

Criterios para determinar la profundidad del intervalo productor en pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto, México

Jesús Saúl de León Vivar

Comisión Federal de Electricidad, Residencia General de Cerro Prieto

E-mail: jesús.deleon@cfe.gob.mx

Resumen

Los criterios para seleccionar la profundidad del intervalo productor o la terminación de los pozos en el campo geotérmico de Cerro Prieto han cambiado durante el desarrollo del mismo. De 1961, cuando se perforaron los primeros pozos, hasta mediados del 2005 se han perforado un total de 325 pozos. En el presente artículo se hará una breve revisión de cuáles han sido los criterios usados en el pasado y los que se han venido empleando en los últimos diez años. El yacimiento de Cerro Prieto ha sido clasificado como de líquido dominante, de alta temperatura, pero actualmente, después de 33 años de explotación comercial, ha sufrido una serie de cambios térmicos y geoquímicos en sus fluidos, por lo que ha sido necesario modificar los criterios para seleccionar la profundidad del intervalo productor de los pozos de acuerdo al comportamiento observado en el yacimiento. Los criterios actuales se dividen en cuatro: 1. Criterio térmico, 2. Criterio geológico, 3. Criterio geoquímico y 4. Criterio comparativo de los pozos vecinos. Cuando la mayoría de estos criterios son interpretados correctamente el éxito de la terminación del pozo está asegurado.

Palabras clave: Cerro Prieto, terminación de pozos, criterios, cambios en el yacimiento.

Criteria to determine the depth of the production interval in wells of the Cerro Prieto geothermal field, Mexico

Abstract

Ways to select the depth of the production interval or to complete wells in the Cerro Prieto geothermal field have changed during the development of the field. From 1961 when drilling began to the middle of 2005, a total of 325 wells were drilled. The paper compares the approaches used in the past with those of the last ten years. The Cerro Prieto system has been classified as being of liquid-dominated and high-temperature. Today, after 33 years of commercial exploitation, it has experienced a series of thermal and geochemical fluid changes making it necessary to modify the ways to select the depth of the well production intervals, according to the observed behavior of the reservoir. The new criteria include the thermal approach, the geological approach, the geochemical approach and a comparative approach with neighboring wells. If most of these criteria are interpreted correctly, the success of a well is ensured.

Keywords: Cerro Prieto, well completion, criteria, reservoir changes.

1. Introducción

Domínguez (1979) hace un recuento de los pozos perforados y de los criterios utilizados para la terminación de los mismos en esa época. Comenta que hasta esa fecha se habían perforado 55 pozos en 6 etapas. La primera etapa fue de 1961 a 1967 con 3 pozos exploratorios, la segunda de 1964 a 1965 con 4 pozos exploratorios, la tercera de 1966 a 1968 con 15 pozos productores, la cuarta de 1972 a 1974 con 2

exploratorios y 11 productores, la quinta de 1977 a 1978 con 5 exploratorios y 13 productores y la sexta en 1978 con 1 pozo exploratorio y 1 pozo productor. También establece que los criterios de terminación habían evolucionado. En los primeros pozos se utilizó la información que se obtuvo de registros eléctricos, de temperatura y de la columna litológica, por lo que varios pozos fueron terminados en estratos de baja temperatura. Aunque también se tuvieron éxitos, como en el caso del pozo M-35, cuyos contrastes térmicos en la serie de registros fueron determinantes, sobre todo al coincidir esta información con la zona de pérdidas de circulación, que en este caso fueron severas, con lo cual se tuvo una base sólida para la terminación de ese pozo, que llegó a producir 100 toneladas por hora (t/h) vapor.

Domínguez (1979) establece además que dado que los resultados de la terminación no siempre fueron tan satisfactorios como se esperó, se pensaron sistemas más refinados que los simples registros de temperatura y eléctricos, para poder concentrar las terminaciones en los estratos más permeables y calientes, decidiéndose así el uso de los siguientes parámetros: la columna litológica, el porcentaje de areniscas porosas y permeables de la zona caliente, los análisis mineralógicos por rayos X (para distinguir minerales cuya génesis está íntimamente ligada a las altas temperaturas), gráficas de temperatura de lodos de perforación a la entrada y salida del pozo y registros eléctricos (por lo menos tres registros de temperatura de las primeras 24 horas después de terminada la perforación).

Olivas y Vaca (1982) comentan que los criterios principales en la selección de ademes son el criterio litológico (basado en la columna litológica), los registros eléctricos y los problemas encontrados durante la perforación. Terrazas (1985) confirma los criterios antes expuestos por Domínguez, Olivas y Vaca.

Como se observa, los criterios mencionados eran suficientes para obtener pozos productores. Pero en 1986 empieza a aparecer una zona extensa de pozos con fluido en dos fases en el yacimiento (De León, 1988), con lo cual las condiciones del yacimiento comienzan a cambiar.

Después de 33 años de explotación, el yacimiento ha sufrido una serie de cambios térmicos y geoquímicos como se observa en la Figura 1. En el área de CP1 se ha notado una disminución de temperatura y, por lo tanto, una baja de entalpía. La concentración de cloruros ha disminuido, lo que indica una invasión de aguas de menor temperatura, la cual ya había sido reportada por Truesdell *et al.* (1978). Este efecto también se observa en la zona centro de CP3.

