

Análisis geoquímico-isotópico de las especies carbónicas del fluido geotérmico de Los Humeros, Puebla, México

E. González-Partida, R.M. Barragán-R. y D. Nieva-G.

Instituto de Investigaciones Eléctricas, Depto. de Geotermia, Cuernavaca, Mor., México

Recibido: 27 de octubre, 1991; aceptado: 18 de mayo, 1992.

RESUMEN

Evidencias geoquímicas muestran que los fluidos del yacimiento de Los Humeros presentan un exceso de vapor con mezcla de un fluido agresivo proveniente de un segundo yacimiento y sólo los pozos someros como el H-1 no son afectados por tal fenómeno. Datos de composición química de salmuera del pozo H-1 fueron utilizados para estudiar el fenómeno de ebullición a condiciones de yacimiento y su repercusión en la formación de calcita. Los resultados muestran que aún a pequeños porcentajes de ebullición (5 a 100 ‰) el ácido carbónico disminuye su actividad en el fluido residual propiciando la precipitación de calcita y desprendiendo dióxido de carbono hacia niveles más someros. La distribución espacial de calcita está caracterizada por un progresivo incremento de isótopos ligeros hacia los niveles más someros del yacimiento, mientras aquellos que se formaron a mayores profundidades con valores promedio de $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = -0.36$ se confunden con los valores isotópicos que muestran las calizas del basamento sedimentario cuyo valor es de $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = -0.3$ lo que permite su relación genética.

PALABRAS CLAVE: Los Humeros, fluido de yacimiento, especies carbónicas, calcitas hidrotermales, comportamiento isotópico de calcita y CO_2 , origen del carbono.

ABSTRACT

A geochemical analysis of discharged fluids from wells showed a mixing process in the Los Humeros geothermal field. It was proposed that there are two different reservoirs: an upper liquid-dominated reservoir and a steam-dominated reservoir containing aggressive fluids at greater depths. Shallow wells such as H-1 are not affected. Excess steam calculations for deep wells yield high values except for H-1 suggesting equilibrium conditions. Chemical data for well H-1 indicated that the carbonic species behaviour agrees with thermodynamic variations produced as a result of the reservoir boiling process. The activity of CO_2 in the liquid phase decreases as calcite is precipitated and carbon dioxide is released to shallower levels. The spatial evolution of the fluid is related to isotopic behaviour since the lighter carbon isotopes are found in the shallower levels. The deep calcites show average values of $\delta^{13}\text{C}$ from -0.36 to -3.86 ‰ toward the top of the reservoir. Isotopic results for carbon dioxide in total discharge show the same variation with values for $\delta^{13}\text{C}$ of -5.8 ‰ in the upper zone of the reservoir. Unaltered rock from the Cretaceous basement of the Tamaulipas Formation yields an average value for $\delta^{13}\text{C}$ of -0.3 ‰ . Thus some isotopes may originate from the Mesozoic sedimentary basement of the Quaternary caldera which caldera originated the geothermal field.

KEY WORDS: Los Humeros, reservoir fluid, carbonic species, hydrothermal calcites, isotopic behaviour of calcite and CO_2 , carbon origin.

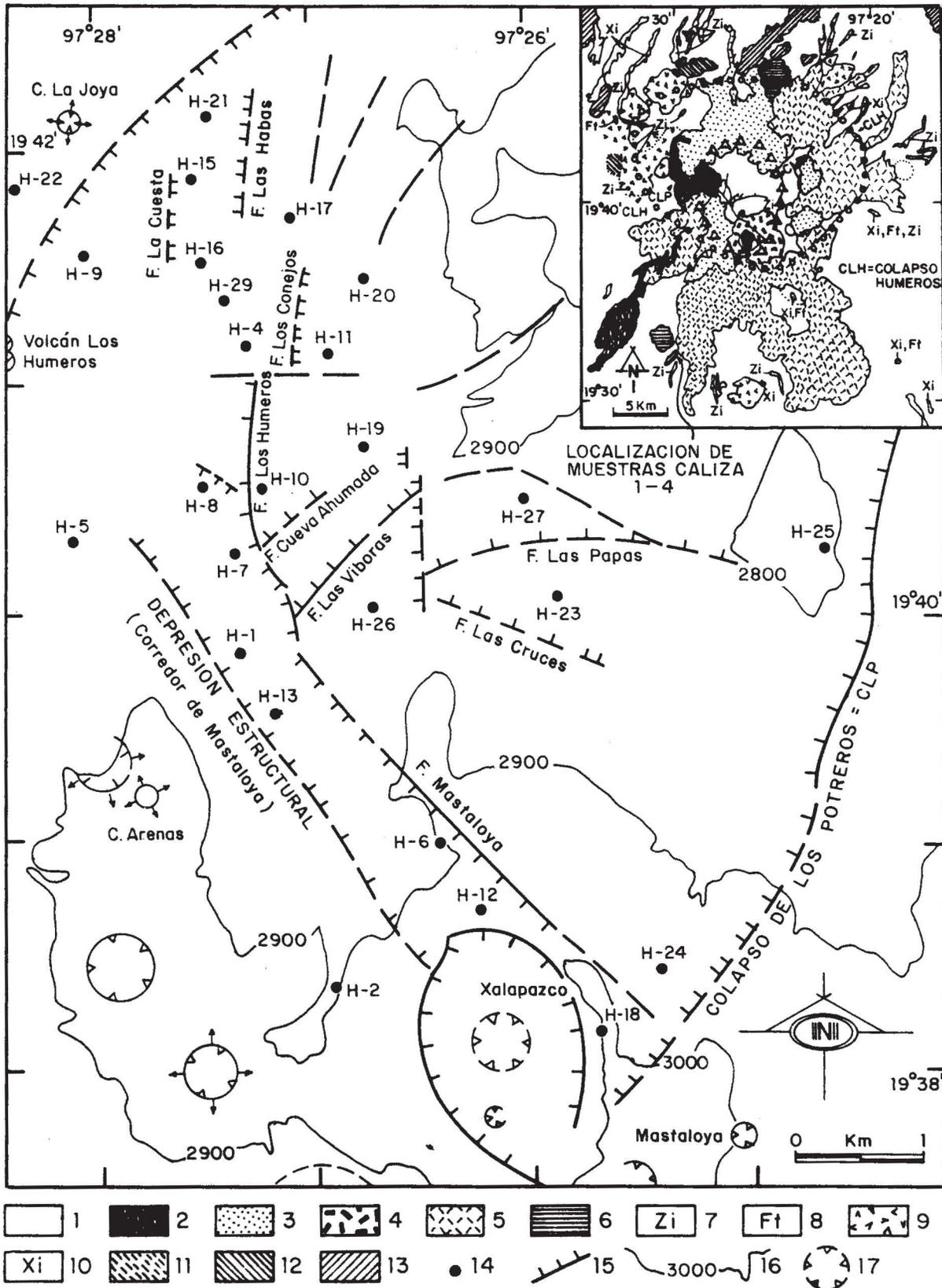
INTRODUCCION

El campo geotérmico de Los Humeros es un centro volcánico explosivo de edad cuaternaria localizado en los límites de Puebla y Veracruz, México (Figuras 1 y 2). Las fases caldéricas explosivas tienen como basamento rocas andesíticas e intrusivas del Terciario y calizas cretácicas en donde las granodioritas desarrollaron una aureola de metamorfismo de contacto (Verma, 1981, 1983, 1984; Ferriz y Mahood, 1984; Ferriz, 1985).

