

PRELIMINARY ISOTOPIC STUDIES OF FLUIDS FROM THE CERRO PRIETO GEOTHERMAL FIELD

A. H. Truesdell,¹ R. O. Rye,² F. J. Pearson, Jr.,³ E. R. Olson,⁴
N. L. Nehring,¹ M. A. Huebner,² and T. B. Coplen³

¹U. S. Geological Survey, Menlo Park, California, USA

²U. S. Geological Survey, Denver, Colorado, USA

³U. S. Geological Survey, Reston, Virginia, USA

⁴University of California, Riverside, California, USA

Introduction

Geothermal fluids from Cerro Prieto are being analyzed for oxygen-18, deuterium, and tritium contents in water; sulfur-34 in H₂S; and carbon-13 and carbon-14 in CO₂. Although these studies are not complete, some useful conclusions may be drawn from the data now available.

Oxygen-18 and deuterium in cold and hot waters

Oxygen-18 and deuterium contents are indicators of the origin of water and of the degree of water/rock interaction at high temperatures. Earlier isotopic studies in the Mexicali-Imperial Valley¹⁻³ have shown that ground waters of the central part of the valley originate as Colorado River water that becomes progressively altered by evaporation. Oxygen-18 and deuterium increase along a trend line connecting the compositions of Colorado River water and Salton Sea water (fig. 1). On a plot of δD versus $\delta^{18}O$, this line has a slope of 5.6, a value characteristic of waters undergoing evaporation. Isotopic ratios of ground waters from shallow wells in alluvial fans at the margins of the basin and samples of directly-collected precipitation lie off this trend towards the usual meteoric water line. These waters originating from local precipitation are higher in deuterium than any other waters in the area except for the Salton Sea and a few highly evaporated ground waters.

The patterns of deuterium (fig. 2) and oxygen-18 (fig. 3) contents of waters from deeper wells of the Mexicali Valley taken from Crosby *et al.*¹ show that the isotopic ratios of the ground waters become heavier toward the margins of the valley. The ground waters of the central valley are similar isotopically to Colorado River water and those toward the margins are enriched in deuterium and oxygen-18 by as much as 30 and 6 permil, respectively. The axis of isotopically light ground waters is displaced to the west of the present location of the river suggesting that the major infiltration to the ground-water system occurred at an earlier time when the river flowed in a more westerly path or that marginal inflow of isotopically heavier waters confines the Colorado River recharge to the center of the valley.

Cerro Prieto geothermal waters have δD values near -97‰, much lighter than local precipitation (-60‰) but similar to ground waters derived from partially evaporated Colorado River water (fig. 1). The oxygen-18 contents of the thermal waters have been shifted to higher values by exchange with rock minerals and possibly, in some cases, by loss of steam. Thus Cerro Prieto hot waters probably originate from partially evaporated Colorado River water rather than from local rainwater or seawater, although salts dissolved in the thermal waters may have a marine or local rainwater origin⁴. Comparison of the measured deuterium contents of the thermal waters and the interpolated composition of cold Mexicali Valley ground waters (fig. 2) suggests that recharge to the system could have occurred along a narrow zone running from Mexicali on the north, passing just west of the field and curving northeast to the Mesa Arenosa on the east. If the recharge is from the part of this zone that is closest to the field the thermal fluids must be of very local origin and little lateral movement of fluid can have occurred. This recharge from the west agrees with the model of Mercado⁵. A more extensive CFE-USGS survey of the Mexicali Valley ground waters now in progress will provide more data on this problem which has implications for the volume and age of hot water in storage.

From the pattern of oxygen-18 in the total discharge of the wells in 1977 (fig. 4), it appears that water in the central part of the field has undergone less oxygen isotope shift than waters at the margins. This pattern is similar to the pattern of changes in chloride concentrations between 1973-74 and 1977-78⁶. During this period, chloride concentrations after flashing of fluids from the central part of the field decreased by as much as 5,000 ppm. This is interpreted to be the result of drawdown of fluids into the production aquifer from an overlying lower-temperature aquifer containing fluids of lower salinity.

