

COMPORTAMIENTO DE FLUIDOS EN UN SISTEMA HIDROTHERMAL ACTUAL—CASO DE LOS AZUFRES, MICHOACÁN, MÉXICO

*Eduardo González-Partida**

RESUMEN

Los fluidos profundos en el yacimiento geotérmico de Los Azufres son del tipo clorurado sódico, con pH neutro y temperaturas que varían entre 300 y 350°C. El sector Norte de Los Azufres (zona Maritaro) es dominado por la fase líquida, presentando un perfil hidrostático con temperaturas promedio de 300°C. El sector Sur (zona de Tejamaniles) presenta tres perfiles termodinámicos: el somero, de vapor dominante (los primeros 800 m); el intermedio, con dos fases de L+V con predominio de vapor (1,200 m); y el profundo, de líquido saturado, donde $P = 180$ bars, y $T = 350^\circ\text{C}$. Los gases no condensables relacionados con la zona de vapor dominante están compuestos por CO_2 , principalmente, representando entre el 70 y el 90% del total.

El comportamiento de las actividades de ciertos iones en equilibrio en el líquido del yacimiento, fue estudiado considerando diferentes tasas de ebullición y temperaturas. Las actividades de los mismos varían de acuerdo con su naturaleza: El Na y K se incrementan en la fase líquida, de la misma manera que lo hacen los volátiles en la fase de vapor.

La salmuera, determinada por medio de inclusiones fluidas, manifiesta una evolución desde las zonas más profundas hasta la superficie. La salmuera profunda presenta temperaturas de fusión próximas al cero, con salinidades de 0.1 a 1% eq. peso de NaCl, valores iguales a los medidos actualmente, y temperaturas de homogeneización que van de 340 a 300°C, con presiones de 175 bars. Entre los 1,200 y 1,500 m ocurre el fenómeno de ebullición acompañado de una caída de presión (P) pasando a $P = 75$ bars, con una temperatura de $270^\circ \pm 10^\circ\text{C}$ asociado con un cambio en las temperaturas de fusión que van de -0.6 a -3°C , lo que corresponde a una salinidad aparente de 1 a 4% eq. peso de NaCl. El fuerte incremento de gases se da hacia esta zona y pudiera estar influyendo en este comportamiento. La cima del reservorio presenta temperaturas de fusión positivas evidenciando la fuerte concentración de gases.

Palabras clave: inclusiones fluidas, salmuera, ebullición, Los Azufres, Michoacán, México.

ABSTRACT

The deep fluids found in the field of Los Azufres, State of Michoacán, are of the type known as sodium chloride, with neutral pH and temperatures that vary between 300 and 350°C. The northern sector of Los Azufres (the Maritaro zone) is dominated by the liquid phase, thus presenting a hydrostatic profile with average temperature of 300°C. The southern sector (the Tejamaniles zone) presents three thermodynamic profiles: the most superficial, with steam predominating (within the first 800 m); the intermediate having a phase L+V with predominance of steam (at 1,200 m); and the deepest one being of saturated liquid with a pressure of 180 bars and temperature of 350°C. The gases, which are not condensable, related to the zone of dominant steam, are composed mainly of CO_2 and they represent between 70 and 90% of the total.

The behaviour of certain ions and its activities are found to be balanced within the liquid of the field and they were studied considering different boiling and temperature rates. The ion activity was found to vary according to its nature. Na and K increased in the liquid phase, in a similar manner as occurs with volatiles in the steam phase.

The brine, determined by means of fluid inclusions, shows an evolution from the areas of greatest depth to the surface. The deep brine shows fusion temperatures near to zero with salinity ranging from 0.1 to 1% eq. weight of NaCl; it yields similar values to the ones presently measured with homogenization temperature ranging from 300 to 340°C and pressure of 175 bars. Boiling occurs between 1,200 and 1,500 m accompanied by a fall of pressure to $P = 75$ bars, with a temperature of $270 \pm 10^\circ\text{C}$, associated to a change in fusion temperatures that range from -0.6 to -3°C . This corresponds to an apparent salinity of 1 to 4% eq. weight of NaCl, as a result of a strong increase of gases towards this zone. The top of the reservoir presents positive fusion temperatures as an evidence of the high concentration of gases.

Key words: fluid inclusions, brine, boiling, Los Azufres, Michoacán, Mexico.

GENERALIDADES Y ANTECEDENTES

El campo geotérmico Los Azufres fue descubierto en 1972. En la actualidad, hay 67 pozos perforados, de los cuales

37 son productores, 13 fallidos y seis inyectoros. La capacidad instalada es de 88 MW.

La sierra de Los Azufres ha sido estudiada regionalmente por Silva-Mora (1979), Demant (1981), Garduño-Monroy (1988), Ferrari y colaboradores (1991), Pradal y Robin (1985, 1986, 1994) y Robin y Pradal (1993), y, localmente, por la CFE, con los trabajos de Camacho y Palacios (1979), De la Cruz y

*Estación Regional del Centro, Instituto de Geología, Unidad de Ciencias de la Tierra, Universidad Nacional Autónoma de México, Apartado Postal 1-742, 76001 Querétaro, Qro., México.

colaboradores (1982), Aumento y Gutiérrez (1980), Dobson (1984), Dobson y Mahood (1985) y Pradal (1990). En la Figura 1 se muestra un mapa geológico. El basamento local está constituido por un paquete de derrames andesíticos con intercalaciones de paleosuelos, aglomerados y coladas basálticas, so-

bre el cual yace discordantemente un ciclo volcánico de composición ácida (Riolita Agua Fria) y depósitos lacustres. La Dacita San Andrés representa una fase volcánica importante y es seguida de depósitos ignimbríticos e inyecciones riolíticas (Riolita Yerbabuena), que forman estructuras dómicas. La última eta-