La parte noroeste de CP1 y CP3 ha disminuido su temperatura por la presencia de aguas de inyección, las cuales se caracterizan por tener altas concentraciones de cloruros, así como la zona centro de CP2, efecto causado por la inyección en el pozo E-6. En la parte norte de CP3 se tiene fluido con concentración alta de cloruros por efectos de la ebullición. En la zona de CP4 se han encontrado temperaturas de 300° C a 2400 m y 350° C a 2800 m de profundidad, y actualmente se tienen fluidos con entalpías mayores de 2000 kJ/kg, aunque en la parte central se localizan pozos con baja entalpía los cuales posiblemente son alimentados por aguas que penetran por la parte adelgazada de la cima de la lutita gris y la cima de sílice-epidota en la parte central de CP3.

En la parte sur de CP4 se han perforado pozos profundos que han producido fluidos de alta temperatura (350° C), alta entalpía, con pH bajos, y con alta presión, lo que ha ocasionado que las tuberías ranuradas sean erosionadas provocando roturas de las mismas. Estos pozos han debido ser cerrados y reparados dejándolos más someros, de 2300 a 2700 m. La zona norte de CP2 presenta también zonas con entalpías mayores a 2000 kJ/kg.

La zona sureste de CP2 es la más estable en la actualidad, manteniéndose el yacimiento en fase líquida. La zona centro de CP2 está siendo alimentada por una mezcla de aguas profundas del yacimiento.

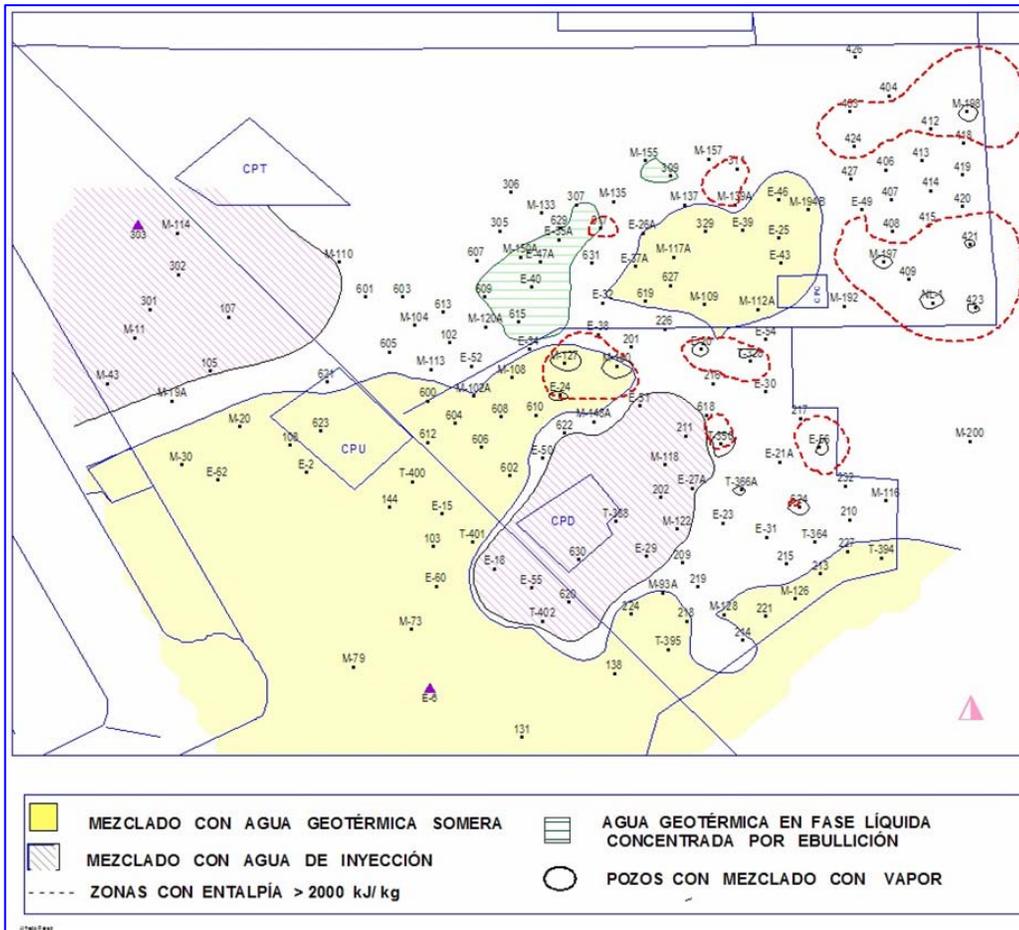


Fig. 1. Principales procesos que presentaba el yacimiento en el año 2003 (Pérez, 2004).

En el escenario antes descrito, los criterios generales para seleccionar la profundidad del intervalo productor en los pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto son cuatro:

- Criterio térmico
- Criterio geológico
- Criterio geoquímico
- Criterio comparativo

2. Criterio térmico

El criterio térmico se subdivide en tres criterios particulares:

- 2.1 Techo del yacimiento
- 2.2 Temperatura del yacimiento
- 2.3 Fase del fluido del yacimiento

2.1 Techo de yacimiento

El concepto de techo del yacimiento se observa en un registro “típico” de presión y temperatura del yacimiento de Cerro Prieto, tomado en condiciones estáticas después de que el pozo ha sido terminado y lavado, con un reposo de 5 a 10 días, en el que se observa un perfil de temperatura con un gradiente conductivo normal, un perfil de transición entre un gradiente conductivo y uno convectivo y posteriormente un gradiente convectivo dominante. La profundidad entre el perfil de transición y el inicio del perfil convectivo será el “techo de yacimiento” o inicio del yacimiento (Figura 2).