The chemical and isotopic patterns and the observed increase of temperature and salinity with depth⁵⁻⁸ suggest that the low in oxygen-18, less exchanged waters probably originated in a

A map of the Cerro Prieto area in Mexico, showing isotherms and sampling locations. The map includes a scale bar for 10KM and a north arrow. Isotherms are labeled with values such as -15, -12, -9, and -6. Sampling locations are marked with stars and labeled with values like -13.5, -14.9, -15.2, -15.3, -14.6, -14.4, -14.5, -12.9, -11.8, -12.1, -11.1, -8.6, -7.9, -12.2, -14.5, -13.5, and -15.1. The locations of Mexicali, Hardy, and Cerro Prieto are indicated. The Colorado River is also shown.

Figure 3. Oxygen-18 compositions of Mexicali Valley irrigation well waters from Crosby et al.¹ and García².

$\delta^{18}O$ of total discharge ‰ SMOW 4/77

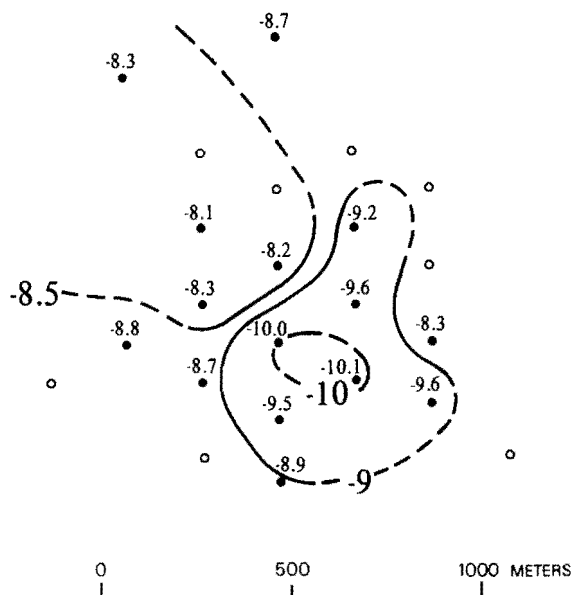


Figure 4. Oxygen-18 compositions of total flow from Cerro Prieto wells in April-May, 1977. Well numbers are shown in Truesdell *et al.*⁶.

lower-temperature aquifer where less oxygen isotope exchange with rock had occurred. The relatively rapid decline of fluid temperatures in the low-salinity zone⁶ also suggests fluid migration from a lower temperature aquifer.

A less likely alternative is that the lower-chloride, lower oxygen-18 fluids originated from clean sandstone aquifers at the same temperature as the production aquifer. The resistance to isotope exchange of quartz relative to calcite would produce less isotope shift in these calcite-poor aquifers and their high permeabilities would allow more thorough flushing of evaporite salts than in more cemented zones. In this case, however, it would seem likely that some of these hot, lower-salinity fluids would have been produced when the wells were first opened rather than appearing 2 to 4 years later.

Some geothermal waters high in both oxygen-18 and deuterium may have resulted from loss of steam at 300°C prior to sampling the fluid. The direction of the oxygen-18 and deuterium shift with boiling at 300°C is indicated in fig. 1. This effect is probably minor compared to the oxygen isotope shift caused by water-rock isotope exchange.

Radioisotope dating of waters

Analysis of radioactive isotopes in Cerro Prieto fluids indicate that the age of the Cerro Prieto fluids is between 50 and 10,000 years.

Carbon-14 cannot be used to estimate the age of these waters because almost all carbon-14 has been removed from the fluids by dilution with metamorphic CO₂ and by exchange with old carbonates in the aquifer rocks. Tritium content is at the detection limit of 0.1 to 0.2 tritium units (TU) which indicates an age of 50-60 years if pre-bomb tritium contents of precipitation are assumed to have been 10 TU and if flow from the point of recharge to the reservoir has occurred without mixing of waters of different ages ("piston flow"). If complete mixing (dispersion) of waters of different ages in a single reservoir had occurred the mean residence time or average age indicated by 0.1 to 0.2 TU would exceed 10,000 years⁹. The most likely regime is probably intermediate between these models and the average age of the water is probably between 50 and 10,000 years.

Stable carbon isotope compositions

Preliminary analyses of carbon-13 in CO₂ of the thermal fluids ($\delta^{13}C = -6.2 \pm 0.7$) appear to indicate a magmatic or juvenile origin (fig. 5 after Craig¹⁰ with additional data^{11, 12}). The geologic evidence, however, is in favor of at least some of the CO₂ in the fluid originating from thermal metamorphism of aquifer carbonates to calc-silicate minerals¹³.

Although most of the calcite in the reservoir appears diagenetic and no marine rocks have been observed in the drilled part of the field¹³, the carbonate was probably derived from detrital grains of marine mesozoic carbonates from the Colorado River drainage.