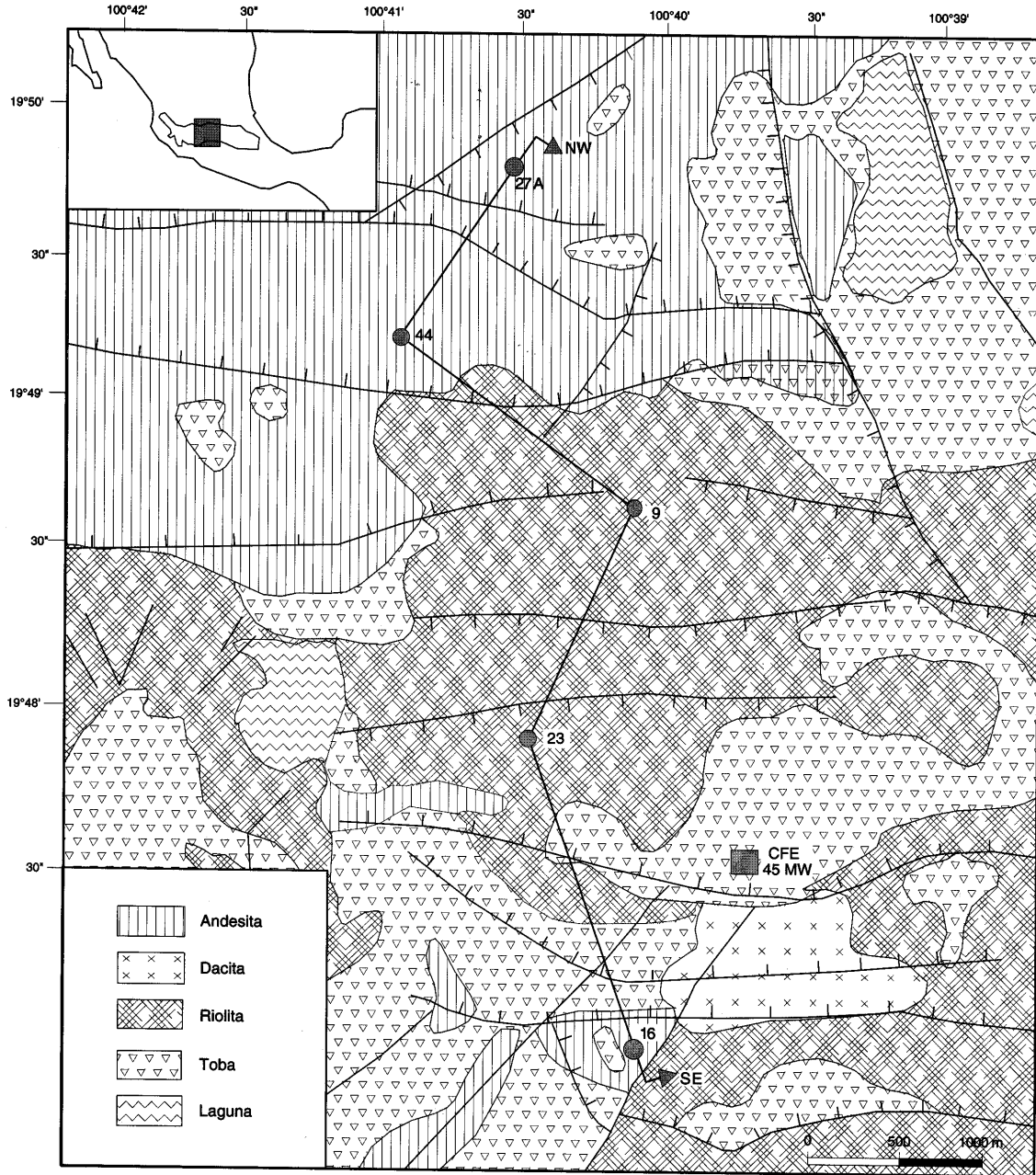


Figura 1. Mapa geológico-estructural del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., que muestra la línea de la sección NW-SE.

pa volcánica en la región es de composición básica con afloramientos de derrames al este y oeste del campo y cineritas en los alrededores (Figura 2).

La geoquímica de roca total realizada en las diferentes unidades litoestratigráficas manifiesta una tendencia calcialcalina (Cathelineau *et al.*, 1987). Los estudios estructurales de Garduño-Monroy (1988) y Ferrari y colaboradores (1991) demuestran dos sistemas principales de fallas de inclinación casi vertical; el mayor tiene una dirección E-W y corta otros de menor importancia y más antiguos N22-44E. Las características de estas fallas son la causa de la porosidad secundaria. Las fallas E-W presentan desplazamiento lateral y se relacionan con el sistema regional activo Acambay, e intersectan el borde meridional de la caldera de Los Azufres. La principal actividad hidrotermal superficial está asociada básicamente con las fallas, las cuales permiten el ascenso de fluidos geotérmicos, manifestándose en superficie a través de zonas de alteración (argilización), suelos calientes, manantiales termales, volcanes de lodo y fumarolas.

Los pozos perforados se encuentran entre 627 y 3,544 m de profundidad. Las temperaturas máximas medidas son de 358°C (Suárez-Arriaga *et al.*, 1997). El reservorio se puede dividir en dos sectores, de acuerdo con su evolución hidrodinámica: el sector Norte (zona Marítaro), dominado por la fase líquida, presenta un perfil hidrostático con temperaturas promedio de 300°C. El sector Sur (zona de Tejamaniles), presenta tres perfiles termodinámicos; el somero, de vapor dominante (los primeros 800 m); el intermedio, con dos fases a L+V con predominio de vapor (1,200 m); y el profundo, de líquido saturado, donde su presión es de 180 bars y $T = 350^{\circ}\text{C}$ (Suárez-Arriaga *et al.*, 1997). La composición química de los pozos estudiados y/o

de pozos muy próximos a los considerados en este trabajo se presenta en la Tabla 1. A partir de esta información, se desprende que los fluidos profundos son de tipo clorurado-sódico por el predominio de estos elementos. Los gases no condensables relacionados con la zona de vapor dominante, están compuestos por CO_2 principalmente (entre el 70 y 90% del total), los cuales presentan composición heterogénea en la fase vapor, le sigue el $\text{H}_2\text{S} = 1.16\%$, $\text{H}_2 = 0.026\%$, $\text{N}_2 = 0.77\%$ y $\text{CH}_4 = 0.01\%$. Los gases representan en la fase vapor entre el 2 y 8% en peso, de la masa de fluido total del reservorio.

INTRODUCCIÓN: FLUIDOS EN LAS INCLUSIONES FLUIDAS

La formación de un yacimiento hidrotermal requiere necesariamente de la participación de fluidos calientes. Los fluidos hidrotermales transportan en solución sustancias de interés económico como cobre, oro, plata, plomo, zinc, entre otros. Las características fisicoquímicas de estos fluidos (entre ellas la salinidad, la temperatura y la presión) determinan el tipo y lugar de precipitación de su contenido disuelto. Como consecuencia, la precipitación de sustancias económicas no es efecto del azar, sino que ocurre en condiciones particulares de interacción de dichos fluidos con la roca encajonante. Entre las condiciones necesarias para que el fenómeno de la mineralización ocurra, están cambios bruscos de presión (por fallas, brechas, etc.), caídas en la temperatura (por mezcla con fluidos más fríos, por contacto térmico con la roca encajonante), y cambios en las relaciones de fases (proceso de ebullición, dilución, etc.).