La salmuera de 32 pozos perforados es del tipo mixto: clorurado sódico a sulfatado (López y Munguía, 1989; Barragán *et al.*, 1991). A condiciones atmosféricas los pozos producen desde vapor seco hasta mezcla con predominio de líquido, caracterizándose por producir vapor por los pozos del Colapso Central y mezcla los del Corredor de Mastaloya. Coincidentemente de acuerdo con los trabajos

de Munguía y Robles (1989), el mayor contenido de volátiles se encuentra hacia el Colapso Central y el Xalapazco-Mastaloya (H-12 y H-18).

Dentro de la complejidad de un sistema hidrotermal (fósil o reciente) los isótopos estables sólo proporcionan parte de la información necesaria para su conocimiento (Valley *et al.*, 1986). Su empleo para la solución de problemas geológicos depende de que se cumplan condicionamientos físico-químicos sin los cuales la información isotópica no tiene ningún sentido; el equilibrio químico e isotópico entre las diferentes especies es uno de los factores más importantes (Henley *et al.*, 1984). Definir la fuente original de las distintas especies y su evolución posterior ha sido una preocupación constante para poder obtener una aplicación práctica a dichos comportamientos. Entre los distintos medios geológicos, los sistemas hidrotermales actuales proporcionan una gran cantidad de información útil



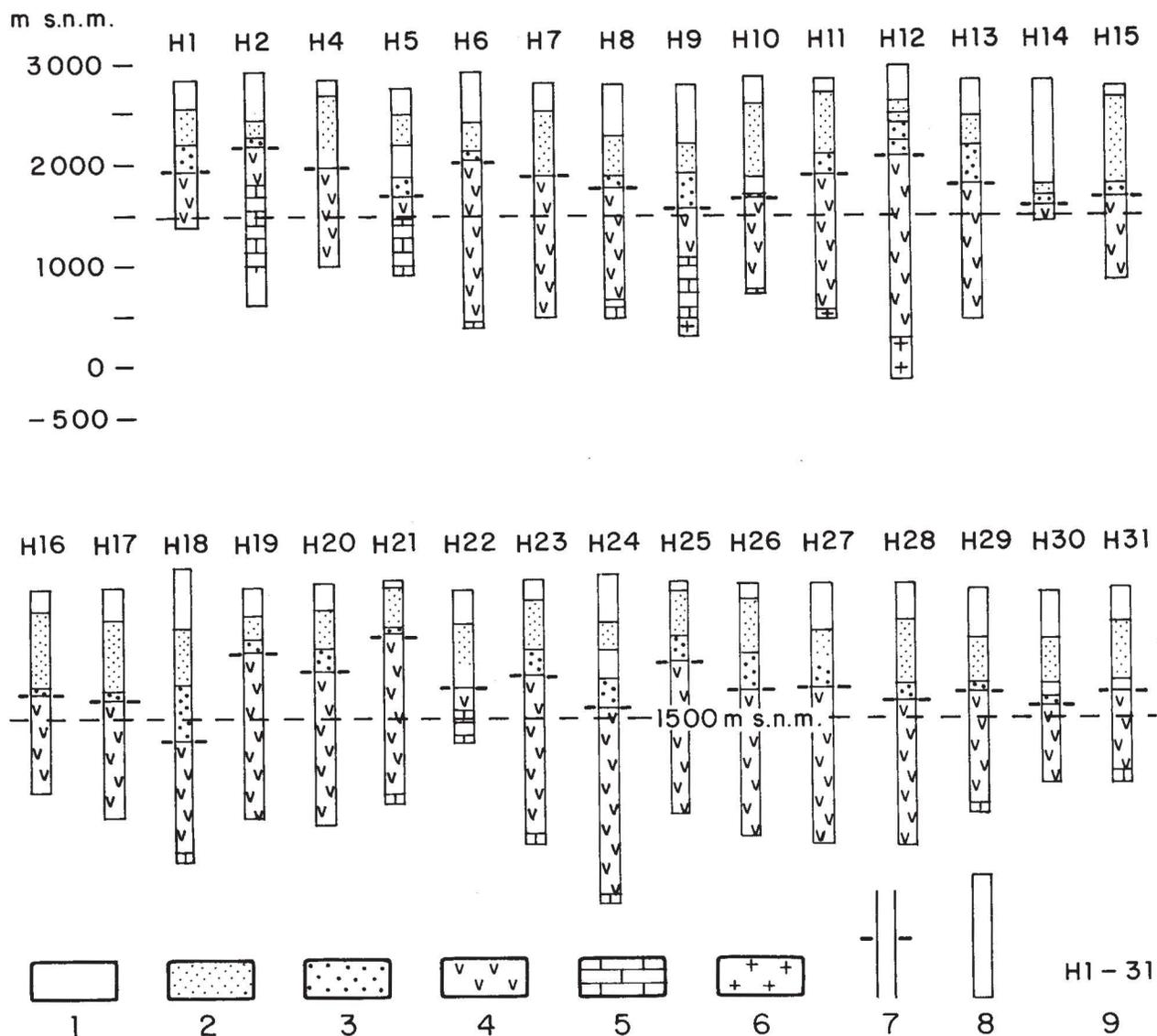


Fig. 2. Columnas litológicas de los pozos de Los Humeros que muestran las diferentes unidades litológicas separadas por eventos. 1-Volcanismo post-caldera, 2-Ignimbritas Xaltipan, 4-Andesitas Teziutlán, 5-Calizas Mesozoicas, 6-Intrusivo, 7-Límite de dos eventos magmáticos: precaldérico y caldérico, 8-Profundidad del pozo y 9-Pozo geotérmico.