La compañía Electroconsult (1986), en la simulación numérica del yacimiento de Cerro Prieto que realizó para CFE, determinó el techo del yacimiento de los pozos que se habían perforado hasta ese momento. Generalmente la profundidad del techo del yacimiento coincide con la cima de la zona de sílice y epidota, pero en otras ocasiones no, como es el caso de los pozos de CP4, donde se observó que el techo del yacimiento está 100 ó 200 m arriba de la cima de esa zona, debido a que los fluidos calientes ascendieron más, aprovechando una permeabilidad vertical mayor en esa área. Aquí el techo del yacimiento se manifiesta desde el punto de vista mineralógico como una zona de transición con presencia de sílice, epidota y carbonatos.

2.2 Temperatura del yacimiento

La temperatura del yacimiento es aquella temperatura de equilibrio termodinámico que se alcanza entre el fluido y la roca y la cual permanece constante en el tiempo. Durante la perforación del pozo el fluido de

perforación enfría al fluido del yacimiento y a la roca momentáneamente, pero después de un tiempo se recupera la temperatura del yacimiento.

Esta temperatura puede ser calculada durante la perforación por diferentes métodos (Horne, 1951; Roux *et al.*, 1980; Ascencio *et al.*, 1997; García *et al.* 2002) con registros de temperatura tomados con lodo de perforación con tiempos de reposo de 8, 12, 16 y 20 horas en agujero descubierto, antes de correr la tubería ranurada. Lo anterior es práctica común en la terminación de todos los pozos de Cerro Prieto, con lo cual se tiene una estimación de la temperatura del yacimiento, la cual es comparada con la esperada para el inicio del intervalo productor. La temperatura del yacimiento puede ser corroborada posteriormente cuando el pozo fluya, con registros de temperatura tomados en la etapa de calentamiento (Figura 2).

Para la selección de la profundidad del inicio del intervalo productor, la profundidad y temperatura del techo del yacimiento es una de las variables que se considera. Para determinar la profundidad final del intervalo productor sólo se considera la temperatura de yacimiento.

2.3 Fase del fluido del yacimiento

La temperatura y presión del yacimiento determinan la fase termodinámica en la que se encuentran los fluidos del mismo. La selección de la profundidad del intervalo productor puede influir en la fase en la que se quiera explotar el pozo: puede ser cerca de la temperatura y presión de saturación, para producir un fluido en dos fases desde el yacimiento, o bien dejar el intervalo productor inmerso en la fase líquida, con lo cual se tendría fluido en dos fases en la tubería del pozo. El propósito de esta variable a considerar, es tratar de que la relación agua/vapor que produzca el pozo sea la menor posible al ponerlo a producir. Con ello se logrará que la caída de presión del yacimiento sea menor debido a que la extracción de fluidos del yacimiento es también menor.

Tener una imagen clara del modelo geohidrológico del yacimiento es importante para manejar esta variable, debido a que dejar terminado un pozo con una relación agua/vapor menor de 1 es lo más recomendable, pues así se producirá más vapor que agua, aunque se podrían tener pozos cuya longevidad fuera muy corta pues podrían agotarse rápidamente por una falta de recarga de fluido. Por ello, hay que manejar con cuidado este criterio, dependiendo de la localización del pozo en el yacimiento.

3. Criterio geológico

El criterio geológico se subdivide en tres criterios particulares.

3.1 Modelo geohidrológico

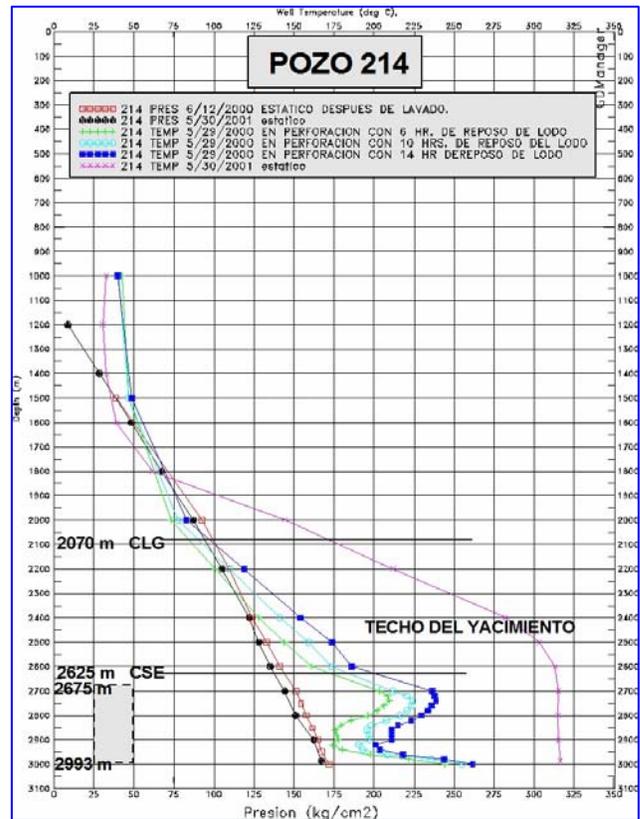


Fig. 2. Registros de presión y temperatura típicos de Cerro Prieto

Tener una imagen clara del modelo geohidrológico del yacimiento es muy importante, debido a que ello influye desde la selección del sitio donde se va a perforar el pozo hasta la selección de la profundidad del inicio y fin del intervalo productor. Es preciso conocer cuáles son las principales fallas del campo, cómo influyen en el movimiento de los fluidos, cómo se mueven estos en el yacimiento, cuál es la geología del subsuelo, a qué profundidad se encuentra la base de los sedimentos clásticos no consolidados, la cima de la lutita café, la cima de lutita gris y la cima de la zona de sílice y epidota. En la Figura 3, se muestra una sección en dirección general SW-NE que incluye el modelo conceptual del yacimiento de Cerro Prieto.