Cuando el contenido disuelto de un fluido se precipita, esto es, cuando ocurre la mineralización, porciones del fluido ori-

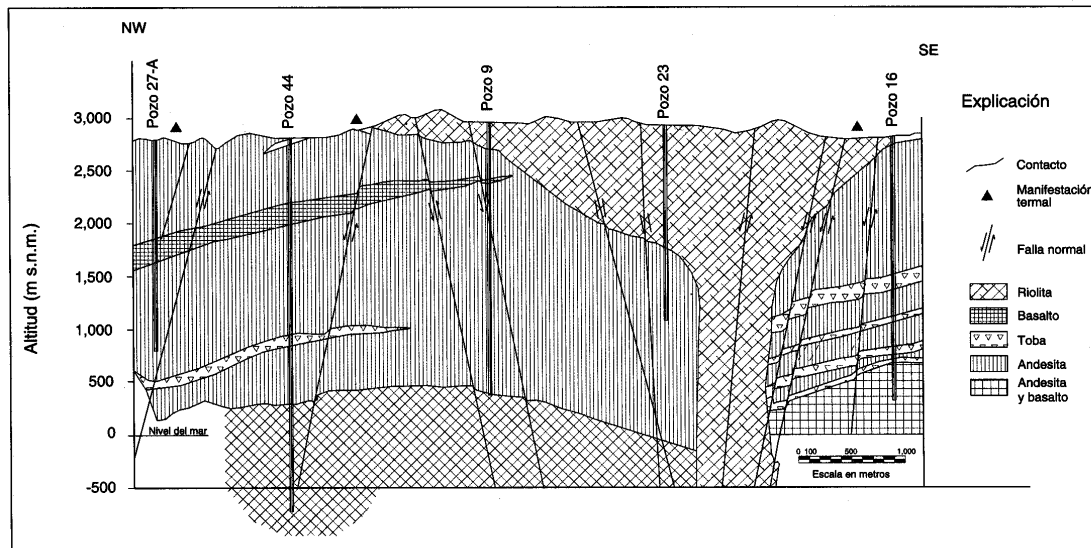


Figura 2. Sección geológico-estructural NW-SE del campo geotérmico Los Azufres, Mich.

Tabla 1. Composición química de aguas (separadas) y gases de los pozos considerados en este estudio; los pozos faltantes fueron de exploración y no se cuenta con datos; la fecha de muestreo es noviembre de 1985. La composición química del agua está dada en ppm. Los gases se presentan en % volumen (base seca), donde: STD = sólidos totales disueltos; Xg (% mol) = concentración de gas, en % mol; T Est. = temperatura estabilizada, en °C; los geotermómetros están en °C: T (Na-K) = geotermómetro de Na-K, en °C; T (Na-K-Ca) = geotermómetro de Na-K-Ca, en °C; T(SiO₂) = geotermómetro de sílice en °C, T(GGDP) = geotermómetro de gases de D'Amore, en °C; T (H₂/Ar) = geotermómetro de H₂/Ar de Giggenbach, en °C. Tomado de Tello-Hinojosa (1998).

Pozos	Azufre 9	Azufre 16D	Azufre 18	Azufre 23	Azufre 25	Azufre 26	Azufre 35	Azufre 49
pH	7.2	7	7.1	7.8	7.9	7.5	7.4	8.4
Entalpía	175.4		1733			1262	271.6	
STD	823.4	9347	7163	632.8	6097	6669	724.4	6817
Cl	3929.6	4882.6	3462.9	3081.6	2896.7	3111	354.4	2980.5
B	294.9	349.9	270.6	243.9	227.2	291.8	2.77	222.5
HCO ₃	100.4	92.7	122	145.6	140	120.6	1.04	593
SiO ₂	1154.1	690.9	764	667	636.4	844.4	9.00	167
SO ₄	16.8	23.2	18	16	14	36	18.5	66
Na	2065.2	2608.7	2000	168.6	1716.1	1761.7	186.0	2197.3
K	593.6	575.9	441	4.20	399.5	428.3	464.4	522.9
Li	33.1	24.4	24.6	26.7	24.3	25	25.7	25.4
Rb	4.5	3.7	3.5	3.9	4.6	2.4	2.9	3.6
Cs	4	4.6	3.1	2.9	2.9	2.9	2.1	3.9
Ca	8.9	81.1	24.5	9	8.8	19.4	19.1	14
Mg	0.03	0.05	0.05	0.11		0.04	0.01	3.6
As	28.4	9.4	27.5	25	26	25.2	25.9	16.7
Xg (% mol)	3.74	13.02	38.3			26.49	21.12	
CO ₂	92.45	98.56	98.6			97.97	97.48	
H ₂ S	5.04	1.44	0.72			0.56	1.36	
NH ₃	0	0	0			0	0	
He	0	0	0.0011			0.0033	0.0054	
H ₂	0.622	0	0.141			0.141	0.275	
Ar	0.026	0	0.002			0.014	0.038	
N ₂	1.686	0	0.46			1.182	0.696	
CH ₄	0.174	0	0.076			0.122	0.149	
T(Na-K)	328	294	296	310	302	307	310	305
T(Na-K-Ca)	325	282	286	306	301	294	298	303
T(SiO ₂)	310	255	267	246	244	274	281	147
T(H ₂ /Ar)	271	N.C.	312	N.C.	N.C.	245	235	N.C.
T(G GDP)	341	N.C.	262	N.C.	N.C.	253	286	N.C.
T. Est.	329	287	271	296	284	278	275	298
δD (‰)	-60.8	-59.7					-60	
δO (‰)	-3.2	-4.6					-4.67	

ginal quedan atrapadas dentro de los minerales que dicho fluido transportó. Estas porciones de fluido se denominan inclusiones fluidas, y contienen las características fisicoquímicas del líquido. La determinación de las propiedades fisicoquímicas de las sustancias atrapadas así conducirá a la reconstrucción de las condiciones originales del fluido que las generó. Es importante recalcar que la circulación de fluidos hidrotermales en el subsuelo obedece también a las condiciones geológicas de la roca encajonante y a la ubicación de la fuente de calor, que en ocasiones puede ser la misma fuente de los fluidos. El fenómeno de interacción fluido-roca constituye entonces un fenómeno importante por conocer. Por lo tanto, rastreando la huella de tales fluidos, por medio del estudio de las inclusiones fluidas, se reconstruye la geometría, la dirección y las características fisicoquímicas de las soluciones mineralizadoras. Esta información es de trascendental importancia, porque nos permite plantear modelos conceptuales más cercanos a la realidad del fenómeno hidrotermal.