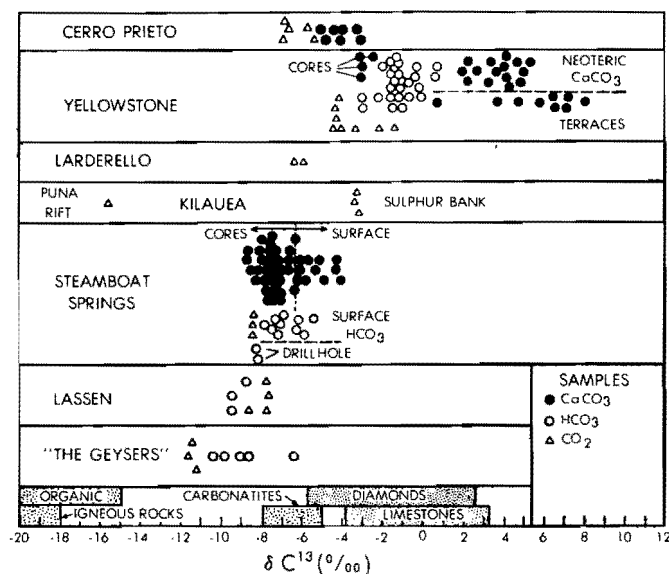


Figure 5. Carbon-13 compositions of CO₂ and calcite from Cerro Prieto wells compared with carbon isotope data from other geothermal areas taken from Craig¹⁰ and with compositions of other carbon-bearing materials from Craig¹⁰, Taylor *et al.*¹¹, and Pineau¹².

This detrital carbonate originally had $\delta^{13}\text{C}$ values near zero, but was altered isotopically during diagenesis by mixture with light organic-derived carbon ($\delta^{13}\text{C} = -15$ to -25). Carbonate minerals at Cerro Prieto have a range of $\delta^{13}\text{C}$ values similar to that of CO_2 ; Measurements from well M-5 are shown in figure 5.

Sulfur isotope compositions

Sulfur-34 contents of H_2S are nearly uniform at $\delta^{34}\text{S} = -1.0 \pm 0.9$ over the entire field (fig. 6 after Holser and Kaplan¹⁴). This value permits several possible origins including thermal metamorphism of organic matter but probably indicates a magmatic source.

Sulfate in Cerro Prieto waters has been reported as ranging from 5 to 40 ppm with the most probable value near 5-10 ppm^{7,8}. This sulfate represents about 10% of the total sulfur and if it is in equilibrium can be expected to be 10-20 ‰ heavier than H_2S sulfur¹⁵. Thus the mean $\delta^{34}\text{S}$ value is probably near 0 ‰. Separation of Cerro Prieto SO_4 for isotopic study has not yet been accomplished.

Summary

Preliminary isotopic studies of Cerro Prieto geothermal fluids and earlier studies of Mexicali Valley ground waters suggest local recharge of the geothermal system from the area immediately to the west. Oxygen isotope exchange of water with reservoir rock minerals at temperatures increasing with depth has produced fluids with oxygen-18 contents increasing with depth, and pressure drawdown in the southeastern part of the field has allowed lower oxygen-18 fluids to invade the production aquifer from above. The contents of tritium and carbon-14 in the fluid

suggest only that the average age of the fluid is between 50 and 10,000 years. The isotopic compositions of carbon and sulfur are consistent with a magmatic origin of these elements but a mixed sedimentary-organic origin appears more likely for carbon and is also possible for sulfur. Investigations of the isotopic compositions of geothermal and cold ground waters continue and are being expanded as fluids become available and as separation and analysis methods are improved.