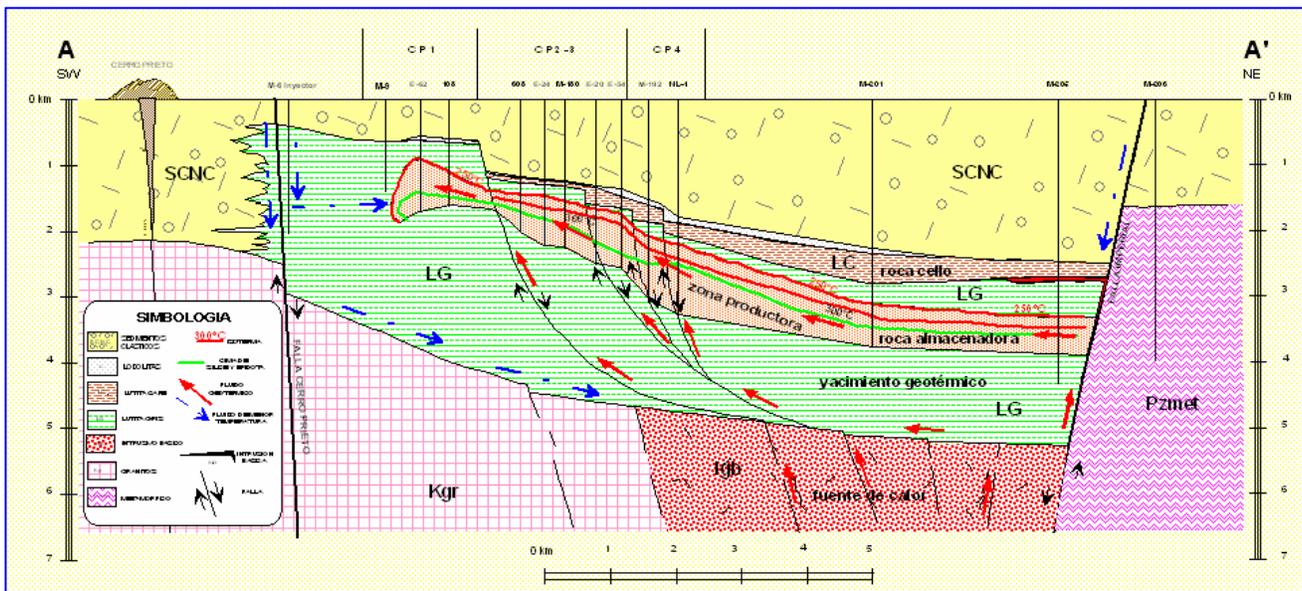


Fig. 3. Modelo conceptual del yacimiento de Cerro Prieto (Lira, 2005)

3.2 Cima de la lutita gris

La unidad de lutita gris sobreyace al basamento granítico, y su cima va desde los 398 m de profundidad al oeste del campo profundizándose hacia el oriente hasta los 2847 m, con un espesor promedio de 3,000 m. Dentro de esta unidad se presentan horizontes lenticulares de areniscas permeables, que son las que alojan a los fluidos del yacimiento (Lira, 2005).

Dentro de esta unidad se identifica una zona de mayor permeabilidad al registrarse la presencia de relices de falla, recortes en bloque y mineralización hidrotermal conocida como zona mineralógica de sílice y epidota (Corona, 1996). La temperatura de la cima de la lutita gris está entre 150 y 250° C.

Es importante conocer la profundidad de este estrato como referencia para la selección de la profundidad del intervalo productor.

3.3 Cima de la zona de sílice y epidota

La interacción de los fluidos geotérmicos de alta temperatura con las rocas sedimentarias ha provocado la alteración hidrotermal de los minerales primarios, dando como resultado la formación de minerales secundarios. Las areniscas resultantes de esa interacción presentan su cementante original reemplazado por arreglos de minerales de alteración hidrotermal. Uno de esos arreglos es en el que predomina la sílice y la epidota, dando lugar a una zona muy conspicua denominada justamente zona de sílice y epidota. La cima de

esta zona se localiza a partir de los 1400 m de profundidad y se profundiza hacia el este del campo hasta alcanzar los 3600 m.

Una de las primeras referencias que se utilizaron para la selección del inicio del intervalo productor en los pozos fue la cima de la zona de sílice y epidota, y actualmente, en los pozos de la parte central y sur de CP2, este criterio sigue funcionando. Una configuración de la cima de sílice y epidota del yacimiento se muestra en la Figura 4.