GEOQUÍMICA DE FLUIDOS

GEOQUÍMICA DE LA SALMUERA

La actividad de ciertos iones de la fase líquida del yacimiento fue calculada por González-Partida y colaboradores (1978), a partir de la composición química promedio del yacimiento, suponiendo condiciones de equilibrio y considerando diferentes temperaturas del reservorio, así como diferentes porcentajes de vapor y líquido coexistiendo en el yacimiento, con el objeto de simular el proceso de ebullición y la repercusión del fenómeno en la distribución de especies disueltas. Para tal efecto, se empleó el paquete EQYAC (Nieva-Gómez *et al.*, 1987).

En la Figura 3, se representa el comportamiento de las actividades de los iones considerados, y puede apreciarse la tendencia al incremento de las actividades del Na⁺ y K⁺ como consecuencia del aumento en su concentración en la fase líquida, a medida que aumenta la ebullición.

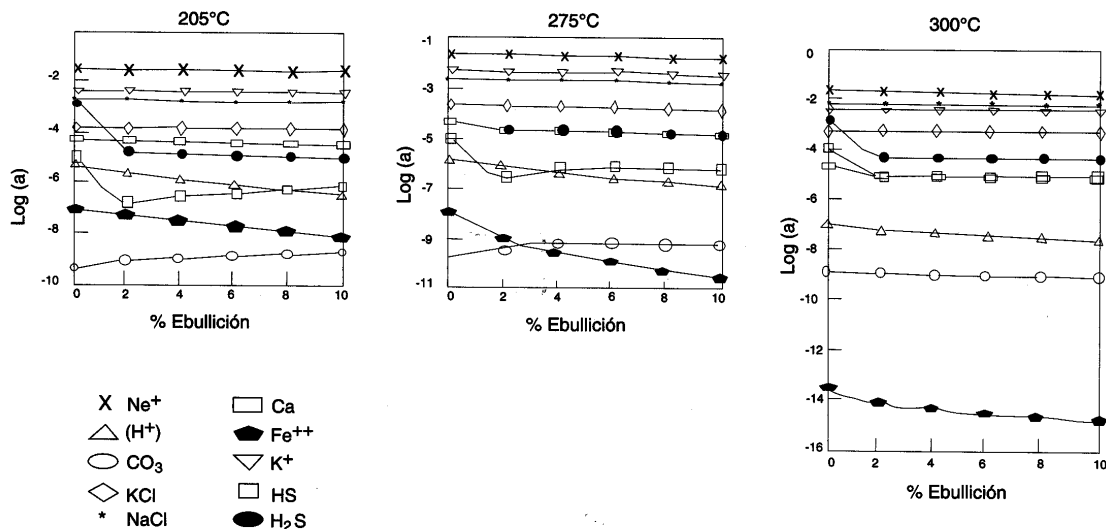


Figura 3. Perfil de actividades de especies en equilibrio en la fase líquida del yacimiento, considerando diferentes tasas de ebullición a temperaturas de 250°, 275° y 300°C.

Por otro lado se observa un decremento apreciable en las actividades de las especies volátiles en la fase líquida, para tasas de ebullición menores que 2%, debido a su tendencia a separarse muy favorablemente en el vapor producido por la ebullición. Las actividades de tales componentes, para tasas de ebullición mayores que 2%, tienden a permanecer sin variación.

La actividad del ion CO₃ tiende a ser inversa a la del H⁺; este último decrece a medida que aumenta la ebullición. En el caso de temperatura de ebullición de 300°C (o mayor), el comportamiento de la actividad del protón decrece en forma poco sensible, mientras que la del ion CO₃, se aprecia sin cambio. En este caso, el líquido del yacimiento presenta un carácter extremadamente básico, favoreciendo la formación de compuestos tales como la calcita, a medida que se presenta la ebullición. Es interesante la similitud de la resultante específica para la salmuera de Los Azufres, con las reportadas por otros (Drummond y Ohmoto, 1985) para los modelos de cambios de concentración de especies, para sistemas cerrados con ebullición.

FLUIDOS ATRAPADOS EN LAS INCLUSIONES FLUIDAS

Una paragénesis mineral es un conjunto de minerales que cristalizan a un mismo tiempo, es decir, están en equilibrio entre ellos y la solución que los originó. La composición de esta solución puede evolucionar en el espacio y en el tiempo. Las paragénesis permiten, pues, comprender las características de la evolución espacio-temporal de los fluidos responsables de un yacimiento. Una inclusión fluida es una fracción de fluido del yacimiento que quedó atrapada al formarse un cristal. Esta inclusión guarda una memoria de las condiciones físicas y químicas

imperantes en el momento de su atrapamiento. Mediante la aplicación de una técnica denominada microtermometría crioscópica de inclusiones fluidas, es posible obtener información sobre la temperatura de formación del cristal, la salinidad del fluido del cual se formó, su densidad, presión y evidenciar fenómenos de ebullición.

Los pozos que se presentan en la Figura 4, con su profundidad total, fueron estudiados desde el punto de vista petrológico (minerales de alteración hidrotermal) y mineralógico (minerales opacos) por González-Partida y colaboradores (1989, 1990) y González-Partida (1999a, 1999b). El estudio microtermométrico de inclusiones fluidas, objeto de este estudio, es un complemento a los estudios geológicos que se practicaron a dichos pozos.

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El equipo con que se trabajó es una platina Chaixmecca y algunos datos fueron verificados con una platina Linkham. La precisión en la reproducción de los datos es: para la temperatura de fusión del hielo (a baja temperatura) de $T_f = \pm 0.1^\circ\text{C}$, y para la temperatura de homogeneización (alta temperatura) de $T_h = \pm 5^\circ\text{C}$. La platina está montada en un microscopio con oculares 12.5 X 2.5 y objetivo de 100X. Los detalles técnicos de la forma del muestreo, preparación, criterios analíticos, reproducibilidad de los datos, validez de la técnica y experiencia analítica pueden ser consultados en Charoy y González-Partida (1984), Arnold y González-Partida (1986a, 1986b, 1987), González-Partida y Martínez (1989), González-Partida y colaboradores (1984, 1984b, 1988, 1990, 1991, 1992, 1994, 1997) y González-Partida (1983, 1983a, 1983b, 1983c y 1993).