References

1. Crosby, J. W. III, Chatters, R. M., Anderson, J. V., and Fenton, R. L., 1972, Hydrologic evaluation of the Cerro Prieto geothermal system utilizing isotope techniques: Wash. State Univ. College of Eng. Res. Report 72/11-5, 30 p.
2. García G., E., 1977, Algunas ideas sobre los mecanismos que gobiernan el acuífero del Valle Mexicali, B.C., en base a los análisis de isótopos ambientales - oxígeno-18 y deuterio: Comisión Federal de Electricidad Reporte Técnico B-7-39K, 32 p.
3. Coplen, T. B. 1972, Origin of geothermal waters in the Imperial Valley of southern California, in R. W. Rex, ed., Cooperative Investigation of Geothermal Resources in the Imperial Valley and their Potential Value for Desalting of Water and other Purposes: Univ. Calif. Riverside Report IGPP-UCR-72-33, pp. E1-E31.
4. Rex, R. W., 1972, Origin of the salt of the Imperial Valley and surrounding watershed areas, in R. W. Rex, ed., Cooperative Investigation of Geothermal Resources in the Imperial Valley and their Potential Value for Desalting of Water and other Purposes: Univ. Calif. Riverside Report IGPP-UCR-72-33, pp. F1-F38.
5. Mercado, S., 1976, Movement of geothermal fluids and temperature of the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico, in Proceedings, 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, 1975, v. 1, p. 487-492.
6. Truesdell, A. H., Mañon, A., Jiménez, M., Sánchez, A., and Fausto, J., 1978, Geochemical evidence of drawdown in the Cerro Prieto, Mexico geothermal field: Proc. 1st Symp. on the Cerro Prieto, Baja California, Mexico Geothermal Field (this volume).
7. Mañon, A., Mazar, E., Jimenez, M., Sánchez, A., Fausto, J., and Zenizo, C., 1977, Extensive geochemical studies in the geothermal field of Cerro Prieto: Lawrence Berkeley Lab. Report LBL 7019, 113 p.
8. Reed, M. J., 1976, Geology and hydrothermal metamorphism in the Cerro Prieto geothermal field, Mexico: Proceedings, 2nd U.N. Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, May 1975, p. 539-548.

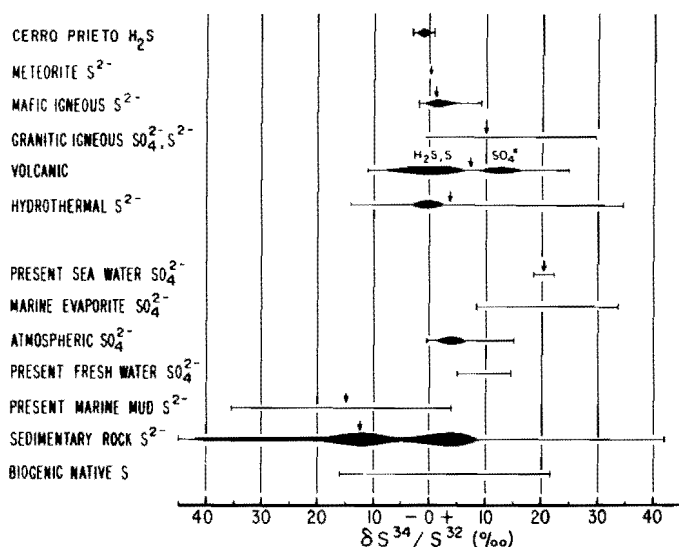


Figure 6. Sulfur-34 compositions of H_2S from Cerro Prieto wells compared with the compositions of other sulfur-bearing materials taken from Holser and Kaplan¹⁴.

9. Pearson, F. J., Jr., and Truesdell, A. H., 1978, Tritium in the waters of Yellowstone National Park: Short Papers of the 4th Int. Conf. on Geochron. Cosmochron. and Isot. Geol., Aspen Aug. 1978, U.S. Geol. Survey Open-file Report 78-701, pp. 327-329.
10. Craig, H., 1963. The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas, in, E. Tongiorgi (Editor), Nuclear Geology on Geothermal Areas, Spoleto, Italy, 1963: Consiglio Nazionale delle Ricerche Laboratorio di Geologia Nucleare, Pisa, pp. 17-53.
11. Taylor, H. P., Jr., Frechen, J., and Degens, E. T., 1967, Oxygen and carbon isotope studies of carbonatites, Lacher See District, West Germany and the Alno District, Sweden, *Geochem. et Cosmochim. Acta*, v. 31, p. 407-430.
12. Pineau, F., Javoy, M., Bottinga, Y., 1976, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratios of rocks and inclusions in popping rocks of the Mid-Atlantic Ridge and their bearing on the problem of the isotopic composition of deep-seated carbon: *Earth and Planetary Sci. Letters*, v. 29, p. 413-421.
13. Elders, W. A., Olson, E. R., Hoagland, J. R., Barker, C. E., Johnson, P. D., and Collier, P., 1977, A comprehensive study of samples from geothermal reservoirs: Petrology and light stable isotope geochemistry of wells M48, M84, M90, M91, M92, and Prian no. 1 in the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, Mexico: Univ. Calif. Riverside Report UCR/IGPP-77/37, 153 p.
14. Holzer, W. t., and Kaplan, I. R., 1966, Isotope geochemistry of sedimentary sulfates: *Chem. Geol.*, v. 1, p. 93-135.
15. Sakai, Hitoshi, 1957, Fractionation of sulphur isotopes in nature: *Geochim. et Cosmochim. Acta*, v. 12, p. 150-169.

