

Actualización del modelo geoquímico de Los Humeros, Pue., México

Óscar López Romero

Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Los Humeros, Carretera Perote-Los Humeros, km. 20, Campamento Maztaloya, Puebla.

Resumen

Con el fin de mantener actualizado el modelo geoquímico del campo geotérmico de Los Humeros, se realizó un compendio y actualización de los datos existentes hasta las últimas fechas de 2004. En su mayoría los pozos de este campo siguen produciendo una mezcla con agua de tipo bicarbonatado sódico con baja salinidad y sobresaturada en sílice y calcita en diversos grados. Las temperaturas de fondo no han presentado tendencia alguna a declinar con el paso del tiempo, de acuerdo con la geotermometría de fase líquida y gaseosa. Los geotermómetros de gases más representativos son los de CO_2/H_2 y $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$, y los gases están en equilibrio con la fase líquida a una temperatura que va de 264 a 312° C. Hasta la fecha no existe aún evidencias claras del efecto de la inyección en los fluidos del yacimiento.

Palabras Clave: Los Humeros, geoquímica, geotermometría, inyección.

Update of the Los Humeros, Pue., Mexico, geochemical model

Abstract

A summary and update through 2004 were made of the geochemical model for Los Humeros geothermal field. Most wells continue producing sodium-bicarbonate-type brine low in salinity and oversaturated in calcite and silica. The reservoir temperatures haven't dropped through time, according to the liquid and gas geothermometry. Most representative gas geothermometers are of the CO_2/H_2 and $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ types, and the gases are in equilibrium with the liquid phase at temperatures between 264 and 312 degrees Centigrade. We have no hard evidence on the effects of injection on reservoir fluids.

Keywords: Los Humeros, geochemistry, geo-thermometry, injection.

1. Introducción

El campo geotérmico de Los Humeros está situado en el estado de Puebla cerca de los límites con Veracruz (Fig. 1), y es el segundo sistema geotérmico mexicano que genera electricidad a partir de fluidos contenidos en rocas volcánicas. Es el tercer campo geotérmico en importancia en la República Mexicana, después de Cerro Prieto y Los Azufres, con una capacidad instalada de 35 MW, distribuidos en 7 plantas generadoras de 5 MW cada una. El campo está en explotación desde 1991.

El campo está en un valle que pertenece a la cuenca de Libres y Oriental, encontrándose a una elevación de 2806 metros sobre el nivel del mar y localizado entre las siguientes coordenadas geográficas: 19° 35' y 19° 45' de latitud Norte, 97° 23' y 97° 35' de longitud Oeste.

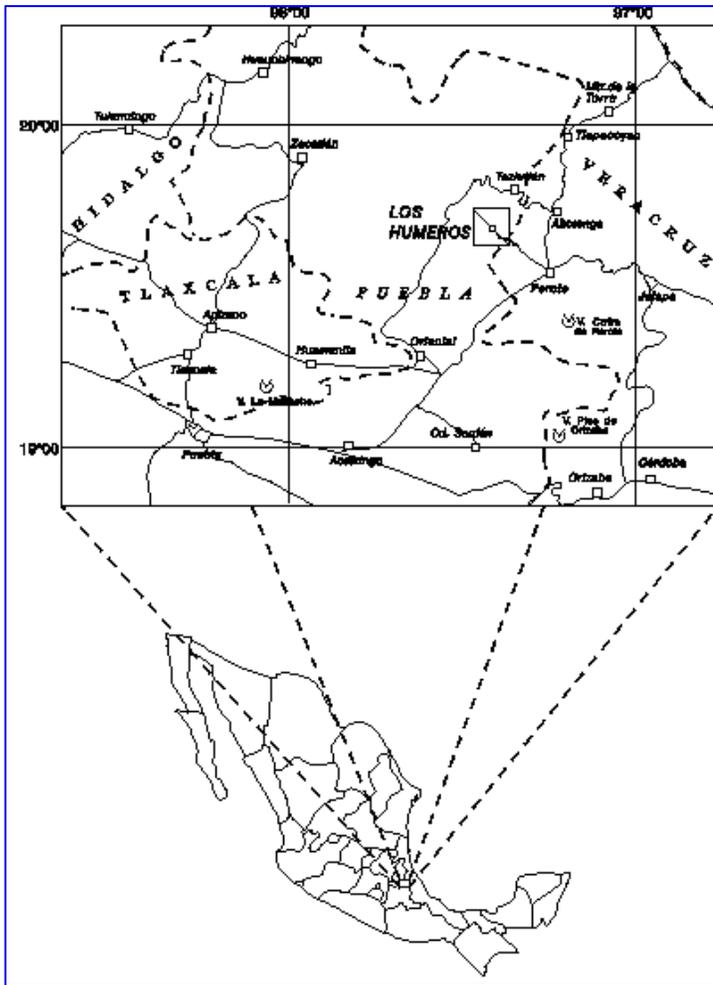


Fig. 1. Localización de Los Humeros.

Hasta la fecha se han perforado en el campo 40 pozos, cuyas profundidades van de 1450 a 3250 m. De ellos, 18 son productores (H-1, 3, 6, 7, 8, 9, 11, 12, 15, 16, 17, 19, 20, 30, 31, 32, 35, 36 y 37), 4 se utilizan o han utilizado como inyectores (H-13, H-29, H-38 y H-40). Los demás pozos son exploratorios, de estudio o de monitoreo. La producción promedio de vapor en la actualidad es de 510 toneladas por hora (t/h) y la de agua de 92 t/h, a condiciones de 8 bar, con una entalpía promedio de 2600 J/g.

El campo se localiza dentro de una caldera de origen volcánico llamada Los Humeros, que empezó su formación hace medio millón de años. Posteriormente, hace unos 100 mil años se formó dentro de ella la caldera de Los Potreros. Las últimas erupciones volcánicas ocurrieron hace unos veinte mil años (Gutiérrez-Negrín, 1982).

La zona de alimentación de los pozos, es decir la tubería ranurada, se encuentra en promedio a un intervalo de profundidad que va de los 1340 a los 1873 m. En la actualidad no es conveniente perforar pozos de más de 1800 m de profundidad en la parte central del campo, porque al penetrar a las andesitas de hornblenda, se encuentran fluidos con características químicas muy ácidas (Quijano y Torres, 1995).