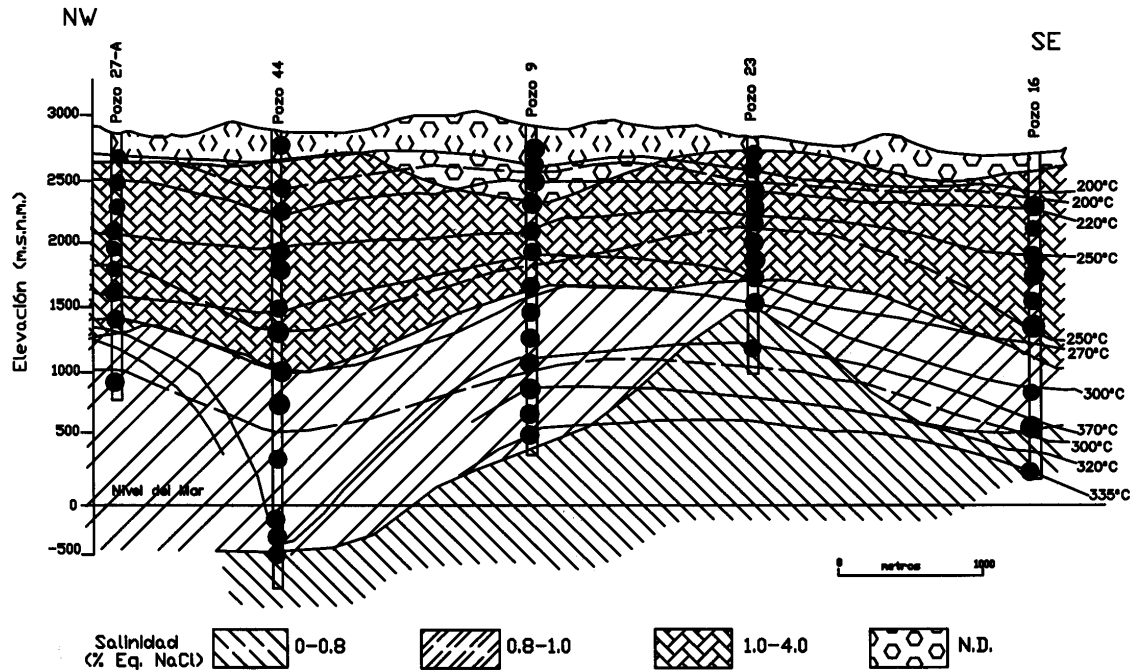


Figura 4. Zonas de isoconcentraciones de la paleosalmuera e isothermas obtenidas a partir del estudio de inclusiones fluidas a baja y alta temperatura en la sección NW-SE del campo. Las líneas discontinuas corresponden a temperaturas de homogeneización mínimas, las líneas continuas a los valores promedio; ND = no determinado. Los puntos negros indican la localización de las muestras estudiadas.

El primer paso consiste en reconocer los diferentes tipos de inclusiones y hacer una descripción detallada de las mismas, incluyendo su forma, tamaño y fases presentes. La etapa más importante tiene lugar en la microtermometría, técnica que consiste en realizar medidas a bajas y altas temperaturas. El método consiste en provocar la solidificación (bajo observación microscópica) de las fases fluidas, mediante la disminución progresiva de la temperatura (hasta -200°C). El punto de solidificación de una sustancia es función de su contenido salino, por lo cual esta determinación permite el cálculo del porcentaje de sales disueltas en la fase acuosa, usando las tablas de Bodnar (1993).

El análisis a altas temperaturas se fundamenta en homogeneizar las diferentes fases presentes a medida que se eleva la temperatura, así como obtener información sobre la temperatura de decrepitación (explosión) de la inclusión. El proceso de calentamiento se efectúa exactamente sobre las mismas inclusiones que se analizaron a baja temperatura, y es indispensable este análisis antes de calentarlas, ya que existe la posibilidad de que se produzca una decrepitación, sobre todo cuando los fluidos son muy densos.

RESULTADOS PREVIOS

Los primeros trabajos sobre inclusiones fluidas en el campo de Los Azufres, Michoacán, fueron practicados por Catheli-

neau y colaboradores (1985, 1986), Combredet y Guilhaumou (1987), González-Partida (1987) y Lemieux y colaboradores (1989). Diez pozos nuevos se encuentran actualmente en estudio por González-Partida y colaboradores (en preparación).

MINERALES ESTUDIADOS Y MORFOLOGÍA DE LAS INCLUSIONES

Los minerales neoformados como calcita, wairaquita, cuarzo y epidota fueron estudiados por medio de la técnica de inclusiones fluidas. Se muestra los resultados en la Figura 4.

Usando los criterios de Shepherd y colaboradores (1985) y Roedder (1984), las inclusiones fluidas son de carácter primario, están relacionadas con el crecimiento de los cristales neoformados, son poco abundantes, sobre todo en las epidotas, y son del tipo L+V a líquido dominante; su tamaño es de 15 a 17 μm , pero en las epidotas presentan un tamaño menor que 12-13 μm . En la zona de ebullición se observó dos tipos de inclusiones: L+V y V. Una descripción fotográfica detallada se puede consultar en Nieva-Gómez y colaboradores (1986, 1987).

RESULTADOS OBTENIDOS

Las isoconcentraciones de la paleosalmuera están consignadas en la Figura 4, así como las temperaturas de homogenei-

zación, considerando (1) las temperaturas mínimas de homogeneización (líneas discontinuas), y (2) los valores promedio (líneas continuas). Las temperaturas de fusión (Tf) presentan una zona próxima al cero en los niveles profundos, donde Tf = -0.1° a -0.5°C, lo que corresponde a salinidades de 0.18 a 0.88% eq. peso NaCl. Una segunda zona se definió con Tf = -0.5 a -0.7°C con salinidades de 1.2% eq. peso NaCl. La tercera zona se da entre 1,200 m y 1,500 m, donde se observa fluidos del tipo L+V y V, y las temperaturas de fusión varían de -0.7 a -3°C, lo que corresponde a una salinidad aparente de 1.2 a 4.9% eq. peso NaCl. La fuerte concentración de CO₂ hacia ese sector del campo pudiera estar influyendo en el comportamiento criométrico. Entre la zona de mayor concentración de vapor ("casquete de vapor") y la superficie, se observa valores positivos en la temperatura de fusión, lo que indica un fuerte cambio en la química de la paleosalmuera superficial, con Tf = +0.4 a +7.5°C, lo que implica una clara invasión de CO₂, principalmente con CH₄, N₂, CO, H₂ y H₂S hacia ese sector.