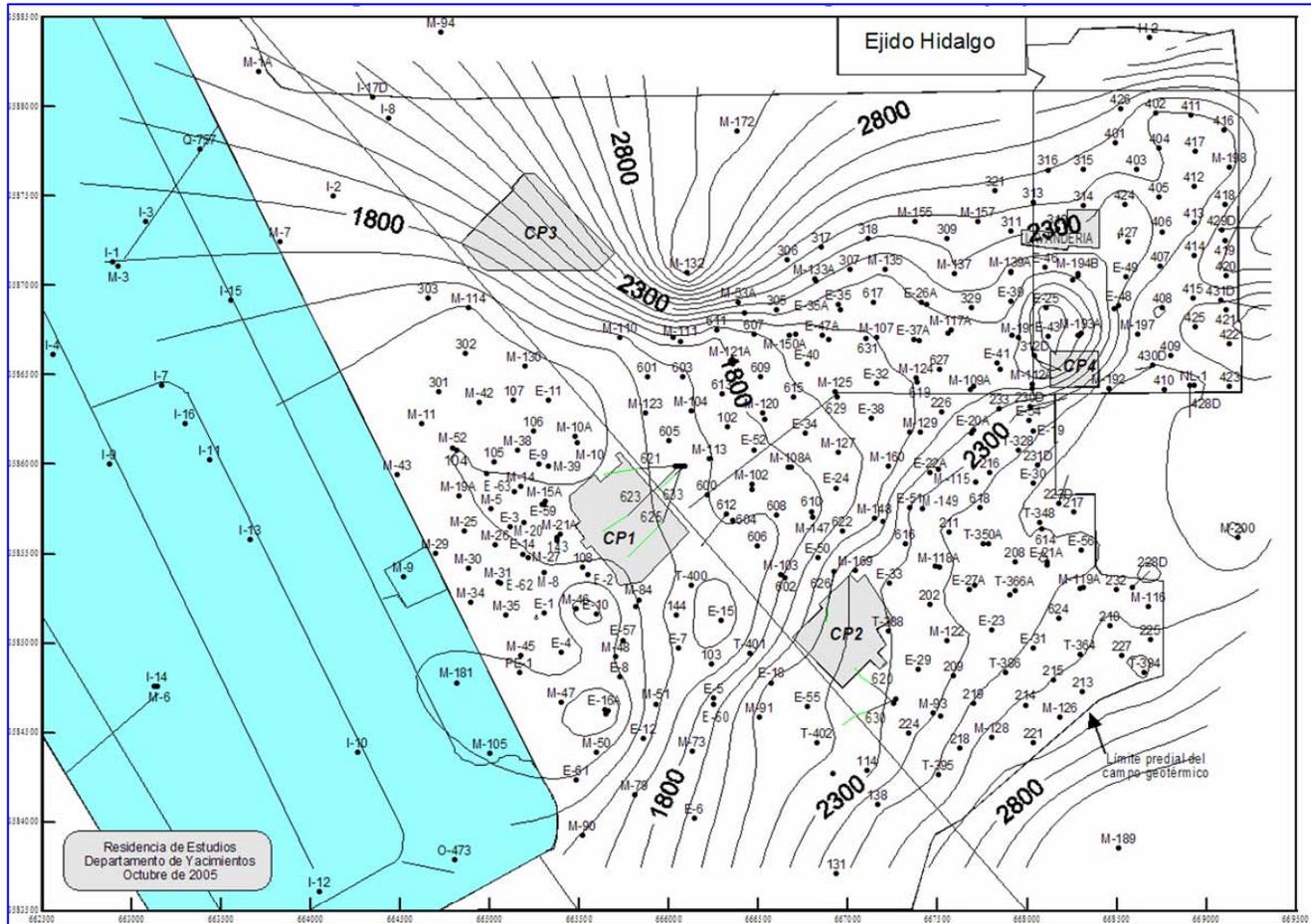


Fig. 4. Configuración de la cima de la zona de sílice y epidota

4. Criterio geoquímico

El criterio geoquímico se divide en tres criterios particulares.

- 4.1 Geotermómetros
- 4.2 Concentración de Cloruros
- 4.3 Isotopía

4.1 Geotermómetros

Las temperaturas calculadas con los geotermómetros de sodio-potasio-calcio (Na-K-Ca) y sílice son usadas como criterio. Como se sabe, el primero de ellos es el indicador más usual de la temperatura del yacimiento y

es poco afectado por los efectos de ebullición de los pozos cercanos o por la mezcla con condensados o agua con baja salinidad (Fournier y Truesdell, 1973), mientras que el segundo estima la temperatura del fondo con el pozo fluyendo (Fournier y Potter, 1982).

Conocer el valor y evolución de la temperatura con estos geotermómetros en los pozos vecinos es importante, para tener una idea del tipo de proceso que ha ocurrido en la zona o si se ha mantenido la temperatura del yacimiento. En la Figura 5, se muestra una configuración de la temperatura calculada con el geotermómetro de Na-K-Ca.

4.2 Concentración de cloruros

Las aguas meteóricas descienden a través de las zonas permeables y circulan hasta profundidades de 5 a 7 km, son calentadas por las rocas y posteriormente ascienden por convección. Estas aguas profundas se consideran las primeras aguas geotérmicas cloruradas y todos los demás tipos de aguas son directamente o indirectamente derivadas de ellas.