2. Características químicas del agua

El agua de la mezcla que producen los pozos es de baja salinidad, del tipo de un vapor condensado, además de que su composición química es variable, esto es que depende del diámetro del orificio de la placa de producción del pozo. Esto se ilustra en la Figura 2, que presenta los cambios en el contenido relativo de cloruros, sulfatos y bicarbonatos (Giggenbach y Goguel, 1989) que ocurren en los pozos H-6 y H-8 cuando producen por orificios de 2, 2.5 y 3 pulgadas de diámetro.

En la Figura 3 se muestra la composición del agua que producen los pozos actualmente. Puede apreciarse que en general el tipo químico es bicarbonatado sódico, lo cual se debe a que son fluidos de la parte somera del yacimiento. Sin embargo, los pozos H-6, H-7, H-11 y H-16 tienen fluidos de tipo clorurado sódico. Otros pozos, como el H-9 y el H-20, presentan un comportamiento químico combinado, dependiendo de las condiciones de operación.

Cuando en la actualidad se trata de correr registros de presión-temperatura en la mayoría de los pozos del campo, se observan resistencias que a menudo impiden llegar a la profundidad requerida. Esas resistencias se deben a obstrucciones causadas por la incrustación en las tuberías del pozo. La incrustación, a su vez, se debe a la sobresaturación de ciertos minerales en los fluidos del yacimiento.

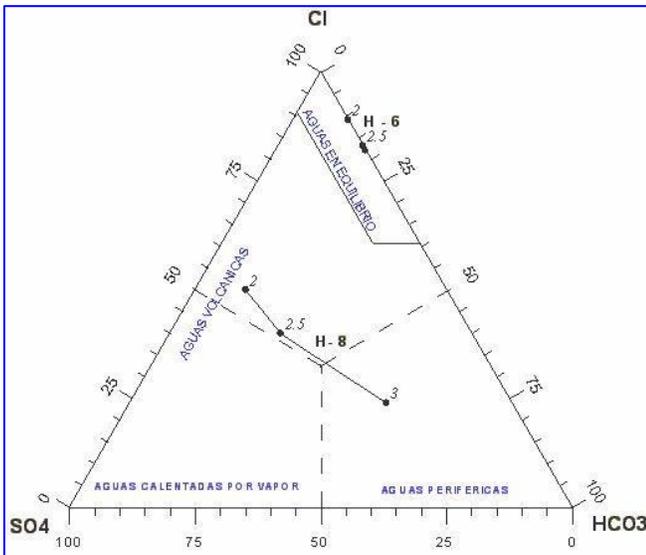


Fig. 2. Variación en la composición del agua separada en los pozos H-6 y H-8 durante su desarrollo.

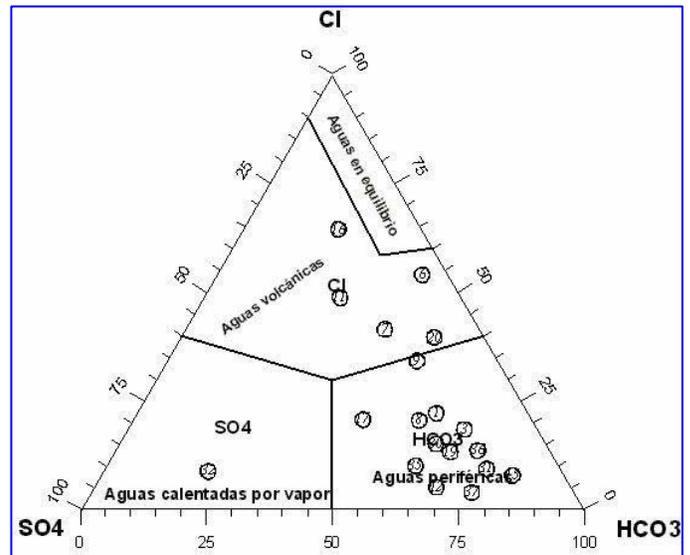


Fig. 3. Composición del agua separada en los pozos de Los Humeros según muestreos realizados en el año 2004.

La Figura 4 presenta el grado de saturación del agua producida por el pozo H-1 con respecto a ciertos minerales, calculada por medio del programa Watch desarrollado por Arnorsson (1994). Este programa permitió obtener los índices de saturación para sílice, calcita y anhídrita y, como se ve en la figura, hay sobresaturación con relación a la calcita y al cuarzo en ese pozo, por lo que se puede decir que es inevitable la incrustación natural.

Esa situación no es exclusiva del pozo H-1, sino que ocurre prácticamente en todos, aunque en grados diversos. Sin embargo, durante la operación de los pozos se elige el diámetro de orificio más adecuado para que la incrustación sea menor y se reduzcan sus efectos. Es importante mencionar que el programa Watch no siempre es aplicable por la ausencia de fase líquida en la mayoría de los pozos del campo.

3. Geotermometría de la fase líquida

Como se sabe, la geotermometría de fase líquida es una herramienta de utilidad para determinar la dirección de flujo de los fluidos y el abatimiento de temperatura por infiltración, sobre-explotación, etc. En Los Humeros no es posible utilizar esta metodología de manera sistemática, debido a que sólo algunos pozos, en su mayoría de la parte sur, producen agua. Sin embargo, se aplicó la ecuación 1 del geotermómetro de sodio-potasio (Na-K) propuesta por Fournier (citada por Henley *et al.*, 1984) a aquellos pozos que lo permitieron. La ecuación es la siguiente: $T^{\circ} C = [1217 / (\log (Na/K) + 1.483)] - 273.15$, con las concentraciones de sodio y potasio expresadas en mg/l.

La ecuación se aplicó a datos de los pozos H-15, H-20 y H-31, tomando las concentraciones promedio de sodio y potasio obtenidas en análisis de los años 2003 y 2004, y se obtuvo como resultado una temperatura calculada de 258° C para los fluidos del pozo H-15, 236° C para el pozo H-20 y 242° C para el pozo H-31. Estos resultados se compararon con las temperaturas máximas reales medidas en registros corridos en octubre y noviembre de 2003 en los mismos pozos, que habían resultado ser de 264° C para el H-15, 251° C para el H-20 y de 260° C para el H-31. Como se ve, la ecuación calcula temperaturas sistemáticamente menores a las medidas en la zona de aporte de los pozos en producción, pero es consistente y capaz de indicar qué pozos producen de las zonas más calientes.