DISCUSIÓN

En un modelo conceptual del campo, Nieva-Gómez y colaboradores (1986, 1987) demostraron por medio de un perfil vertical, que a grandes profundidades (e.g., 3,500 m del Pozo Az-44), el sistema es de líquido caliente (320°C) presurizado. Según estos autores, la ebullición, acompañada de una pérdida de presión y temperatura, favorece una tasa de vaporización creciente a medida que la salmuera se aproxima hacia la superficie, cambiando el fluido a vapor dominante y a vapor en los niveles someros, el cual se mezcla con las aguas meteóricas colgadas.

En el modelo de Nieva-Gómez y colaboradores (*op. cit.*), se sugiere la existencia de un fenómeno de ascenso y condensación parcial de vapor en el yacimiento, mediante el cual las especies no volátiles (cloruros) se concentran en los estratos profundos del yacimiento; mientras que los elementos volátiles se comportan de manera inversa. Por otro lado, se sabe que la zona Sur (Tejamaniles) presenta dominio de vapor; mientras que la zona Norte (Maritaro), características de líquido dominante. Giggenbach y Quijano-León (1981) efectuaron estudios isotópicos en manantiales aledaños al sistema, así como en los fluidos producidos por los pozos, encontrando que en los pozos se manifiestan "paleofluidos" con una composición isotópica diferente que las de los manantiales. En Los Azufres, Michoacán, los estudios hidrológicos e isotópicos de Birkle (1998) indican la recarga del reservorio por aguas magmáticas y CO₂ de una cámara magmática somera, mezclada con un componente joven de agua superficial (meteórica).

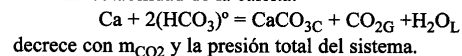
De acuerdo con la información obtenida, se interpreta que el agua inicialmente líquida entra en ebullición durante su circulación a través del sistema de fracturas que le permita su desplazamiento hacia la superficie; el fluido profundo es poco salado, muy similar a los fluidos que se recolectan actualmente y que se presentan en la Tabla 1, los cuales equivalen a salinida-

des de 0.1 a 0.8% eq. peso NaCl. La salinidad registrada en la zona de ebullición es cuatro veces mayor, ya que va de 1 a 4% eq. peso NaCl, lo que implica un proceso de vaporización muy importante, aun cuando se sabe, igualmente, que los gases disueltos, principalmente el CO₂, pueden contribuir de manera significativa a bajar el punto de fusión del hielo dentro de la inclusión. Suárez-Arriaga y colaboradores (1997) demuestran que en Los Azufres los gases no condensables representan entre el 2 y 8% del peso total en el reservorio, donde el CO₂ representa entre el 70 y 90% del total de los gases. La ebullición propicia una separación masiva de hidrógeno, así como de otros volátiles inicialmente disueltos en la fase líquida. El agua es más oxidante que la del reservorio profundo.

La ebullición es una característica muy común en los sistemas geotérmicos (Browne, 1984), y en los sistemas epitermales durante una o más etapas de depósito mineral (Bodnar *et al.*, 1985). Esta coincidencia se debe a que en ambos sistemas, los fluidos hidrotermales circulan a relativamente alta temperatura y baja presión. El fenómeno de ebullición está caracterizado por una importante tasa de vaporización, desprendiéndose vapor de agua y otros gases como H₂, CO₂, CH₄, N₂, CO, H₂S, etc., lo que ocasiona un enriquecimiento en la concentración de la salmuera. Los componentes volátiles de los campos geotérmicos y de muchos sistemas epitermales son prácticamente los mismos; se ha demostrado el papel importante que juegan estos gases en el control químico de la solución y, aún más importante, en la forma tan significativa que afectan la presión, por lo que indirectamente controlan la profundidad a la cual la ebullición comienza. En la mayoría de los sistemas geotérmicos activos, se tiene la ventaja de calcular la presión y la profundidad de formación a partir de los datos de inclusiones fluidas, pudiendo ser cotejados con las mediciones directas realizadas en el campo, demostrándose la calidad de las estimaciones hechas durante la interpretación de los datos; no así para los sistemas hidrotermales fósiles, donde es necesario hacer ciertas correcciones de presión para saber, por ejemplo, la profundidad a la cual ocurrió la ebullición, mecanismo efectivo para la precipitación de minerales, tanto metálicos como no metálicos (cuarzo, calcita).

Por otro lado, el desplazamiento hacia la superficie de un fluido en ebullición está en buena correlación con el depósito de calcita "hojosa" observado en el yacimiento (Figura 5).

La solubilidad de la calcita:



El aumento de la salinidad (aparente) del fluido y la concentración de calcita, pueden ser el resultado de la transferencia del CO₂ hacia la fase vapor.

CONCLUSIÓN

Los fluidos profundos en el yacimiento son del tipo clorurado sódico, de baja salinidad, con pH neutro y temperaturas que varían entre 300 y 350°C.

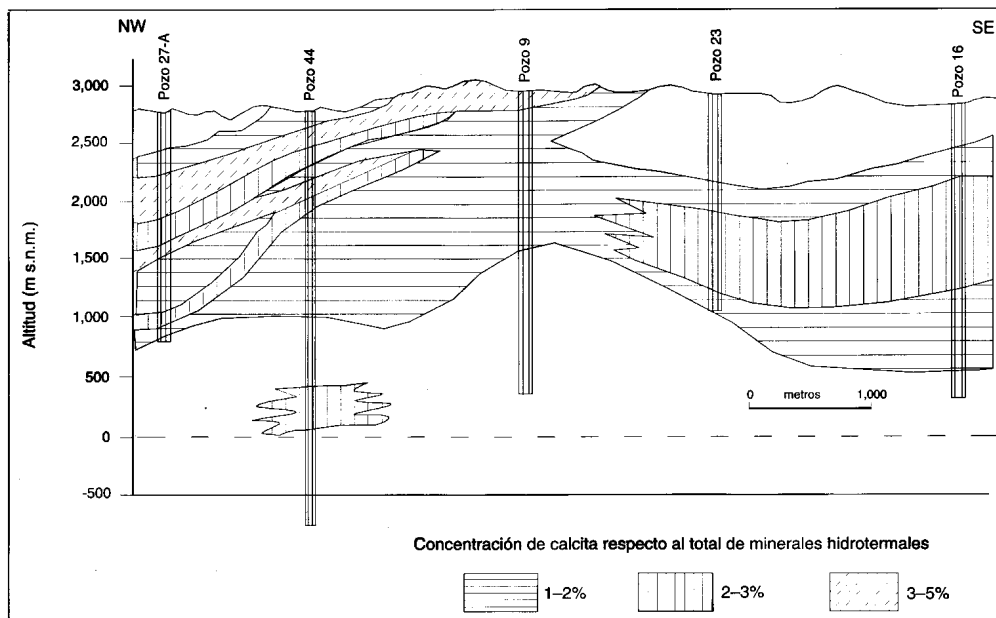


Figura 5. Distribución de calcita en la sección NW-SE del campo. Los porcentajes corresponden al contenido total de calcita observada en las muestras estudiadas cada 10 m de distancia.