A profundidad los fluidos típicos contienen entre 1000 y 10 000 mg/kg de Cl a temperaturas cercanas a los 350° C (Nicholson, 1993). Las aguas originales de Cerro Prieto contienen entre 8000 y 12 000 mg/kg (Pérez, 2000). Se ha observado que si el contenido de los cloruros es menor del original (4000 a 6000 mg/kg) existe dilución por la presencia de aguas someras de recarga o por condensación de la fase vapor en el pozo. Si el contenido de cloruros es mayor del promedio se puede deber a dos causas: que fluido del yacimiento esté en dos fases o que el pozo esté recibiendo agua de inyección, con cloruros arriba de 20 000 mg/kg. En la Figura 6 se presenta la configuración de cloruros en el año 2003, pudiéndose apreciar zonas afectadas por inyección y zonas afectadas por dilución.

Lo anterior influye en la selección del intervalo productor, ya que el agua de inyección tiende a profundizarse por la mayor densidad de la misma, mientras que el agua de la recarga natural del yacimiento se mueve en la parte somera. Ambos fluidos tienden a enfriar al yacimiento, por lo que hay que considerarlos.

Las configuraciones del contenido de cloruros ayudan a tener una idea del proceso que se está llevando a cabo en el área de explotación.

4.3 Isotopía

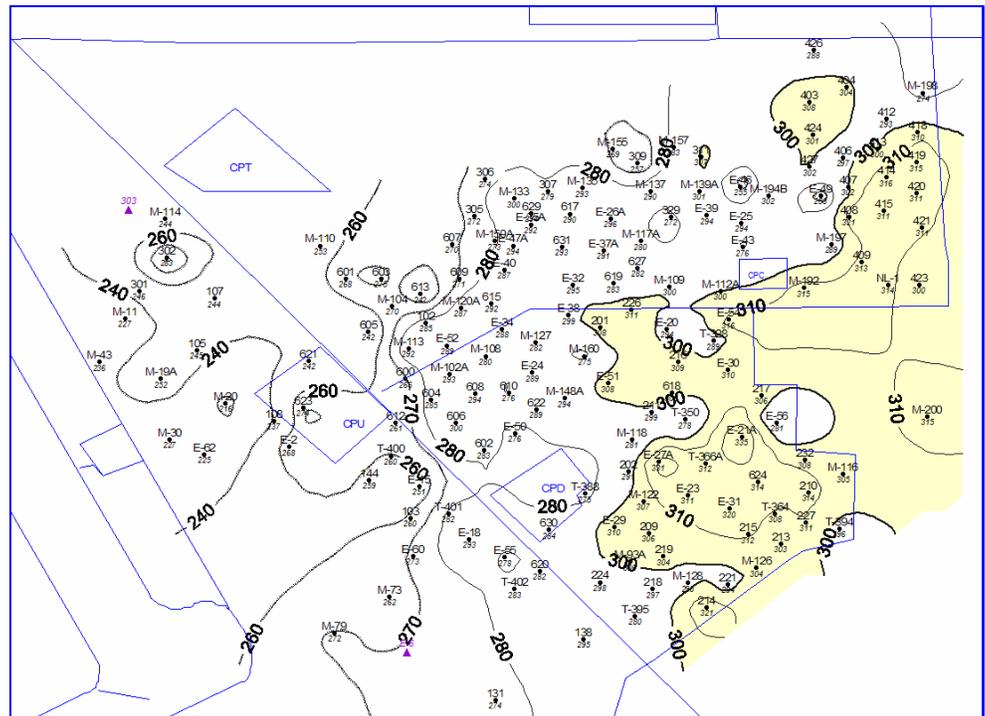


Fig. 5. Configuración de temperaturas promedio del geotermómetro de Na-K-Ca (Pérez, 2004)

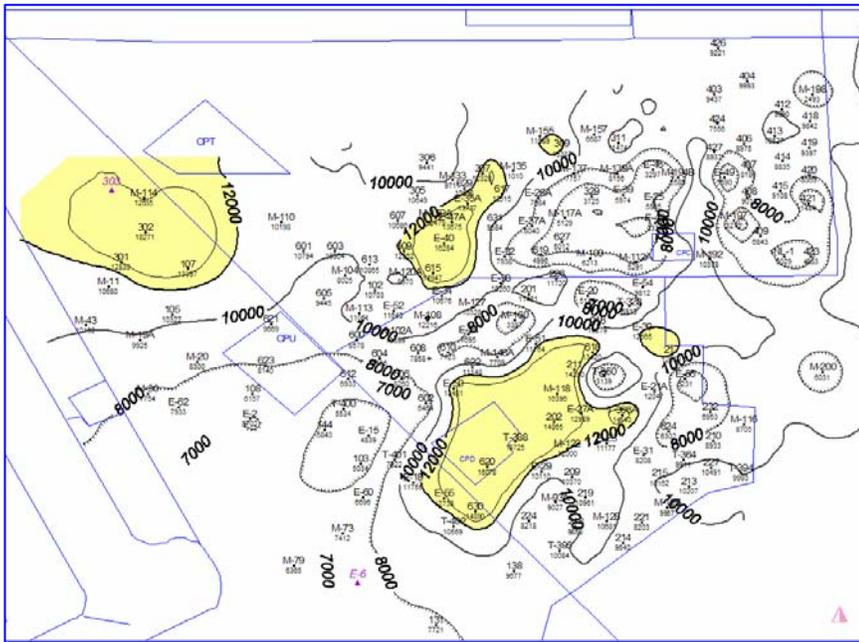


Fig. 6. Configuración del contenido de cloruros en 2003

Lo prioritario para desarrollar las técnicas analíticas de isótopos fue lo incierto del origen de las aguas geotérmicas: magmático o meteórico, pero pronto se demostró que el contenido de δD en aguas geotérmicas es similar al de las aguas meteóricas locales, mientras que los valores de $\delta^{18}O$ del agua geotérmica son más positivos que los del agua meteórica. El rango típico para las aguas de Cerro Prieto para δD es de -90 a -100 y para $\delta^{18}O$ de -6.5 a -9.5 (Pérez, 2000). La variación del isótopo del deuterio se emplea en Cerro Prieto para monitorear el proceso de mezcla de agua geotérmica con agua de inyección (Figura 7), mientras que la del isótopo ^{18}O se usa más bien para evaluar el mezclado del agua

geotérmica con la recarga (Figura 8).