Se aplicaron también otros geotermómetros que han dado resultados válidos para Los Humeros, como los de Na-K-Ca y cuarzo considerando máxima pérdida de vapor (Henley *et al.*, 1984). Se obtuvo así una temperatura del orden de los 280° C para el pozo H-15, lo que indica que estos geotermómetros sobrestiman la temperatura real del pozo.

En la Figura 5 se presentan las temperaturas geotermométricas para los pozos H-1, H-6, H-7 y H-17, calculadas a partir de los datos más recientes disponibles. Aunque se observan pequeñas fluctuaciones locales, en general las temperaturas tienden a conservarse más o menos estables a lo largo de los años, sin notarse ninguna tendencia a declinar.

4. Geotermometría de gases

Arnorsson y Gunnlaugsson (1985) proporcionan cinco geotermómetros de gases calibrados con datos de Islandia. Dos de ellos pueden usarse para los fluidos que producen los pozos de Los Humeros, debido a que son de una sola fase, que es la condición para la aplicación de las fórmulas. Los otros tres geotermómetros se pueden emplear en pozos con dos fases en superficie, condiciones que son más difíciles de encontrar en los pozos de Los Humeros.

Los dos geotermómetros aplicables en Los Humeros son los siguientes, estando los datos en moles/kg de agua:

$$T \text{ } ^\circ\text{C} = 341.7 - 28.57 \log (\text{CO}_2/\text{H}_2)$$

$$T \text{ } ^\circ\text{C} = 304.1 - 39.48 \log (\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2)$$

La aplicación de la primera fórmula en los pozos de Los Humeros arroja temperaturas muy constantes, del orden de 290° C, y la segunda temperaturas promedio de 320° C.

La Figura 6 es una representación en planta de las temperaturas obtenidas al aplicar el primero de los geotermómetros mencionados (CO_2/H_2) en los pozos de Los Humeros, con datos disponibles para el año 2004. Puede verse que existen dos zonas de máxima temperatura: una al norte, alrededor de los pozos H-35 y H-16, y otra al sur básicamente con los pozos H-6 y H-12. Esas zonas están separadas por contornos con una dirección general aproximada NE-SW.

Otros geotermómetros de gases utilizan las relaciones CH_4/CO_2 y N_2/CO_2 (D'Amore, 1991, 1996), pero al aplicarse a los pozos de Los Humeros arrojan temperaturas con mayor variación. Por ejemplo, en la Figura 7 se presentan las temperaturas calculadas para el pozo H-1 con los cuatro geotermómetros que se han mencionado, pudiendo notarse un mayor rango de variación en el tiempo en los propuestos por D'Amore. La

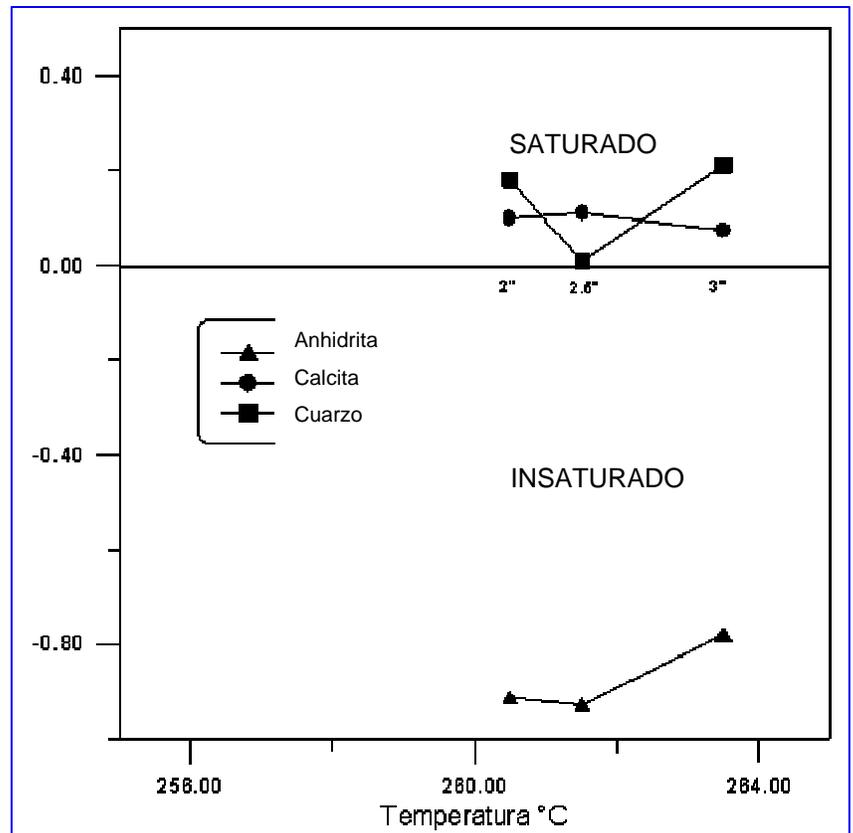


Fig. 4. Comportamiento de los índices de saturación en el desarrollo del pozo H-1.

Figura 8 muestra lo mismo para fluidos del pozo H-6, notándose comportamientos similares a los del pozo H-1. En general, esto es aplicable a todos los pozos de Los Humeros.