El sector Norte de Los Azufres (zona Marítaro) está dominado por la fase líquida con temperaturas promedio de 300°C. El sector Sur (zona de Tejamaniles) está dominado por vapor. El líquido saturado profundo, donde $P = 180$ bars, y $T = 350^\circ\text{C}$, cambia a líquido + vapor y a vapor; los gases no condensables relacionados con esta zona están compuestos por CO_2 , principalmente.

La salmuera profunda, determinada por medio de inclusiones fluidas, presenta temperaturas de fusión próximas al cero, con salinidades de 0.1 a 1% eq. peso NaCl, valores iguales a los medidos actualmente, y temperaturas de homogeneización que van de 340 a 300°C, con presiones de 175 bars.

Entre 1,200 y 1,500 m ocurre el fenómeno de ebullición acompañado de una caída de presión (P bajando a $P = 75$ bares) y de temperatura (T disminuyendo a $T = 270^\circ \pm 10^\circ\text{C}$). Se presenta igualmente un cambio en las temperaturas de fusión que van de -0.7 a -3°C , lo que corresponde a una salinidad aparente de 1.2 a 4% eq. peso NaCl, ya que el fuerte incremento de gases se da hacia esta zona, y pudiera estar influyendo en este comportamiento.

La cima del reservorio presenta temperaturas de fusión positivas evidenciando la fuerte concentración de gases.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco particularmente a Mireya Maples y Sara Solís por la elaboración de las figuras y la traducción del resumen al

inglés. A Luca Ferrari, Ignacio Torres-Alvarado y a un árbitro anónimo, por su revisión crítica del manuscrito, y sus atinadas observaciones que contribuyeron sustancialmente al mejoramiento del mismo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arnold, Michel, y González-Partida, Eduardo, 1986a, Capacités oxydantes d'un fluide hydrothermal en ébullition: Comptes rendus de l'Académie des Sciences (Paris), t. 303-11, p. 817-821.
- 1986b, Le système sulfate-sulfure—prouves d'un équilibre chimique à 300°C; Conséquences géoquimiques: Comptes rendus de l'Académie des Sciences (Paris), no. 303-12, p. 1097-1099.
- 1987, Le système hydrothermal actuel de Los Humeros (Mexique)—État du système $\text{SO}_4^{2-}\text{-SH}_2$ à 300°C, origine du soufre et phénomènes de oxydation associés à la ébullition du fluide ascendant: Mineralium Deposita, v. 22, p. 90-98.
- Aumento, F., y Gutiérrez, A., 1980, Geocronología de Los Azufres, Michoacán: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, Informe interno núm. 3-80, 66 p.
- Birkle, P., 1998, Herkunft und Umweltauswir Kungen der Geothermalwasser von Los Azufres, Mexico: Sajonia, Alemania, Technical University of Freiberg, Ph. D. dissertation, 226 p. (inérita).
- Bodnar, R.J.; Reynolds, T.J.; y Kuehn, C.A., 1985, Fluid-inclusion systematics in epithermal systems, in Geology and geochemistry of epithermal systems: Reviews in Economic Geology, v. 2, p. 73-97.
- Browne, P.R.L., 1984, Lectures on geothermal geology and petrology: Islandia, National Energy Authority and the United Nations University editors, 93 p.
- Camacho, F., y Palacios, N.M., 1979, Geología de la zona geotérmica de Los Azufres, Michoacán: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, Informe interno núm. 6-79, 42 p.