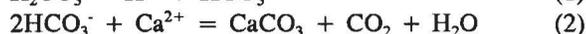
en el plano físico-químico que no es posible de observar en sistemas fósiles, principalmente en lo referente al control geoquímico de la salmuera; en este sentido, la evolución termodinámica del fluido primario a profundidad en el campo geotérmico de los Humeros es reflejada en el comportamiento mineralógico así como geoquímico e isotópico de la salmuera. El estudio geoquímico e isotópico del carbono en calcitas y CO₂ de la descarga total objeto de este trabajo, pretende aportar pruebas sobre el origen del carbono y su evolución espacial.

QUIMICA DEL FLUIDO DE DESCARGA

La composición química del fluido del yacimiento en

fase líquida y vapor ha sido calculada por Tello (1987), López y Munguía (1989) y Barragán *et al.* (1991). Se coincide que a fondo de yacimiento se tiene una temperatura promedio de 290 °C a 300 °C, a excepción del pozo H-1 (más somero) que es de 250 °C. Se demuestra igualmente para los pozos profundos que la entalpía específica de producción corresponde a un fluido con exceso de vapor, el cual en parte reflejaría la mezcla de dos fluidos distintos (o dos yacimientos). La alimentación de un estrato profundo que perturba la composición química de un yacimiento somero se ha demostrado en los trabajos de López y Munguía (1989) y Barragán *et al.* (1989), por lo cual sólo el pozo H-1 presenta las características geoquímicas del yacimiento somero no perturbado.

Utilizando un programa de cómputo que modela el equilibrio químico de un fluido geotérmico a condiciones de yacimiento (Barragán y Nieva, 1989), se calculó para el fluido del pozo H-1 la actividad de las especies carbónicas considerando diferentes tasas de ebullición y una temperatura de 250 °C. Los resultados se muestran en la Tabla 1 y fueron graficados en la Figura 3. Como habría de esperarse a mayores tasas de ebullición el fluido residual se empobrece principalmente en ácido carbónico, mientras que el dióxido de carbono en la fase vapor aumenta su concentración. Este hecho simple en el terreno geoquímico asegura de manera satisfactoria la producción de calcita y dióxido de carbono mediante las reacciones:



Este mecanismo de producción de calcita y dióxido de carbono en el actual sistema hidrotermal de Los Humeros tendría como consecuencia una evolución espacial de las especies carbónicas en donde su comportamiento isotópico estaría regido en gran parte por los cambios de temperatura en el sistema.

METODOLOGIA DE TRABAJO

Para la realización del presente trabajo se han utilizado recortes de perforación proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad, muestras de calizas no alteradas y CO₂ de la descarga total. Para llevar a cabo los estudios isotópicos del carbono en calcitas se comienza con la separación mecánica de dicho mineral. Esta separación consiste en extraer con la ayuda del microscopio estereoscópico los cristales de calcita que se encuentran en los recortes de perforación. La búsqueda de dicho mineral se realizó a cada 10 m, ya que sólo en algunas zonas excepcionales se encontraba suficiente cantidad de calcita. La cantidad necesaria para poder realizar un análisis es de 40 a 50 mg y se realizaron por duplicado. Las muestras fueron pulverizadas en un mortero de ágata hasta formar un polvo muy fino, ya que así se facilita el desprendimiento de CO₂ del CaCO₃ durante la reacción con el ácido. Entre 40 y 50 mg de muestra se introducen a un frasco reaccionador con brazo; en el brazo se colocan 5 ml de ácido fosfórico (H₃PO₄) al 100 % cuidando que el ácido no se mezcle con la muestra. La botella se tapa y es evacuada. Bajo estas condiciones, el CO₂ gaseoso que se obtiene de la reacción no es alterado por la presencia de aire. Después de haberse realizado el vacío se lleva a cabo la mezcla, se coloca el tubo reaccionador en un baño de agua a 25 °C durante 2 h con el fin de que en este lapso de tiempo se desprenda la mayor cantidad de CO₂. Después de haber transcurrido este tiempo, la extracción de CO₂ se efectúa al alto vacío, capturándolo en una trampa usando secuencialmente una mezcla frigorífica compuesta de hielo seco-etanol para congelar el agua que se produce en la reacción y nitrógeno líquido

(-190 °C) para congelar el CO₂. Después de 5 min. se procede a transferir el CO₂ al frasco contenedor, el cual se encuentra al vacío. Una vez concluido el procedimiento anterior, las muestras de CO₂ se encuentran listas para su análisis en el espectrómetro de masas (Castillo et al., 1988).

Los análisis isotópicos del CO₂ obtenidos de las calcitas se realizaron en un espectrómetro de masa FINNIGAN MAT-250 en el Instituto de Física de la UNAM. Las lecturas del equipo fueron corregidas directamente por oxígeno-17 contribuido al colector. Las correcciones hechas al estándar de trabajo (NBS16) fueron de $\delta^{13}\text{C} \text{‰} = 1.0676 \delta^{45} - 0.03386 \delta^{46}$. Los errores espectrométricos en cada resultado isotópico son de $\pm 0.1 \text{‰}$.

RESULTADOS ISOTOPICOS

La Tabla 2 muestra el comportamiento isotópico del carbono para calcitas hidrotermales de neoformación en pozos del campo geotérmico a diferentes profundidades. Se puede apreciar que en las zonas más profundas del yacimiento los valores isotópicos revelan una abundancia de isótopos pesados: por ejemplo, el pozo H-15 a una profundidad de 1950 m presenta un $\delta^{13}\text{C} \text{‰} = +0.70$ al igual que el pozo H-16 que, a una profundidad de 2030 m, su $\delta^{13}\text{C} \text{‰} = -1.74$. Hacia los niveles más superficiales se tienen valores más negativos: -3.86‰ a 390 m para el pozo H-16 y -3.29‰ a 230 m para el pozo H-15.

En la Tabla 3 se han reportado valores isotópicos de carbono obtenidos de calizas no hidrotermales de la Formación Tamaulipas del Cretácico, las cuales afloran en el extremo sur del colapso caldérico próximo al Cerro el Aguila y las ruinas de la ciudad antigua de Caltonac, (coordenadas: 97° 30' y 19° 32' 30''). Se presume que estas rocas son el basamento local del yacimiento debido a que han sido cortados en varios pozos del campo. La variación isotópica encontrada fue de $+0.32$ a $-0.9 \delta^{13}\text{C} \text{‰}$. En la misma tabla se muestra el comportamiento isotópico del CO₂ de la descarga total según los datos de Truesdell y Quijano (1988). Mediciones isotópicas hechas en otros sistemas hidrotermales activos como son The Geysers, Salton Sea, Cerro Prieto, Broadlands, Wairakei y Los Azufres son comparadas con los resultados obtenidos en este trabajo en la Figura 3.