El mapeo de ambos isótopos ayuda a observar los procesos que se presentan en el yacimiento. Como se mencionó, conocer el área y el frente de los pozos afectados por el agua de inyección y la recarga natural, ayuda en el momento de seleccionar el intervalo productor para tener cuidado a profundidad con las aguas de inyección, que tienden a irse hacia el fondo del yacimiento, y con las de la recarga natural, que se mueven en la parte somera del yacimiento.

5. Criterio comparativo

El criterio comparativo se refiere al hecho de comparar las terminaciones, las condiciones que se tuvieron al perforar, las condiciones térmicas y las geoquímicas de los pozos vecinos al lugar donde se está proponiendo perforar un pozo nuevo.

Este criterio se divide en tres criterios particulares:

5.1 Hechos ocurridos durante la perforación de los pozos vecinos.

5.2 Evolución de las condiciones termodinámicas de los pozos vecinos.

5.3 Evolución de los datos geoquímicos de los pozos vecinos.

5.1 Hechos ocurridos durante la perforación de los pozos vecinos

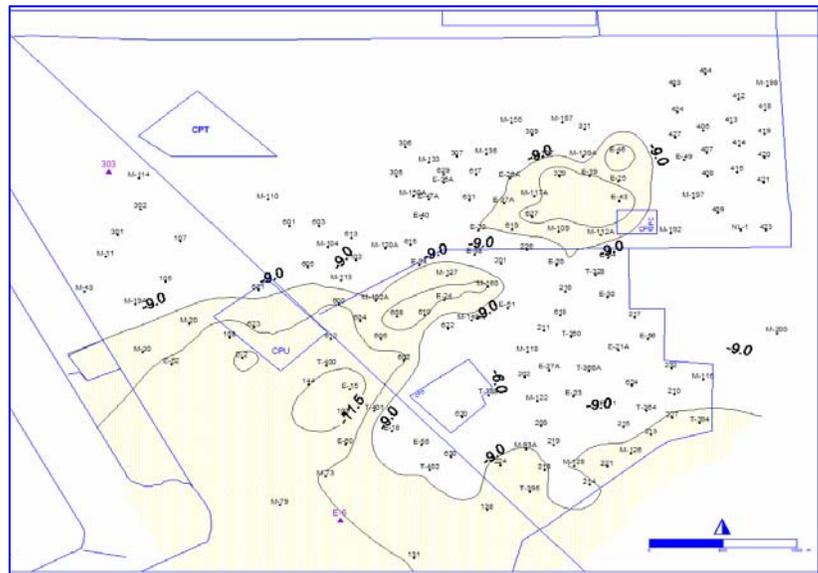


Fig. 7. Configuración del contenido de deuterio

Es importante revisar las condiciones en que ocurrió la perforación de los pozos vecinos al lugar propuesto, tales como las profundidades donde se presentaron pérdidas de circulación, atrapamiento de tuberías, pescados, colapsos, roturas y cementaciones.

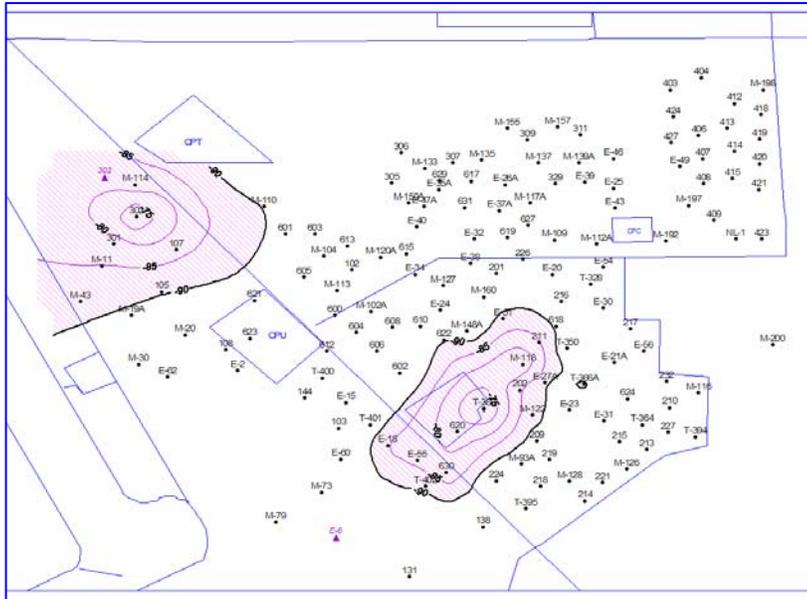


Fig. 8. Configuración del contenido de oxígeno 18

5.2 Evolución de las condiciones termodinámicas de los pozos vecinos

Actualmente se han realizado contratos de perforación que duran hasta tres años, y algunos pozos pueden haber sido localizados más de un año antes de su perforación. Durante ese tiempo las condiciones termodinámicas del yacimiento cambian, por lo que una revisión y actualización de estas condiciones es importante antes de la perforación del pozo.