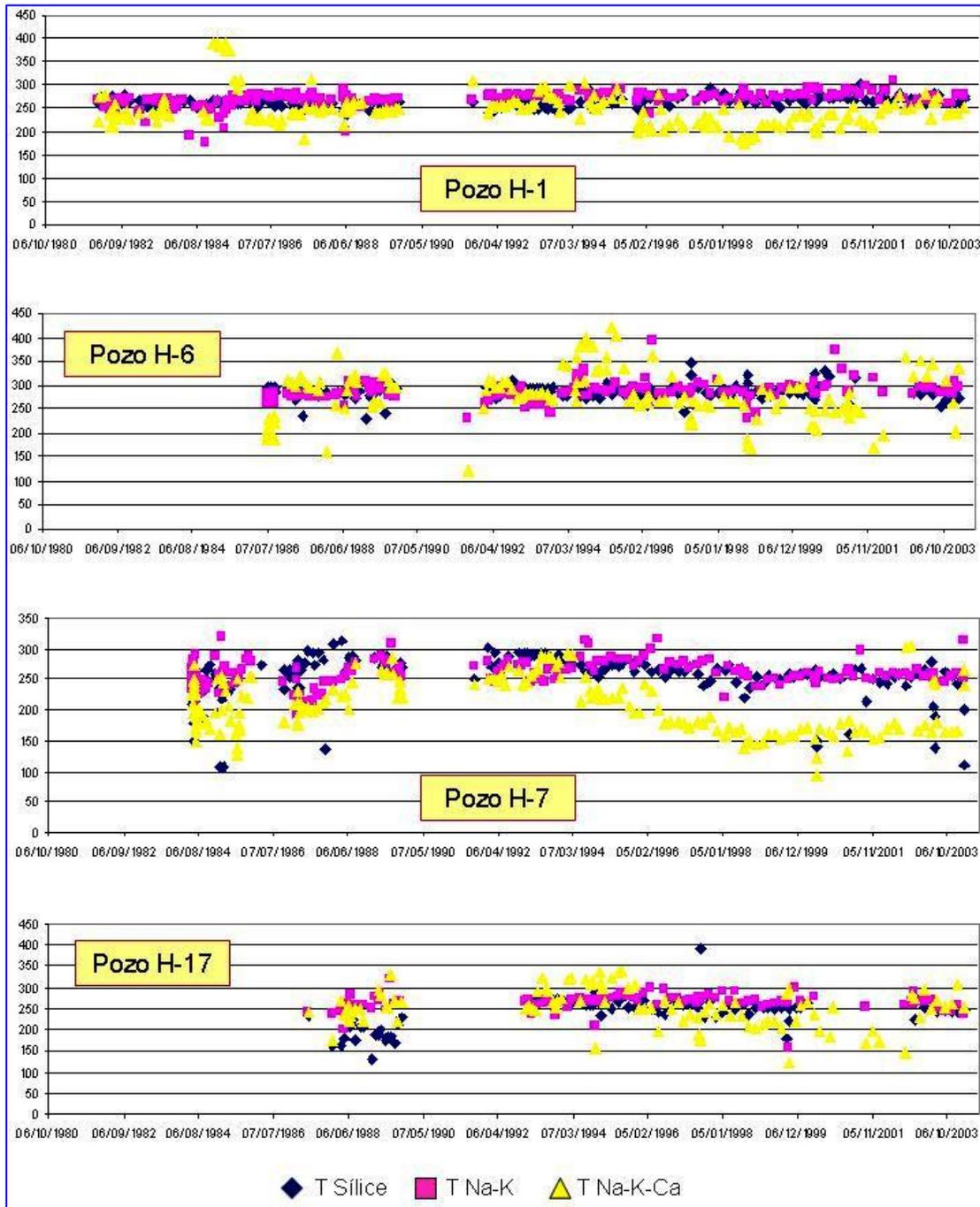


Fig. 5. Comportamiento de temperaturas geotermométricas de fase líquida en los pozos H-1, H-6, H-7 y H-17.

La Figura 9 muestra las curvas de igual contenido total de gas en los fluidos de todos los pozos de Los Humeros, expresada en porcentaje en peso corregido a una presión de separación de 8 bar. Puede notarse que el contenido de gases es mayor en las porciones centro y sur, con valores de hasta 9% en peso, que en la parte norte, donde el contenido desciende a menos de 4%. Sin embargo, este contenido parece estar relacionado con las estructuras del campo, ya que se pueden ver variaciones importantes entre pozos cercanos, como en el caso de los pozos H-6 y H-12 por ejemplo, las que pueden explicarse por la presencia de alguna estructura entre ellos.

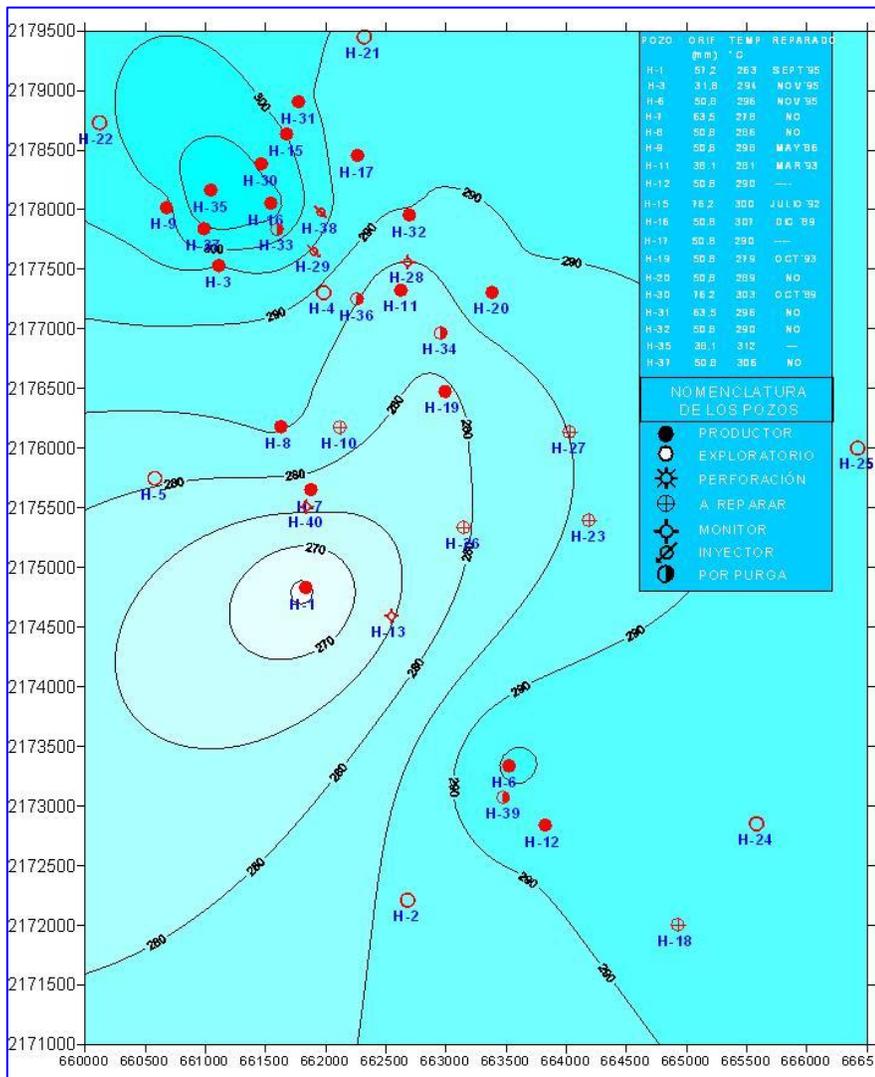


Fig. 6. Temperaturas de fondo calculadas con el geotermómetro CO₂/H₂ en pozos de Los Humeros