DISCUSION

Teóricamente el origen del carbono puede ser establecido si se conocen los valores isotópicos de cada uno de los componentes carbónicos y su respectiva fracción molar. Así la fuente original será igual a la suma total de la composición isotópica de cada especie carbónica multiplicada por su fracción molar; en el campo geotérmico de Los Humeros, Puebla cinco especies carbónicas fueron analizadas, pero isotópicamente sólo fueron medidas dos, la

Tabla 1
Composición química del fluido del pozo H-1.

Fase líquida: (ppm)						
Na	K	Ca	Mg	Li	Cl	HCO ₃ ⁻
269.0	43.8	1.2	0.012	0.9	120.0	361.0
CO ₃ ⁼	SO ₄ ⁼	B	As	SiO ₂		
70.0	113.9	214	3.9	799.5		
Fase vapor: fracción molar x 1000 base seca						
CO ₂	H ₂ S	H ₂	CH ₄	N ₂	NH ₃	
962.7	29.5	1.25	0.59	2.31	3.6	

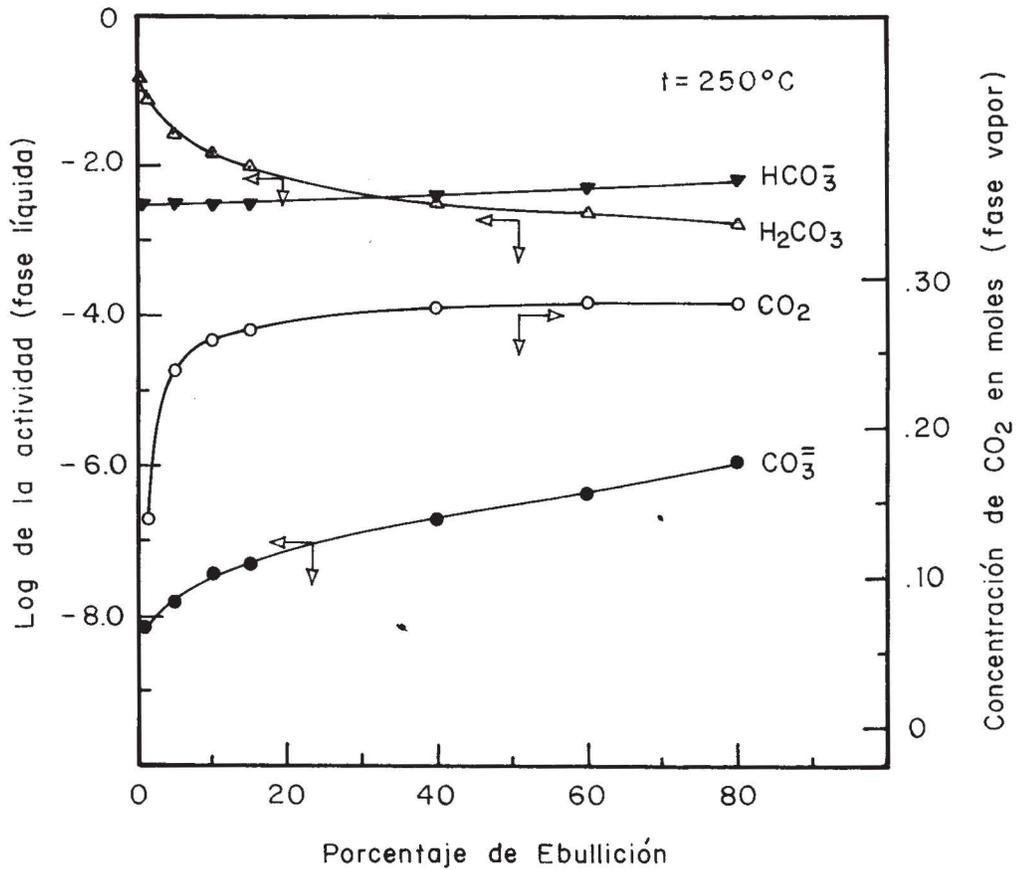


Fig. 3. Comportamiento de las especies carbónicas para el fluido del pozo H-1 contra el porcentaje de ebullición.

Tabla 2

Comportamiento isotópico del carbono en calcitas hidrotermales de neofarmación.

Número de Pozo	Profundidad m	$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$
H-16	390	-3.86
H-16	490	-3.69
H-16	590	-3.52
H-16	910	-3.14
H-16	2030	-1.74
H-15	230	-3.29
H-15	330	-3.07
H-15	790	-2.82
H-15	1930	0.08
H-15	1950	0.70
H-15	1970	-0.36
H-17	1300	-3.43
H-29	230	-0.52
H-12	1320	-2.88

actividad del CO_2 está perturbada por un fenómeno de mezcla y los resultados sobre la fuente inicial sólo pueden ser aproximativos.

De acuerdo con las características geológico-estructurales del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. (ver Figs. 1 y 2), el origen de las especies carbónicas podría tener tres fuentes principales (como se señala en la Figura 4):

- 1) Incorporación de aguas meteóricas al sistema hidrotermal activo.
- 2) Disolución y/o decarbonatación de las rocas sedimentarias.
- 3) La cámara magmática, la cual se encuentra en proceso de enfriamiento a una profundidad de 7 a 8 km según Castillo-Román *et al.* (1991) y que puede aportar elementos volátiles como el CO_2 .

Según Hoefs (1980), el CO_2 de origen magmático tiene un rango de $\delta^{13}\text{C} = -8$ a -5 ‰ . De los resultados mostrados en la Tabla 3 sólo los pozos H-18 y H-12 muestran valores isotópicos $\delta^{13}\text{C}$ para el CO_2 de entre -5.8

Tabla 3

Comportamiento isotópico del CO_2 de la descarga total (Truesdell y Quijano, 1988) y en calizas cretácicas de la Formación Tamaulipas (basamento no alterado).