Acknowledgment

This work was done in cooperation with the Comisión Federal de Electricidad of Mexico under the auspices of the U.S. Department of Energy.

ESTUDIOS ISOTOPICOS PRELIMINARES DE FLUIDOS DEL CAMPO GEOTERMICO DE CERRO PRIETO

Introducción

Se están analizando fluidos geotérmicos de Cerro Prieto para determinar el contenido de oxígeno-18, deuterio y tritio en agua; azufre-34 en H_2S ; y carbono-13 y carbono-14 en CO_2 . Aunque estos estudios no se han completado, de los datos disponibles pueden derivarse algunas conclusiones útiles.

Oxígeno-18 y deuterio en aguas frías y calientes

El contenido de oxígeno-18 y de deuterio indica el origen del agua y el grado de interacción entre el agua y la roca a altas temperaturas. Estudios isotópicos previos en el Valle Imperial y de Mexicali¹⁻³ han demostrado que las aguas subterráneas de la parte central del valle se originan como agua del Río Colorado que se altera progresivamente por evaporación. El oxígeno-18 y el deuterio aumentan a lo largo de una línea directriz que conecta las composiciones de las aguas del Río Colorado y del Mar de Salton (Figura 1). En una gráfica de δD versus $\delta^{18}\text{O}$ esta línea tiene una pendiente de 5.6, valor característico de aguas que están sufriendo evaporación. Las relaciones isotópicas de aguas subterráneas provenientes de pozos someros situados en los abanicos aluviales en las márgenes de la cuenca y las muestras de precipitación recolectadas directamente, se apar-

tan de la línea de aguas en proceso de evaporación y se acercan a la línea de aguas meteóricas. Dichas aguas que se originan de la precipitación local tienen un mayor contenido de deuterio que cualquier otras aguas en la zona, salvo las del Mar de Salton y algunas aguas subterráneas altamente evaporadas.

La distribución del contenido de deuterio (Figura 2) y de oxígeno-18 (Figura 3) en aguas de pozos más profundos del valle de Mexicali tomadas de Crosby, et al.¹, muestran que las razones isotópicas de las aguas subterráneas se hacen más pesadas hacia las márgenes del valle. Las aguas subterráneas del centro del valle son isotópicamente similares al agua del Río Colorado y las que se encuentran hacia las márgenes están enriquecidas en deuterio y oxígeno-18 hasta en 30 y 6 por mil, respectivamente. El eje de aguas subterráneas isotópicamente livianas está desplazado hacia oeste de la ubicación actual del río. Esto sugiere que la mayor infiltración al sistema de aguas subterráneas ocurrió en una etapa anterior cuando el cauce del río estaba más hacia el oeste, o que la afluencia marginal de aguas isotópicamente más pesadas confina al centro del valle la recarga proveniente del Río Colorado.

Las aguas geotérmicas de Cerro Prieto tienen valores de δD cercanos a -97 ‰, siendo mucho

más livianas que la precipitación local (-60 ‰) pero similares a las aguas subterráneas derivadas de aguas del Río Colorado parcialmente evaporadas (Figura 1). El contenido de oxígeno-18 de las aguas termales se ha desplazado a valores más elevados debido a un intercambio con minerales de las rocas y, posiblemente en algunos casos, por pérdida de vapor. Por lo tanto, las aguas calientes de Cerro Prieto probablemente se originan de agua del Río Colorado parcialmente evaporada y no de agua de lluvia local o agua de mar, aunque las sales disueltas en las aguas termales pueden tener un origen marino o de lluvia local⁴. Una comparación entre el contenido medido de deuterio de las aguas termales y la composición interpolada de aguas subterráneas frías del Valle de Mexicali (Figura 2) sugiere que pudo haber habido recarga al sistema a lo largo de una estrecha zona que va desde Mexicali al norte, pasando justo al oeste del campo, doblando al noreste hacia la Mesa Arenosa situada al este. Si la recarga provino de la parte de dicha zona que está más cercana al campo, los fluidos termales deben tener un origen muy local, con muy pequeño movimiento lateral del fluido. Esta recarga proveniente del oeste concuerda con el modelo de Mercado⁵. Un estudio más amplio de las aguas subterráneas del Valle de Mexicali que están llevando a cabo la CFE y el USGS, proporcionará mayor información sobre este problema que tiene implicaciones en cuanto al volumen y edad del agua caliente almacenada.