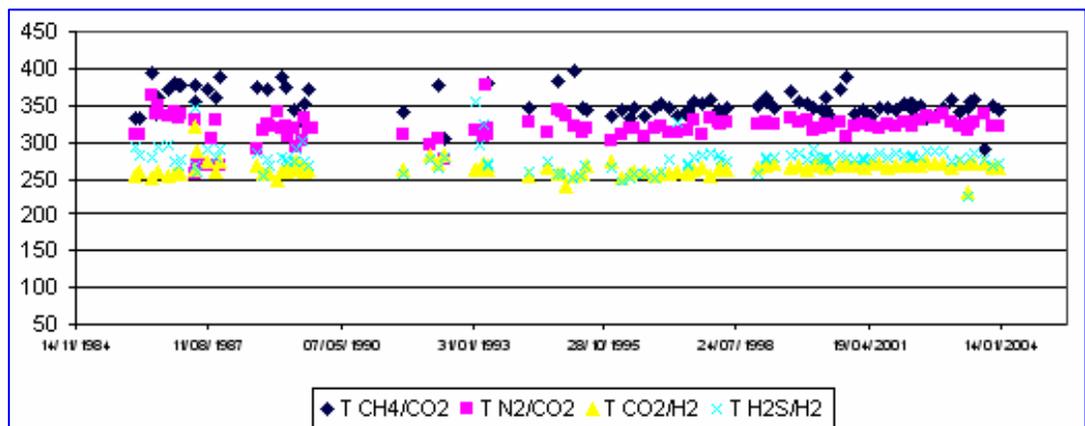
Giggenbach (1988), estableció una metodología para evaluar condiciones de equilibrio en una gráfica que relaciona los contenidos de los gases H₂ y Ar con las temperaturas de fondo. Explicó que utiliza el hidrógeno porque este gas reacciona rápidamente al cambiar la temperatura, mientras que el argón es un gas inerte, y advirtió que las condiciones de equilibrio así determinadas en el caso de manantiales no son muy confiables, por la partición que ocurre durante el ascenso de los fluidos, pero que resultan más confiables cuando se trata de pozos geotérmicos.

Se aplicó esa metodología de Giggenbach en los pozos de Los Humeros, utilizándose la temperatura de fondo calculada con el geotermómetro de CO₂/H₂, obteniéndose así la gráfica que se presenta en la Figura 10. De acuerdo con ella, se observa que en la mayoría de los pozos los gases están en equilibrio con el líquido a una temperatura que va de los 264 a los 312° C.

5. Efectos de la inyección

Toda la salmuera separada en Los Humeros se regresa al yacimiento a través de pozos inyectoros como el H-13, H-29, H-38 y H-40. Estos pozos se ubican en la parte centro-norte del campo, inyectándose entre todos un flujo promedio que va de las 90 a las 100 t/h.

Fig. 7. Variación de los geotermómetros gaseosos en el pozo H-1.



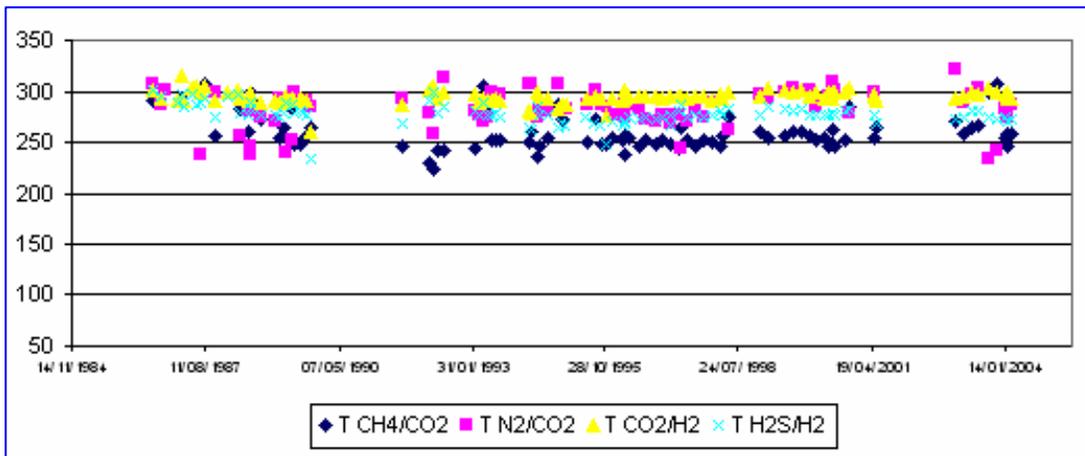


Fig. 8. Variación de los geotermómetros gaseosos en el pozo H-6.

En la actualidad se continúa sin tener información definitiva sobre la influencia y efectos que esa inyección pudiera tener sobre los pozos productores. Algunos estudios consideran que el yacimiento sí ha sido afectado y presentan ciertos datos que a su parecer así lo demostrarían (Lermo *et al.*, 1999). Sin embargo, los valores de la entalpía medidos en los pozos demuestran que hasta la fecha el yacimiento aparentemente no ha resultado afectado por la inyección. La Figura 11 parece corroborarlo.

En esa Figura 11 se identificó la relación molar N_2/Ar obtenida en los pozos de Los Humeros, a partir de datos recientes (fines de 2003 y 2004), y se trazaron curvas de igual relación. Puesto que esta relación es de 83.6 en el aire, y que junto con la salmuera también se inyecta aire, cabría esperar valores cercanos a ese en los fluidos producidos por los pozos cercanos a los pozos inyectoros. Pero, como se ve en la Figura 11, los valores máximos de la relación molar N_2/Ar llegan apenas hasta 68 y los pozos productores más cercanos a los dos inyectoros presentan valores del orden de 30.