Nombre del Pozo y/o muestra	$\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$
H-1	-3.5
H-6	-4.1
H-7	-3.7
H-8	-3.3
H-9	-4.5
H-10	-4.0
H-11	-3.5
H-12	-5.4
H-16	-4.4
H-17	-4.0
H-18	-5.8
H-19	-3.2
CALIZA-1	-0.6
CALIZA-2	-0.8
CALIZA-3	-0.14
CALIZA-4	+0.32

y -5.4 ‰ respectivamente, rango que se puede considerar de origen magmático, puesto que el $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 de las aguas meteóricas varía de -30 a -7 ‰ y el $\delta^{13}\text{C}$ del CO_2 de las rocas carbonatadas es de -2 a $+2 \text{ ‰}$ según Hoefs (1980). A la argumentación anterior se puede añadir que en un sistema hidrotermal ningún valor isotópico puede ser más positivo que el de su fuente original. El fraccionamiento progresivo (valores $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$ cada vez más negativos o mayor abundancia de isótopos ligeros) se produce por procesos de evolución natural del fluido como son: separación del fluido del magma, incorporación de CO_2 de diferentes orígenes al sistema geotérmico, reacciones fluido-roca, enfriamiento del fluido al penetrar a capas más superficiales y variaciones en los parámetros físico-químicos al mezclarse fluidos geotérmicos con el nivel de infiltración de las aguas meteóricas. Por lo anterior se deduce que los valores isotópicos de $\delta^{13}\text{C}$ más pesados o positivos para el CO_2 medido en los otros pozos geotérmicos no pueden ser explicados mediante un origen puramente magmático. Lo mismo se puede argumentar para las calcitas hidrotermales de neo-formación, en donde los valores más negativos son de -3.86 ‰ .

Una fuente sedimentaria para las especies carbónicas así como una participación de aguas meteóricas locales

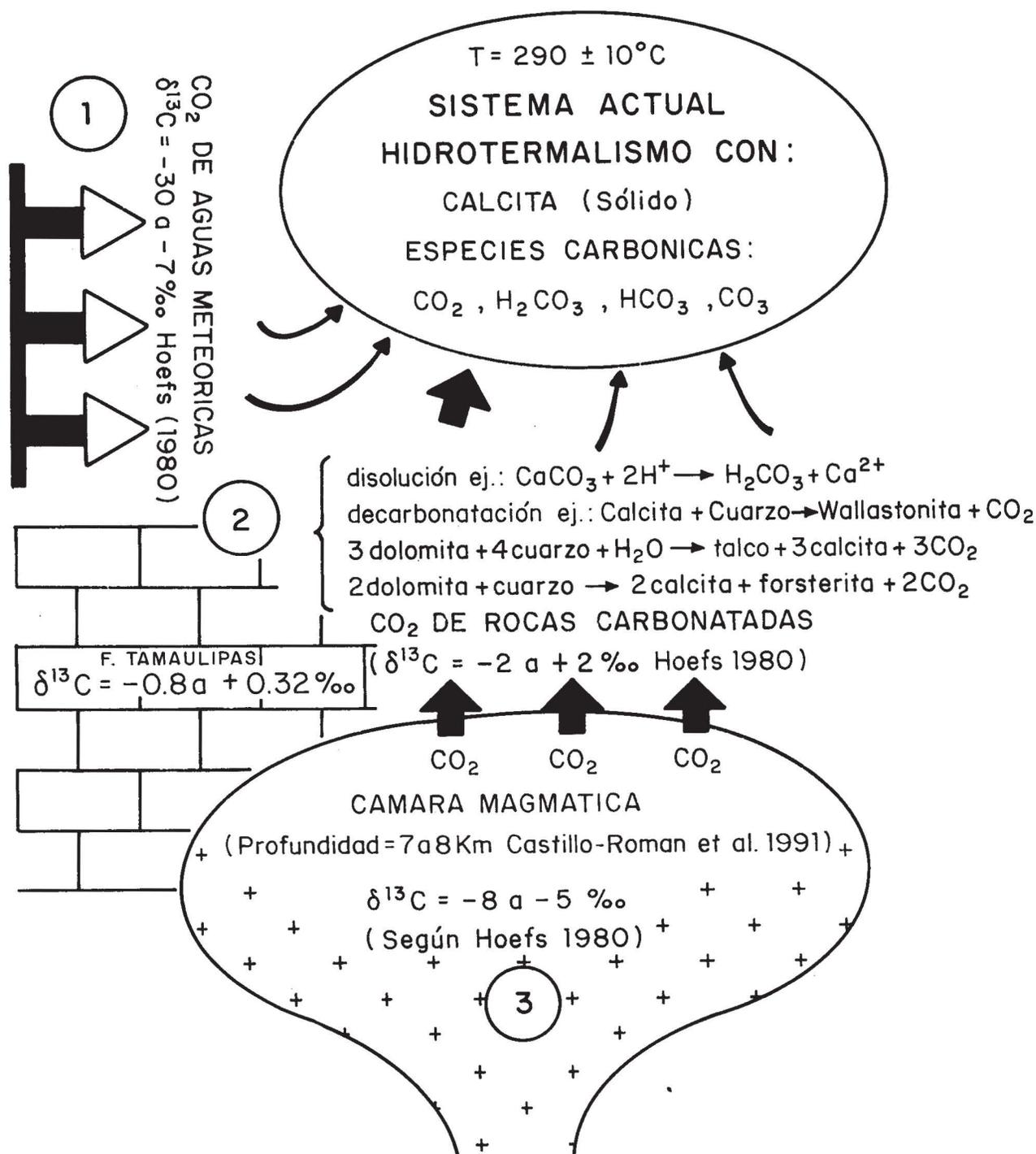


Fig. 4. Representación esquemática de las posibles fuentes de las especies carbónicas en Los Humeros, Puebla.

(Barragán *et al.* 1988), puede ser el origen para los valores isotópicos encontrados en Los Humeros, Puebla. En efecto, la caliza de la Formación Tamaulipas, basamento local de la caldera de los Humeros tiene un comportamiento isotópico de $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = -0.3$ en promedio. Por otro lado, las calcitas neoformadas profundas más precoces tienen valores de -0.36 ‰ , lo que sugiere una lixiviación hidrotermal importante de especies carbónicas a partir del

substrato sedimentario, presumible como la fuente principal del carbono. El equilibrio químico del fluido del yacimiento de los Humeros ha sido calculado por Barragán *et al.* (1991) y por las observaciones isotópicas de azufre hechas por Arnold y González-Partida (1987). Así los mecanismos de producción de calcita y CO₂ se pueden explicar a partir de la composición química de la salmuera del pozo H-1 representada gráficamente en la Figura 5; de ella se deduce

