservoir in its Natural State'; *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 9, Part II (pp. 331-336).
- Iglesias, E., Arellano, V. y Ortiz, J., 1986. 'Natural Vertical Flow in the Los Azufres, Mexico, Geothermal Reservoir'; Proc. 11th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA (pp. 237-243).
- Kruger, P., Semprini, L., Verma, S., Barragán, R., Molinar, R., Ortiz, J., Aragón, A., Miranda, C., Garfias, A. y Gallardo, M., 1985. 'Initial Chemical and Reservoir Conditions at Los Azufres Wellhead Power Plant Startup'; Proc. 10th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA (pp. 219-226).
- McKibbin, R. y Pruess, K., 1988. 'Some Effects of Non-Condensable Gas in Geothermal Reservoirs with Steam-Water Counterflow'; Proc. 13th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA (pp. 165-171).
- Nathenson, M. 1975. 'Physical Factors Determining the Fraction of Stored Energy Recoverable from Hydrothermal Convection Systems and Conduction Dominated Areas'; US Geological Survey, Open-File Report 75-525.
- Nieva, D., Quijano, J., Garfias, A., Barragán, R. y Laredo, F., 1983. 'Heterogeneity of the Liquid Phase, and Vapor Separation in Los Azufres (México) Geothermal Reservoir'; Proc. 9th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA (pp. 253-260).
- Nieva, D., Verma, M., Santoyo, E., Barragán, R., Portugal, E., Ortiz, J. y Quijano, J., 1987. 'Estructura Hidrológica del Yacimiento de Los Azufres'; Proc. Intern. Symp. on Development and Exploitation of Geothermal Resources, Cuernavaca, Mor., (pp. 202-213).
- O'Sullivan, M. J., Bodvarsson, G. S., Pruess, K. y Blakeley, M. R., 1985. 'Fluid and Heat Flow in Gas-Rich Geothermal Reservoirs'; *Soc. Petr. Eng. J.*, Vol. 25, No. 2 (pp. 215-226).
- Pruess, K., 1985. 'A Quantitative Model of Vapor Dominated Geothermal Reservoirs as Heat Pipes in Fractured Porous Rock'; Rep. LBL-19366, Berkeley, CA.
- Pruess, K., 1988. 'SHAFT, MULKOM, TOUGH: A Set of Numerical Simulators for Multiphase Fluid and Heat Flow'; *Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 4, No. 1, (pp. 185-202).
- Pruess, K., Celati, R., Calore, C. y Cappetti, G., 1987. 'On Fluid and Heat Transfer in Deep Zones of Vapor-Dominated Geothermal Reservoirs'; Proc. 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford, CA (pp. 89-96).
- Quijano, J., Gallardo, M., Laredo, F., Tello, M., Pérez, E. y Moreno, J., 1987. 'Modelo Geoquímico de los Fluidos del Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich.'; Dpto. Exploración-CFE, Rep. Int. No. 6-87.
- Suárez, C., 1985. 'Ingeniería Básica y Evaluación Preliminar del Sector Tejamaniles (50 MW)'; Cap. VI Anteproyecto Tejamaniles, Dpto. Evaluación y Yacimientos-CFE, Rep. Int. No. 1385-26.
- Suárez, C., 1987. 'Aplicación del Análisis de Riesgos a la Ingeniería de Yacimientos Geotérmicos'; *Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 3, No. 2, (pp. 117-129).
- Suárez, C., 1988. 'Creación de 7 Archivos Computarizados con Información del Yacimiento Geotérmico de Los Azufres'; Dpto. Evaluación-CFE, Rep. Int. No. (AVACI-MCSA08).
- Suárez, C., Estrada, R., Preciado, A., y Hernández, J., 1986. 'Comportamiento de Pozos de Los Azufres Durante la Operación de 5 Turbo-Generadores Móviles. Período: Octubre 1982-Julio 1986'; Dpto. Evaluación-CFE, Rep. Int. No. 1386-016.
- Truesdell, A., y White, D., 1973. 'Production of Superheated Steam from Vapor-Dominated Geothermal Reservoirs'; *Geothermics*, Vol. 2 (pp. 154-173).
- Viggiano, C., 1987. 'Régimen de Flujo en Base a Mineralogía Autígenica en el Campo Geotérmico de Los Azufres, Mich.'; *Geotermia-Revista Mexicana de Geoenergía*, Vol. 3, No. 3, (pp. 191-213).
- White, D., Muffler, L. y Truesdell, A., 1971. 'Vapor-Dominated Hydrothermal Systems Compared with Hot Water Systems'; *Econ. Geology*, Vol. 66, (pp. 75-97).