- Cathelineau, Miguel; Oliver-Hernández, R.; y Nieva-Gómez, David, 1987, Geochemistry of volcanic series of the Los Azufres geothermal field (Mexico): *Geofísica Internacional* (México), v. 26, p. 273-290.
- Charoy, B., y González-Partida, Eduardo, 1984, *Analyses des phases fluides associées à la genèse des Amas Sulfures et des filons Au-Ag de la Province Taxco-Guanajuato*, Mexico: *Bulletin de Minéralogie*, v. 7, p. 285-305.
- De la Cruz, V.; Aguilar, J.; Ortega, D.; y Sandoval, J., 1982, Estudio geológico-estructural a detalle del campo geotérmico Los Azufres, Michoacán: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, Informe interno núm. 9-82, 38 p.
- Demant, Alain, 1981, L'axe néovolcanique mexicain; étude volcanologique et pétrographique—signification géodynamique: Université d'Aix-Marseille, disertación doctoral, 259 p. (inédita).
- Dobson, P., 1984, Volcanic stratigraphy and geochemistry of the Los Azufres: Stanford University, tesis de maestría, 59 p. (inédita).
- Dobson, P., y Mahood, G.A., 1985, Volcanic stratigraphy of the Los Azufres geothermal area, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 25, p. 273-287.
- Drummond, A.D., y Ohmoto, H., 1982, Chemical evolution and mineral deposition in boiling hydrothermal systems: *Economic Geology*, v. 80, p. 126-147.
- Ferrari, Luca; Garduño, V.H.; Pasquaré, Giorgio; y Tibaldi, A., 1991, Geology of Los Azufres caldera, Mexico, and its relationships with regional tectonics: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 47, p. 129-148.
- Garduño-Monroy, V.H., 1988, La caldera de Los Azufres y su relación con el sistema regional E-W: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 4, p. 49-61.
- Giggenbach, W.F., y Quijano de León, L., 1981, Estudio isotópico de las aguas del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectrónicos, informe interno (inédito).
- González-Partida, Eduardo, 1983a, Las inclusiones fluidas en geología—ejemplo sobre las características genéticas de las mineralizaciones polimetálicas de Tierra Caliente: *GEOMIMET* (México), núm. 123, p. 35-62.
- 1983b, Análisis petrográfico, cristaloquímico y de inclusiones fluidas de la serie metamórfica paleozoica de Tierra Caliente: *GEOMIMET* (México), núm. 124, p. 61-71.
- 1983c, Estudio de la fase fluida y sus relaciones con la mineralización de Miahuatlán-Ixtapan del Oro, Edo. de Méx.: *GEOMIMET* (México), núm. 125, p. 89-100.
- 1984, Análisis de las inclusiones fluidas e isótopos de azufre, hidrógeno y oxígeno de los sulfuros masivos de Tizapa-Sta. Rosa, Edo. de Méx.: *GEOMIMET*, núm. 128, p. 66-76.
- 1988, Las inclusiones fluidas en geotermia—una herramienta de la petrología experimental aplicada al Pozo Az-44: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 4, p. 1-14.
- 1993, Petrografía, geoquímica, cristaloquímica y características de los fluidos asociados a una sección del metamórfico aflorante en Tierra Caliente, estados de México, Guerrero y Michoacán: *Geofísica Internacional* (México), v. 32, núm. 3, p. 429-440.
- González-Partida, Eduardo; Arnold, Michel; y Acosta, A.E., 1984, Estudio microtermométrico del distrito de Fresnillo, Zac.: *GEOMIMET* (México), núm. 130, p. 17-21.
- González-Partida, Eduardo; Barragán-Reyes, R.M.; y Nieva-Gómez, David, 1987, Consecuencias químicas y mineralógicas de la ebullición en el sistema hidrotermal de Los Azufres, Michoacán: Instituto de Investigaciones Eléctricas-CCE, Simposio Internacional sobre Desarrollo y Explotación de Recursos Geotérmicos, Memorias, p. 178-188.
- 1991, Estudio de inclusiones fluidas en cuatro pozos del campo de Los Humeros, Pue.: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 7, núm. 2, p. 185-200.
- 1992, Mineralogía de alteración e inclusiones fluidas del campo geotérmico de Ahuachapán-Chipilapa, C.A.: Universidad Autónoma de Nuevo León, Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, v. 7, p. 139-145.
- González-Partida, Eduardo; García, G.A.; y Torres-Rodríguez, Vicente, 1997, Thermal and petrologic study of the CH-A well from the Chipilapa-Ahuachapan geothermal area, El Salvador: *Geothermics*, v. 26, p. 701-714.
- González-Partida, Eduardo, y Martínez-Serrano, Raymundo, 1989, Geocronología, termomicrometría e isotopía de azufre y carbono de la brecha cuprífera La Sorpresa, Estado de Jalisco: Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geología, Revista, v. 8, núm. 2, p. 202-210.
- González-Partida, Eduardo; Torres-Rodríguez, Vicente, y Birkle, P., 1994, Petrología experimental para la determinación termobarométrica de paragénesis minerales—las inclusiones fluidas: *Revista del Instituto de Investigaciones Eléctricas*, v. 18, p. 142-144.
- González-Partida, Eduardo; Torres-Rodríguez, Vicente; y Nieva-Gómez, David, 1989, Caracterización mineralógica en 10 pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 5, núm. 3, p. 347-374.
- 1990, Petrografía y metamorfismo hidrotermal del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.—Comportamiento en función del metamorfismo: *Geotermia, Revista Mexicana de Geoenergía*, v. 6, núm. 1, p. 43-92.
- Nieva-Gómez, David; Barragán-Reyes, R.M.; Cathelineau, Miguel; González-Partida, Eduardo; Oliver-Hernández, R.; y Verma-Pal, M., 1987, Estudio de la estructura hidroclástica y de la distribución de parámetros físico-químicos del yacimiento de Los Azufres: México, D.F., Comisión Federal de Electricidad, Informe final, 356 p.
- Nieva-Gómez, David; Iglesias-Rodríguez, E.; Arellano-Gómez, V.; Contreras-López, E.; Cathelineau, Miguel; y Quijano-De León, J., 1986, Developments in geothermal energy in Mexico; Part 4, Evaluation of geothermal resources, multidisciplinary studies of the Los Azufres field: *Heat Recovery Systems*, v. 6, p. 201-207.
- Pradal, E., 1990, La caldera de Los Azufres (Mexico)—Contexte volcanologique d'un grand champ géothermique: Université Clermont-Ferrand, disertación doctoral, 250 p. (inédita).
- Pradal, E., y Robin, Claude, 1985, Découverte d'une caldera majeure associée au champ géothermique Los Azufres, Mich.: *Comptes rendus de l'Académie des Sciences (Paris)*, t. 301, serie 2, núm. 14, p. 2069-2074.
- 1986, Major caldera structure at the origin of the Los Azufres geothermal center (Mexico): *International Volcanology Congress, Auckland, New Zealand, Abstracts*, p. 68 (abstract).
- 1994, Long-lived magmatic phases at Los Azufres volcanic center, Mexico: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 63, p. 201-215.
- Robin, Claude, y Pradal, E., 1993, The Los Azufres caldera, Mexico—Comment on the paper by Ferrari *et al.*, or An attempt to understand the volcanic structure: *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, v. 56, p. 339-344.
- Roedder, Edwin, 1984, Fluid Inclusions, *in* Ribbe, P.H., ed., *Reviews in Mineralogy: Mineralogical Society of America*, núm. 12, 644 p.
- Silva-Mora, Luis, 1979, Contribution à la connaissance de L'axe volcanique transmexicain—étude géologique et pétrologie des lavas du Michoacán oriental: Universidad d'Aix-Marseille III, tesis de doctorado de tercer ciclo, 146 p. (inédita).
- Suárez-Arriaga, M.; Samaniego, Fernando; y Tello-Ruiz, M., 1997, An updated survey of non-condensable gases evolution at Los Azufres, Mexico, geothermal reservoir: Stanford, Stanford University, Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, 22, Proceedings, p. 27-33.
- Tello-Hinojosa, E., 1998, Estudio geoquímico e isotópico para definir el estado de equilibrio agua-roca del reservorio de Los Azufres, Mich.: Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Estudios de Posgrado, II Seminario doctoral, 50 p.
- Shepherd, T.J.; Rankin, A.H.; y Alderton, D.H., 1985, A practical guide to fluid inclusion studies: Nueva York, Chapman and Hall, 239 p.

Manuscrito recibido: 19 de octubre de 1999

Manuscrito aceptado: 9 de febrero de 2000