Una prueba con trazadores realizada en junio de 1998 tampoco arrojó resultados concluyentes sobre el efecto de la inyección en Los Humeros. En esa prueba se inyectaron 600 litros de alcohol étlico en el pozo H-29 a una profundidad de 1580 m. Después se colectaron casi 600 muestras de vapor condensado en ocho pozos aledaños, con intervalos de tiempo de 12 horas entre cada muestra. Las

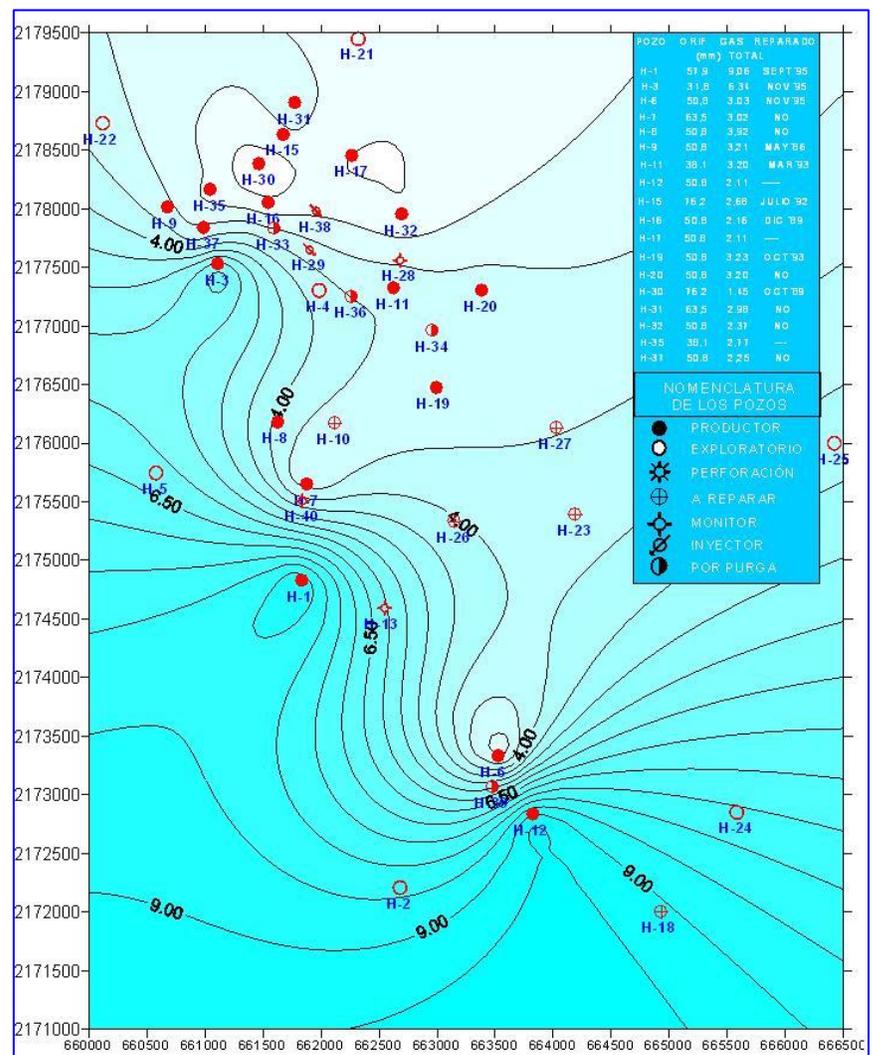


Fig. 9. Porcentaje en peso del gas total en pozos.

muestras fueron analizadas por cromatografía de gases, pero en ninguna se logró detectar el trazador, lo cual es un reflejo de la reducida permeabilidad de las rocas del yacimiento. Cabe recordar que en otros campos mexicanos, como Los Azufres, Mich., y Las Tres Vírgenes, B.C.S., se han realizado pruebas con el mismo tipo de trazador, con resultados satisfactorios.

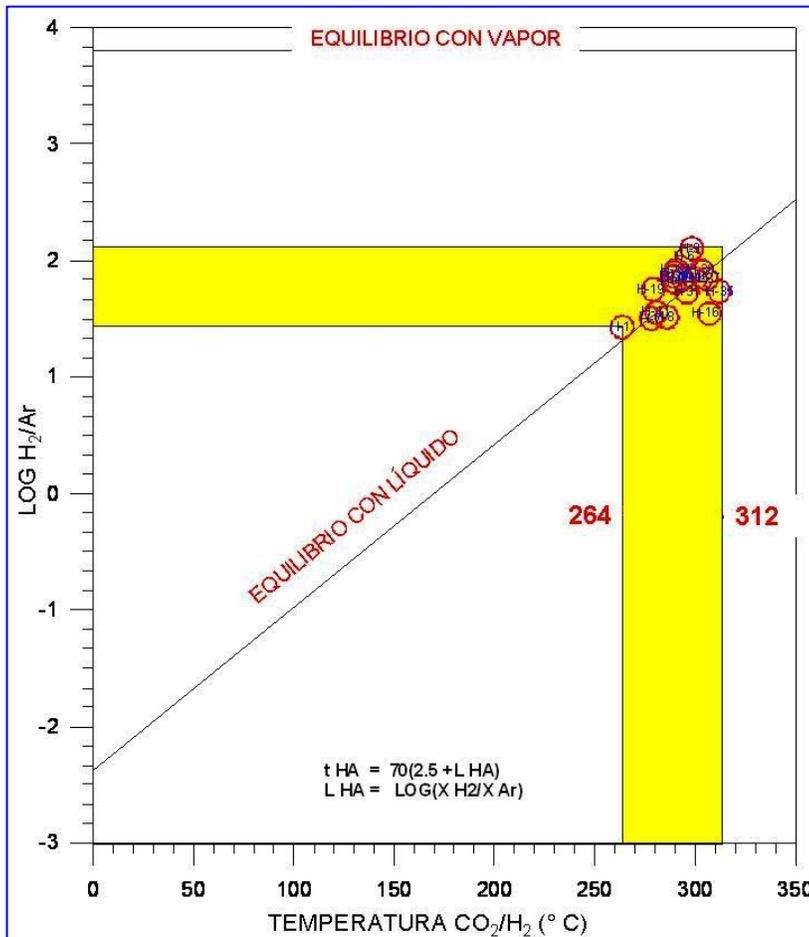


Fig. 10. Condiciones de equilibrio de los fluidos de los pozos de Los Humeros.

ocasionado por la evaporación a la que están sometidas. Las muestras de agua de lluvia corresponden a una mezcla obtenida durante un año, presentando valores muy cercanos a la línea meteórica mundial, con un ligero enriquecimiento de oxígeno-18.