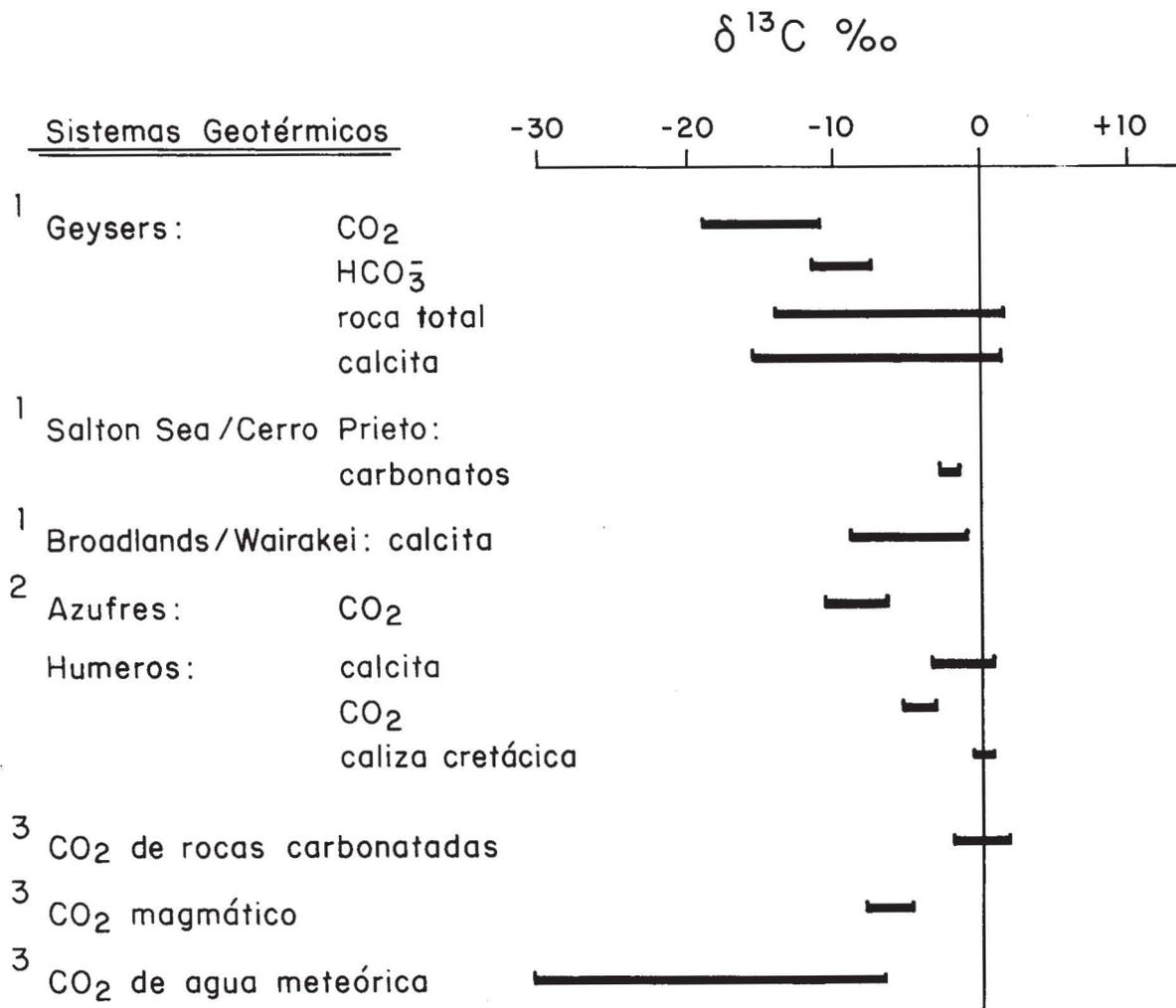


Fig. 5. Comportamiento isotópico $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$ de algunos campos geotérmicos y del CO_2 : 1-tomado de Field y Fifarek (1985), 2-tomado de Tabaco et al (1991), 3-tomado de Hoefs (1980).

que el ácido carbónico al disociarse provoca la precipitación de calcita y desprendimiento de dióxido de carbono, el cual aumenta su actividad en la fracción de vapor (generado como consecuencia de una ebullición provocada principalmente por una caída de presión en el fluido geotérmico); así hacia los niveles más superficiales del sistema se deberían esperar calcitas con valores isotópicos más negativos, (puesto que la temperatura del fluido hidrotermal es menor a medida que éste se aproxima a la superficie) así como un dióxido de carbono enriquecido cada vez más con isotópos ligeros, sobre todo si se considera su mayor movilidad y concentración como consecuencia hacia la cima del sistema hidrotermal (movilidad que se ve favorecida con un incremento en la permeabilidad secundaria, producto de un fracturamiento o fallamiento).

A la luz de los resultados isotópicos hechos en las calcitas de neoformación reportadas en la Tabla 3, se puede verificar una de las observaciones anteriores. En efecto, los pozos H-15 y H-16 muestran respectivamente

una disminución de isotópos pesados hacia los niveles más someros del campo. Sin embargo, el CO_2 estudiado por Truesdell y Quijano (1988), en las zonas de descarga en diferentes pozos del campo geotérmico y cuyos valores se muestran en la Tabla 3 no parece comportarse de la misma manera. La figura 6 señala en forma gráfica el comportamiento isotópico del dióxido de carbono contra la profundidad de la zona productora en cada uno de los pozos considerados; a diferencia de los valores mostrados en las calcitas, el CO_2 presenta valores más negativos hacia los niveles más profundos de producción. Así el pozo H-1 que produce a los 1400 m s.n.m., su $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = -3.5$, mientras que en el pozo H-18 que produce a 0 m s.n.m., su $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = -5.8$ al igual que el pozo H-12 que tiene su producción a -200 m s.n.m. y un valor de -5.4 ‰ .

El comportamiento isotópico inverso del CO_2 con respecto a la evolución esperada en el sistema hidrotermal de Los Humeros sólo puede ser explicado si el CO_2 profundo proviene de una fuente distinta a la del yacimiento