5.3 Evolución de los datos geoquímicos de los pozos vecinos

De manera similar al criterio anterior, es necesario realizar una revisión y actualización de los parámetros geoquímicos que se utilizaron para localizar el pozo y seleccionar sus condiciones de terminación, antes de la perforación.

Una vez que se han planteado las condiciones térmicas, geológicas y geoquímicas que se esperan encontrar al terminar el pozo, en Cerro Prieto usualmente se realiza una estimación de la producción por medio de un simulador de pozo, con el cual se calcula la curva característica esperada, para saber si la presión de cabezal del pozo será superior a la presión de separación necesaria para integrar el pozo a producción.

6. Conclusión

A manera de conclusión, puede decirse que:

- Los criterios mencionados han ayudado a la selección de la profundidad del intervalo productor en pozos del campo geotérmico de Cerro Prieto en los últimos diez años.
- Cuando la mayoría de esos criterios son interpretados correctamente, la posibilidad de contar con un pozo productor es muy amplia.
- La selección de los intervalos productores de los pozos en Cerro Prieto se ha convertido en una tarea multidisciplinaria en la que intervienen ingenieros en yacimientos, geólogos y geoquímicos.
- Nuevos criterios se irán agregando conforme el yacimiento vaya cambiando con el tiempo.

Agradecimientos

Agradezco a los ingenieros Martín Corona Ruiz, Héctor Lira Herrera y Alfredo Pérez Hernández de la Residencia de Estudios de Cerro Prieto por su ayuda para la conformación de este trabajo.

Referencias

- Ascencio, F., J. Rivera, y F. Samaniego (1997). On the practical aspects of determination of the true reservoir temperature under spherical heat flow conditions. *Proceedings 21 Workshop on geothermal reservoir engineering*, Stanford University, Stanford, Ca., pp. 27-29
- Corona R., M. (1996) Actualización del Modelo Geológico del Campo del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. CFE, RGCP, Reporte interno RE-09/96. Inédito.
- De León V., J.S. (1988) Presencia de dos fases en el yacimiento del campo geotérmico de Cerro Prieto. *Geotermia*, Revista Mexicana de Geoenergía. Vol. 4, No. 1, pp. 203-211.
- De León V., J.S. (2001) New tools for reservoir engineering in Cerro Prieto geothermal field. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 25, pp. 26-29.
- Domínguez A., B. (1979) Terminación y desarrollo de pozos en Cerro Prieto. *Segundo simposio sobre el Campo Geotérmico de Cerro Prieto, Baja California, México*, pp. 265-291.
- Electroconsult (1986). Cerro Prieto: Re-evaluación del potencial. Reporte interno preparado para CFE. Inédito.
- Fournier, R.O., and A.H. Truesdell (1973). An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, pp. 1255-1275.
- Fournier, R.O., and E. Potter (1982). An equation correlating the solubility of quartz in water from 25° C to 900° C at pressures up to 10,000 bars. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, pp. 1969-1974.
- García G., A., G. Espinosa, A. Vázquez, J. De León, and M.H. Rodríguez (2002). Estimation of formation temperatures using simulation and optimization techniques of circulation and shut-in processes. *Proceedings of the International Conference The Earth's Thermal Field and Related Research Methods*, pp. 73-77.
- Horne D.R. (1951) Pressure buildup in wells. *Proceedings of the Third World Petroleum Congress*, The Hague, 2:503.
- Lira H., H. (2005) Actualización del Modelo Geológico Conceptual del Yacimiento Geotérmico de Cerro Prieto, BC. *Geotermia*, Vol. 18, No. 1, pp. 37-46.
- Nicholson, K. (1993) *Geothermal fluids, chemistry and exploration techniques*. Editorial Springer- Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- Olivas H., M., y J.M.E. Vaca S. (1982) Criterios para determinar la profundidad de ademes en Cerro Prieto. *Cuarto Simposio sobre el campo geotérmico de Cerro Prieto*, pp. 617-629.

- Pérez H., A. (2000) Caracterización de los procesos en el yacimiento utilizando variables geoquímicas y termodinámicas básicas. CFE, RGCP, Reporte interno RE-031/00. Inédito.
- Pérez H., A. (2004) Caracterización general de los procesos en el yacimiento del campo geotérmico de Cerro Prieto. CFE, RGCP, Reporte interno RE-032/04. Inédito.
- Roux, B., S. Sanyal, and S.L. Brown (1980). An improved approach to estimating true reservoir temperature from transient temperature data. *Proceedings of the 50th Annual California Regional Meeting of the Petroleum Engineers, AIME*, pp. 13-21.
- Terrazas A., M.A. (1985). Perforación de pozos geotérmicos en el campo de Cerro Prieto. Tesis para obtener el título de Ingeniero Petrolero. Facultad de Ingeniería, UNAM. Inédito.
- Truesdell, A.H., A. Mañón, M. Jiménez, A. Sánchez, and J. Fausto (1978). Geochemical evidence of drawdown in the Cerro Prieto, Mexico, geothermal field. *Geothermics*, 8 (3/4), pp. 257-265.