Por otra parte, si se traza una línea recta (ver Fig. 12) uniendo la mayor cantidad de resultados de los pozos geotérmicos y se prolonga hasta las aguas andesíticas, se encuentra que al prologarla hacia la línea meteórica mundial la intercepta aproximadamente en los valores que corresponden a los manantiales de Zotola (muestra No. 5) y Huitzilpopoca (No. 6), localizados aproximadamente a 12 km al noroeste del campo, y a varios pozos someros (muestras No. 40, 42 y 47) que se ubican a unos 15, 20 y 23 km, respectivamente, al suroeste del campo. Por lo tanto, las aguas que recargan al yacimiento geotérmico tienen una composición isotópica similar a la de esos manantiales y pozos (Quijano y Torres, 1995), aunque no es posible afirmar que las zonas donde estos se ubican sean efectivamente las zonas de recarga del yacimiento.

Cabe comentar que el pozo H-16, con menor temperatura geotemométrica de fase líquida, ha presentado variaciones importantes en su composición isotópica tendiendo a desplazarse hacia la línea meteórica. Esto sugiere que puede estar presentando problemas de infiltración local de agua de menor temperatura.

6. Isotopía

Desde 1987 se han realizado en Los Humeros análisis isotópicos de oxígeno-18 y deuterio que han sido útiles para caracterizar los fluidos profundos, encontrándose que presentan un enriquecimiento de oxígeno-18 debido a la interacción agua-roca a alta temperatura (Barragán *et al.*, 1995). En general, se ha observado que los pozos con un mayor enriquecimiento de oxígeno-18 corresponden a los de mayor temperatura geotemométrica de gas (CO₂/H₂), tanto en la zona norte (pozos H-35 y H-9) como en la parte sur del campo (pozos H-6 y H-12).

En la Figura 12 se presenta la composición isotópica de manantiales, muestras de lluvia y fluidos geotérmicos de los pozos y alrededores de Los Humeros, además de incluir la composición isotópica de las aguas andesíticas y basálticas, las rocas ígneas y las rocas sedimentarias, según fueron definidas por Giggenbach (1992). Puede observarse que el agua de las lagunas Alchichica y Quecholac presenta un enriquecimiento de oxígeno-18,

Referencias

Arnorsson, S., and E. Gunnlaugsson (1985). New gas geothermometers for geothermal exploration - Calibration and application. *Geochem. et Cosmochem. Acta*, V. 49, No. 6, pp. 1307-1325.

Arnorsson, S. (1994). *Notes of lecture on Watch y some other computer programs used in geochemistry*. Publication of the United Nations University / ORKUSTOFNUN.

Barragán, R.M., A. Portugal, V.M. Arrellano y M.R. Tello (1995). Evolución isotópica (1987-1994) de fluidos de pozos del campo geotérmico de Los Humeros, México. *Actas INAGEQ*, V. 1, pp. 227-231.

D'Amore, F. (1991) *Gas geochemistry as a link between geothermal exploration and exploitation*. In: *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development* (Edited by F. D'Amore), UNITAR/UNDP, New York, pp. 93-144

D'Amore, F. (1996). *Geochemical methods in geothermal exploration and exploitation*. Pisa, Italy.

Giggenbach, W.F. (1988) Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicadores. *Geochem. et Cosmochem. Acta*, V. 52, pp. 2749-2765.

Giggenbach, W.F. (1992) *Isotopic composition of geothermal water and steam discharges*. In: *Application of Geochemistry in Geothermal Reservoir Development* (Edited by F. D'Amore), UNITAR/UNDP, New York, pp. 253-273.

Giggenbach, W.F. and R.L. Goguel (1989). *Collection and analysis of geothermal and volcanic water and gas discharges*. Internal Report No. CD 2401. Fourth edition. Chemistry Division. Department of Scientific and Industrial Research. Petone, New Zealand, 81 p.

Gutiérrez-Negrín, L.C.A. (1982). Litología y zoneamiento hidrotermal de los pozos H 1 y H 2 del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. CFE, Informe interno 23/82, Depto. Exploración. Inédito.