A juzgar por la distribución de oxígeno-18 en la descarga total de los pozos en 1977 (Figura 4), parece ser que el agua de la parte central del campo ha sufrido un menor desplazamiento isotópico de oxígeno que las aguas en las márgenes. Esta distribución es similar a la de los cambios en la concentración de cloruro entre 1973-74 y 1977-78⁶. Durante este período, la concentración de cloruro después del flasheo, correspondiente a los fluidos de la parte central del campo, disminuyó hasta 5,000 ppm. Esto se interpreta como el resultado de infiltración al yacimiento productor de fluidos de menor temperatura y salinidad provenientes de un acuífero superyacente.

Las características químicas e isotópicas y el aumento observado de temperatura y salinidad con la profundidad⁵⁻⁸, sugieren que las aguas poco intercambiadas, de bajo contenido de oxígeno-18, se originaron probablemente en un acuífero de menor temperatura en el que tuvo lugar un menor intercambio isotópico de oxígeno con las rocas. La disminución relativamente rápida de la temperatura de los fluidos en la zona de menor salinidad⁶, también sugiere una migración de fluidos de un acuífero de menor temperatura.

Una alternativa menos probable es que los fluidos de menor contenido de cloruro y de oxígeno-18 tuvieron origen en acuíferos de areniscas puras de igual temperaturas que el yacimiento productor. La resistencia del cuarzo al intercambio isotópico en relación con la calcita, produciría un menor desplazamiento isotópico en estos yacimientos pobres en calcita. Además, sus elevadas permeabilidades permitirían un lavado más completo de las evaporitas que en las zonas más cementadas.

Sin embargo, en este caso parecería probable que se hubieran extraído algunos de estos fluidos calientes de menor salinidad cuando se abrieron originalmente los pozos, en lugar de aparecer 2 a 4 años más tarde.

Algunas aguas geotérmicas con alto contenido tanto de deuterio como de oxígeno-18 pudieron haber sido el resultado de pérdidas de vapor a 300°C, previas al muestreo del fluido. En la Figura 1 se indica la dirección del desplazamiento de oxígeno-18 y de deuterio debido a ebullición a 300°C. Este efecto es probablemente pequeño en comparación con el desplazamiento isotópico de oxígeno causado por intercambio isotópico entre el agua y la roca.

Datación radioisotópica de las aguas

El análisis de isótopos radioactivos en los fluidos de Cerro Prieto indica que la edad de dichos fluidos se encuentra entre 50 y 10,000 años. No se puede utilizar carbono-14 para estimar la edad de estas aguas porque en su mayor parte éste ha sido eliminado de los fluidos por dilución con CO₂ metamórfico y por intercambio con carbonatos antiguos de las rocas del yacimiento. El contenido de tritio se encuentra en el límite de detección de 0.1 a 0.2 unidades tritio (TU), lo que indica una edad entre 50 y 60 años si se supone que el contenido de tritio en la precipitación anterior a las pruebas nucleares era de 10 TU, y si el flujo desde el punto de recarga al yacimiento tuvo lugar sin que se mezclaran aguas de diferentes edades ("flujo de pistón"). Si hubiera tenido lugar en un solo yacimiento una mezcla completa (dispersión) de aguas de diferentes edades, el tiempo medio de residencia o edad promedio indicada por 0.1 a 0.2 TU sería mayor de 10,000 años⁹. El régimen más probable se encuentra quizá en un punto intermedio entre estos modelos, y la edad promedio del agua probablemente está entre 50 y 10,000 años.

Composiciones de isótopos estables de carbono

Análisis preliminares de carbono-13 en el CO₂ de los fluidos geotérmicos ($\delta^{13}\text{C} = -6.2 \pm 0.7$) parecen indicar un origen magmático o juvenil (Figura 5 segun Craig¹⁰ con datos adicionales¹¹⁻¹²). Sin embargo, evidencias geológicas indican que por lo menos parte del CO₂ contenido en el fluido se originó en el metamorfismo térmico de carbonatos del yacimiento a silicatos calcáreos¹³.