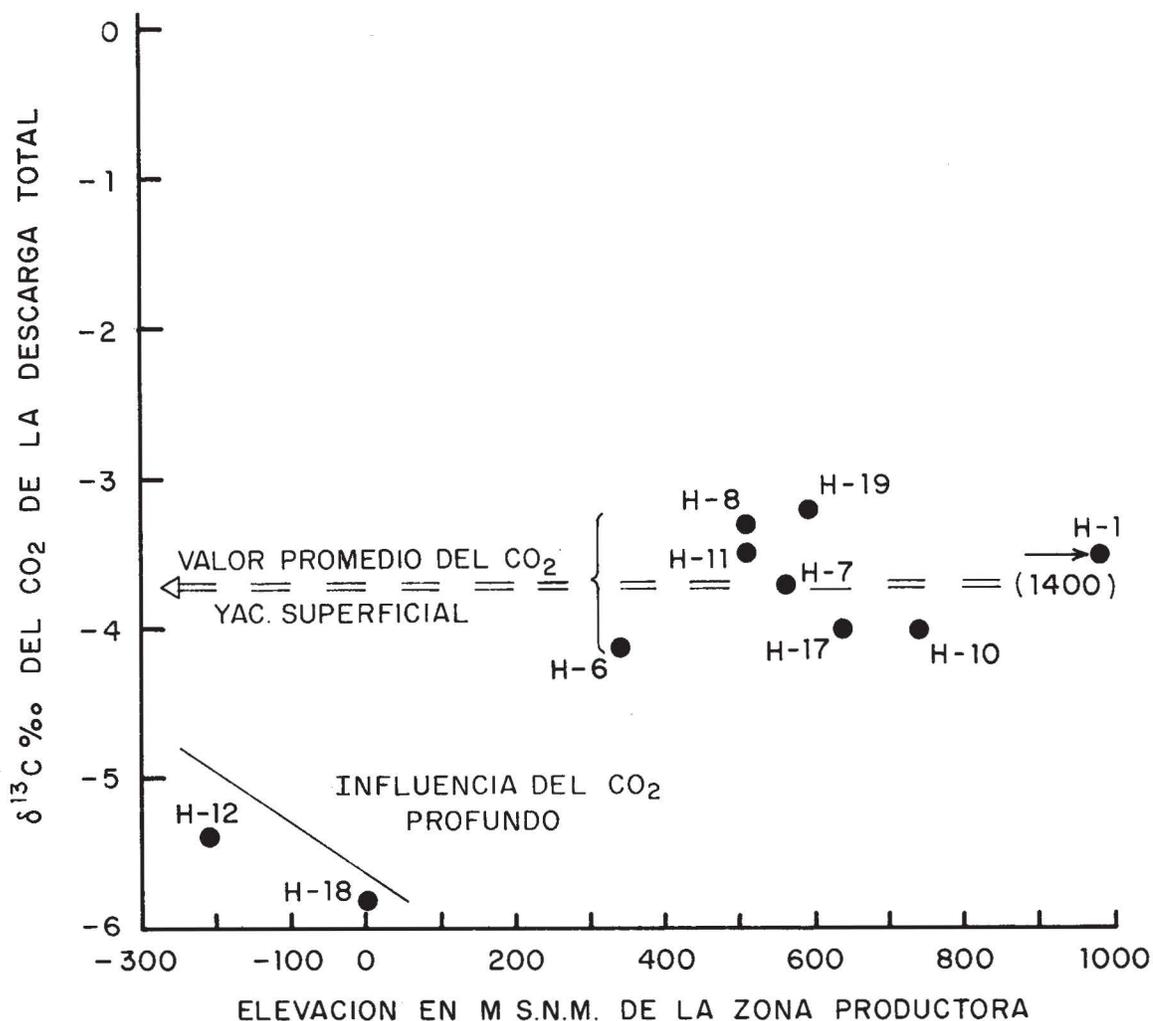


Fig. 6 Comportamiento isotópico $\delta^{13}\text{C} \text{ ‰}$ en función de la profundidad de producción de los pozos para el CO_2 .

somero (mezcla de CO_2 magmático y/o sedimentario con el CO_2 producido a partir de la formación de calcita).

La afirmación anterior esta apoyada por otras líneas de evidencia; Barragán *et al.* (1991) demostraron la existencia de dos fluidos distintos (o dos yacimientos distintos) a partir de un fenómeno de mezcla, Arnold y González-Partida (1987) mostraron por medio del estudio de los isótopos de azufre en diferentes especies sulfurosas del yacimiento geotérmico que éstas son el producto de la removilización de un basamento sedimentario, y los estudios petrológicos de González-Partida *et al.* (1991a y b) presentan una conclusión en el mismo sentido.

EL PAR CO_2 -CALCITA COMO GEOTERMOMETRO

La dificultad de usar el par isotópico CO_2 -calcita como geotermómetro radica en el hecho de que el fenómeno de mezcla señalado perturba la real composición isotópica del CO_2 haciéndose más ligera hacia las zonas

más profundas. Ohmoto y Rye (1979) determinaron una ecuación para conocer la temperatura a partir de este par isotópico, los factores de fraccionamiento fueron calculados por Bottinga (1969), así el factor de fraccionamiento entre las especies a $100^\circ\text{C} = -4$, a $200^\circ\text{C} = +0.2$, a $300^\circ\text{C} = +2.1$, a $400^\circ\text{C} = +2.6$, lo que implica claramente una abundancia de isótopos pesados a medida que la temperatura aumenta. De acuerdo con la Tabla 3 la composición isotópica del CO_2 en el pozo H-12 = -5.4 ‰ , y el de la calcita medida en el mismo pozo a 1320 m de profundidad es igual a -2.88 ‰ . La temperatura estimada por el geotermómetro isotópico sería igual a 125°C , valor incompatible con los resultados obtenidos por otros geotermómetros, donde las temperaturas calculadas oscilan entre 290°C (Barragán *et al.*, 1991) a 300°C por microtermometría de inclusiones fluidas (González-Partida *et al.*, 1991).

CONCLUSIONES

El campo geotérmico de Los Humeros se caracteriza por tener una salmuera mixta que varía del tipo clorurado a

sulfatado sódico. Los fluidos presentan el fenómeno de exceso de vapor y características de mezcla con un fluido agresivo de un segundo yacimiento para los pozos profundos. Por esta razón la composición química de los fluidos del pozo H-1, que no presenta el fenómeno de exceso de vapor, pudo utilizarse para el cálculo de actividades de las especies en su estado natural no perturbado.

Las actividades de las especies carbónicas a condiciones de yacimiento y las diferentes tasas de ebullición para el fluido de este pozo, permiten visualizar que la actividad del ácido carbónico disminuye en relación inversa a la concentración del dióxido de carbono en la fase vapor, mecanismo que asegura la precipitación de calcita.

Las variaciones espaciales de la calcita hacia niveles más someros del campo manifiestan una evolución isotópica de acuerdo con un aumento de isótopos ligeros hacia la parte sumital del campo, la mezcla de un CO₂ profundo más fraccionado isotópicamente impide su uso como geotermómetro.

El basamento calcáreo mesozoico parece ser la fuente principal de las especies carbónicas puesto que los valores isotópicos de las calcitas más profundas se confunden con los resultados obtenidos en calizas no alteradas.

BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD, M. y E. GONZALEZ-PARTIDA, 1987. Le système hydrothermal actuel de Los Humeros Pue. (Mexique): Etat du système SO₄-H₂S a 300°C, origine du soufre et phénomènes d'oxydation associés à l'ébullition du fluide ascendant. *Mineral. Depos.*, 22, 90-98.
- BARRAGAN, R.M. y D. NIEVA, 1989. EQYAC: Modelo de equilibrio químico del fluido geotérmico a condiciones de yacimiento. *Geotermia Rev. Mex. Geoener.*, 5, 53-64.
- BARRAGAN, R.M., M. GUEVARA, E. GONZALEZ-PARTIDA, M.G. IZQUIERDO, D. NIEVA, R. OLIVER, E. PORTUGAL, E. SANTOYO y M.P. VERMA, 1988. Caracterización de yacimientos geotérmicos por medio de la determinación de parámetros físico-químicos. Cap. 7, Parte 2, Inf. IIE/11/2386/II 01/F, Cuernavaca, México, 195-243.
- BARRAGAN, R.M., M. CERVANTES A., C. DIAZ, V.H. GARDUÑO, E. GONZALEZ-PARTIDA, S. HOLGUIN, F. MEZA, D. NIEVA G., N. ROSAS G. y A. SAMPEDRO, 1989. Caracterización del fenómeno de corrosión-obturación de pozos de Los Humeros, Pue. Informe IIE/11/3753/I-15F, Cuernavaca, México, 96 pp.
- BARRAGAN, R.M., D. NIEVA, E. SANTOYO, E. GONZALEZ-PARTIDA, M.P. VERMA y J.M. LOPEZ M., 1991. Geoquímica de fluidos del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., (México). *Geotermia Rev. Mex. Geoener.*, 7, 23-48.
- BOTTINGA, Y., 1969. Calculated fractionation factors for carbon and hydrogen isotope exchange in the system calcite - carbon dioxide - graphite - methane - hydrogen - water vapor. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 33, 49-64.
- CASTILLO, R.C., S. RAMOS, J. NIETO y E. GONZALEZ-PARTIDA, 1988. Carbon isotopic analysis in Mexico: A progress report on some Mexican ore deposits and metamorphic rocks. *Geofis. Int.*, 27, 149-157.
- CASTILLO-ROMAN, J., S.P. VERMA y J. ANDAVERDE, 1991. Modelación de temperaturas bajo la Caldera de Los Humeros, Puebla, México, en términos de profundidad de la cámara magmática. *Geofis. Int.*, 30, 149-172.
- FERRIZ, H., 1985. Zoneamiento composicional y mineralógico en los productos eruptivos del centro volcánico de Los Humeros, Puebla, México. *Geofis. Int.*, Volumen Especial sobre el Cinturón Volcánico Mexicano (Editor, S.P. Verma), Parte 1, 24, 97-157.
- FERRIZ, H. y G.A. MAHOOD, 1984. Eruption rates and compositional trends at Los Humeros volcanic center, Puebla, Mexico. *J. Geophys. Res.*, 89, 8511-8524.
- FIELD, C.W. y R.H. FIFAREK, 1985. Light stable-isotope systematics in the epithermal environment. *Geology and Geochemistry of Epithermal Systems, Rev. Econ. Geol.*, 2, (Ed. Berger B. R. y Bethke P. M.), Cap. 6, 99-128.
- GONZALEZ-PARTIDA, E., R.M. BARRAGAN, D. NIEVA G., L. QUIJANO, J.M. LOPEZ M. y H. GUTIERREZ P., 1991. Estudio de inclusiones fluidas en cuatro pozos del campo geotérmico de los Humeros, Puebla. *Geotermia, Rev. Mex. Geoener.*, 7, 185-200.
- GONZALEZ-PARTIDA, E., D. NIEVA G., R.M. BARRAGAN, L. QUIJANO, J.M. LOPEZ, y H. GUTIERREZ P., 1992. Comportamiento de las especies sulfurosas en cuatro pozos del campo geotérmico de Los Humeros, Puebla. *Geotermia Rev. Mex. Geoener.*, 7, 67-80.
- GONZALEZ-PARTIDA, E., 1993. Telescopio hidrotermal en el pozo H-12 de los Humeros, Puebla: Observaciones microtermométricas. *Geotermia Rev. Mex. Geoener.*, 8 (en prensa).

- HENLEY, R.W., A.H. TRUESDELL, y D.B. BARTON, 1984. Fluid mineral equilibrium in hydrothermal systems. *Rev. Econ. Geol.*, 1, 267 pp.
- HOEFS, J., 1980. Stable isotope geochemistry: Mineral and rocks, 2nd. edition. Springer-Verlag. Heidelberg-New York, 203 p.
- LOPEZ M., J.M. y F. MUNGUÍA B. 1989. Evidencias geoquímicas del fenómeno de ebullición en el campo geotérmico de Los Humeros, Pue., (México). *Geotermia, Rev. Mex. Geoener.*, 5, 89-106.
- MUNGUÍA B., F. y J. ROBLES C., 1989. Interacción geoquímica-petrológica del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Comisión Federal de Electricidad, México, Reporte Interno 35/89, 17 pp.
- OHMOTO, H. y O.R. RYE 1979. Geochemistry of hydrothermal ore deposits. (Editor: Barnes H.). John Wiley and Sons, 747 pp.
- TABACO, F., M.P. VERMA, D. NIEVA y E. PORTUGAL, 1991. Características geoquímicas e isotópicas del carbono en el sistema geotérmico de Los Azufres, *Mich. Geofis. Int.*, 30, 173-182.
- TELLO H., E., 1987. Características geoquímicas de la descarga de los pozos de Los Humeros, Pue. Comisión Federal de Electricidad, México, Reporte Interno, 12/87, 20 pp.
- TRUESDELL, A.H. y J.L. QUIJANO, 1988. Datos isotópicos de CO₂ en la descarga total de pozos en Los Humeros Pue. Comisión Federal de Electricidad, México, Reporte Interno 6/88, 5 pp.
- VALLEY, J W., H.P. TAYLOR y J.R. O'NEIL, 1986. Stable isotopes. *Rev. Mineral.*, 16, Mineralogical Society of America, 570 pp.
- VERMA, S.P., 1981. Los Humeros caldera, Puebla, Mexico: ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr and LILE evidence for its petrogenesis. IAVCEI Symp.-Arc Volcanism-Tokyo and Hakone, 404-405 (resumen extenso).
- VERMA, S.P., 1983. Neodymium and strontium isotope geochemistry of Los Humeros Caldera, Puebla, Mexico: Implications on magma genesis and magma chamber processes. *Nature*, 301, 52-55.
- VERMA, S.P., 1984. Alkali and alkaline earth element geochemistry of Los Humeros Caldera, Puebla, Mexico. *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 20, 21-40
-
- E. González-Partida, R.M. Barragan-R. y D. Nieva-G.
*Depto. de Geotermia, Div. Fuentes de Energía
Instituto de Investigaciones Eléctricas
Apdo. Postal 475, Cuernavaca, Mor., 62000, México.*