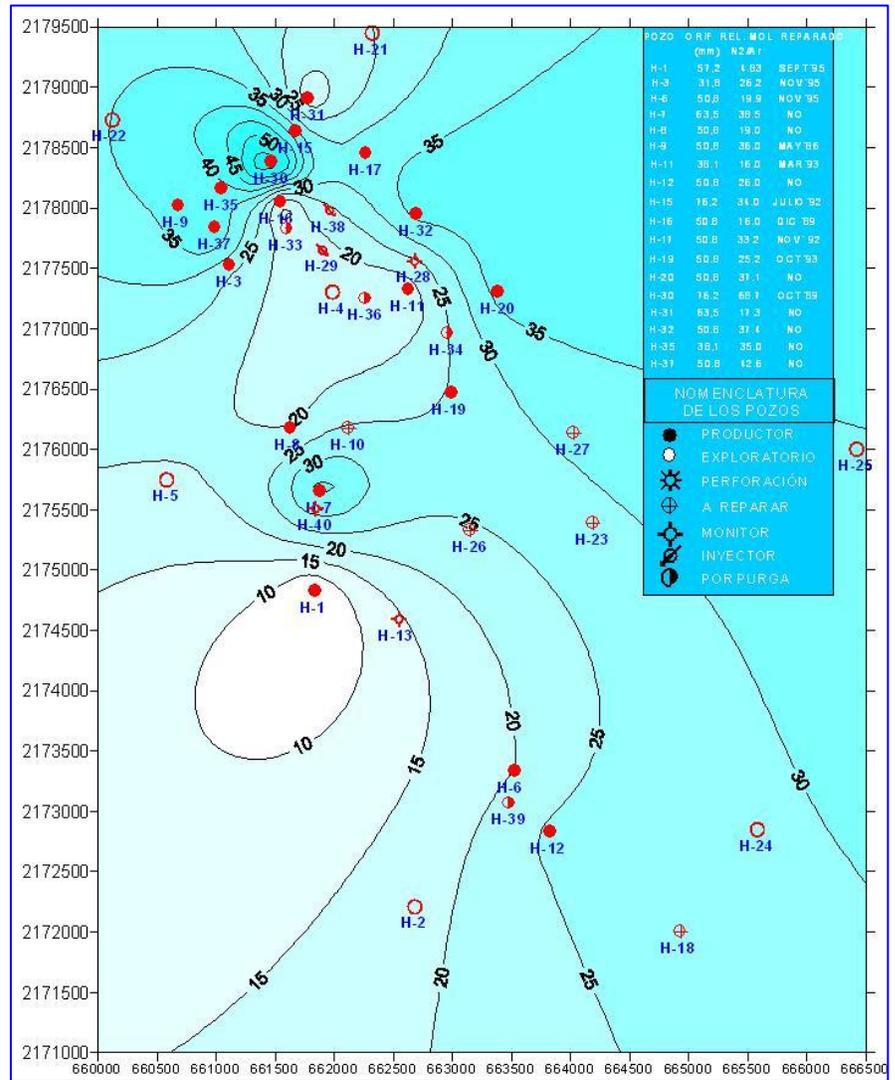


Fig. 11. Curvas de igual relación molar N₂/Ar.

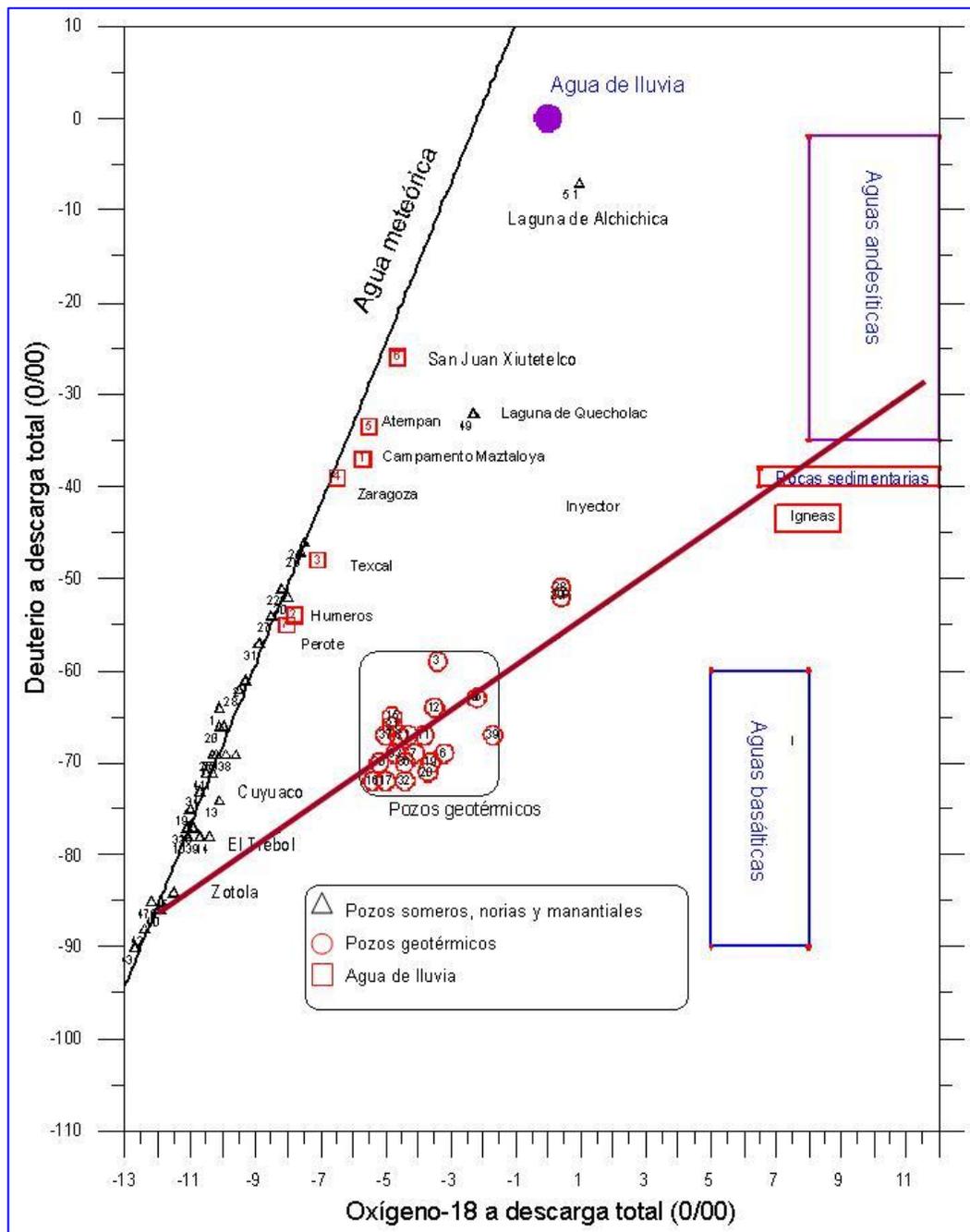


Fig. 12.
Composición
isotópica de fluidos
de Los Humeros y
sus alrededores.

Henley, R.W., A.H. Truesdell, and P.B. Barton (1984). Fluid-mineral equilibria in hydrothermal systems. *Proceedings of the Society of Economic Geologists*, Volume 1, pp. 33.

Lermo J., J. Soto y J. Flores (1999). Procesado de datos sísmicos de la red del campo geotérmico de Los Humeros, Pue. Informe técnico final del Instituto de Ingeniería, UNAM, a la CFE-Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos. Inédito.

Quijano L., J.L., and M.A. Torres R. (1995). The Los Humeros geothermal reservoir, a case of very high temperature system. *Proceedings of the World Geothermal Congress 1995*, Florencia, Italia, Vol. 1, pp. 43-48.