Aunque la mayor parte de la calcita del yacimiento parece ser diagenética, y que no se han observado rocas marinas en la parte perforada del campo¹³, el carbonato probablemente provino de granos detríticos de carbonatos marinos mesozoicos provenientes de la cuenca del Río Colorado.

Este carbonato detrítico originalmente tenía valores de $\delta^{13}\text{C}$ cercanos a cero, pero fue alterado isotópicamente durante la diagénesis al mezclarse con carbono liviano de origen orgánico ($\delta^{13}\text{C} = -15$ a -25). En Cerro Prieto los minerales de carbonato tienen un rango de valores de $\delta^{13}\text{C}$ similar al de CO₂; en la Figura 5 aparecen los datos obtenidos del pozo M-5.

Composición de los isótopos de azufre

El contenido de azufre-34 del H_2S es casi uniforme, $\delta^{34}S = -1.0 \pm 0.9$ en todo el campo (Figura 6 según Holser y Kaplan¹⁴). Este valor permite varios posibles orígenes, incluyendo metamorfismo térmico de materia orgánica, pero probablemente indica un origen magmático.

Se ha indicado que el sulfato en las aguas de Cerro Prieto varía entre 5 y 40 ppm, con el valor más probable alrededor de 5-10 ppm⁷⁻⁸. Este sulfato representa aproximadamente el 10% del azufre total, y si está en equilibrio puede esperarse que sea de 10-20‰ más pesado que el azufre del H_2S ¹⁵. Por lo tanto, el valor medio de $\delta^{34}S$ probablemente se acerca a 0‰. Aun no se ha logrado la separación de SO_4 de Cerro Prieto para hacer estudios isotópicos.

Resumen

Estudios isotópicos preliminares de fluidos geotérmicos de Cerro Prieto y estudios anteriores de aguas subterráneas del Valle de Mexicali sugieren una recarga local del sistema geotérmico proveniente del área situada inmediatamente al oeste. El intercambio isotópico del oxígeno del agua con los minerales de las rocas del yacimiento a temperaturas que aumentan con la profundidad, produjo fluidos con contenido de oxígeno-18 que aumenta con la profundidad, y la disminución de presión en la parte sureste del campo permitió que fluidos con menor contenido de oxígeno-18 invadan desde arriba al yacimiento productor. El contenido de tritio y de carbono-14 en los fluidos sugiere únicamente que la edad promedio de los mismos varía entre 50 y 10,000 años. Las composiciones isotópicas del carbono y azufre concuerdan con un origen magmático de estos elementos, pero parece más probable un origen mixto orgánico-sedimentario para el carbono, lo que es también posible para el azufre. Continúan las investigaciones de las composiciones isotópicas de las aguas subterráneas

frías y geotérmicas, y además se están ampliando conforme se disponga de más fluidos y se mejoren los métodos de separación y análisis.

Títulos de Figuras

Figura 1. Composiciones de deuterio y oxígeno-18 de las aguas superficiales y de pozos de riego del Valle de Mexicali, y de las aguas geotérmicas de Cerro Prieto. Aparecen también las composiciones isotópicas del Río Colorado en el Lago Mead, del Mar de Salton y de la precipitación local. Los datos para las aguas de riego son de Crosby, et al.¹, y García², y las del Mar de Salton, Lago Mead y precipitación son de Coplen³.

Figura 2. Composiciones del deuterio de aguas de pozos de riego, de Crosby, et al.¹, y García².

Figura 3. Composiciones de oxígeno-18 de las aguas de pozos de riego del Valle de Mexicali, de Crosby, et al.¹, y García².

Figura 4. Composiciones de oxígeno-18 del flujo total de pozos de Cerro Prieto en abril-mayo de 1977. Los números de los pozos aparecen en Truesdell, et al.⁶

Figura 5. Composiciones de carbono-13 de CO_2 y calcitas de pozos de Cerro Prieto comparadas con datos isotópicos de otras áreas geotérmicas, de Craig¹⁰, y con composiciones de otros materiales que contienen carbono, de Craig¹⁰, Taylor, et al.¹¹, y Pineau¹².

Figura 6. Composiciones de azufre-34 del H_2S de pozos Cerro Prieto comparadas con las composiciones de otros materiales que contienen azufre, de Holzer y Kaplan¹⁴.