

Estudios para recuperar la capacidad de aceptación en pozos inyectoros del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC

Julio Álvarez Rosales

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Residencia General de Cerro Prieto, Mexicali, BC, México. Correo: julio.alvarez@cfe.gob.mx.

Resumen

Al igual que en diversos campos geotérmicos en el mundo, en el de Cerro Prieto, BC, se han utilizado tanto pozos inyectoros perforados *ex profeso* como antiguos pozos exploratorios y productores para inyectar el fluido residual al subsuelo. Desde la década de los 80 se han realizado diversos estudios y acciones en ese campo geotérmico para recargar al yacimiento y para disponer del fluido residual, sin ocasionar daños al ambiente ni a los cuerpos hídricos del subsuelo, que van desde la infiltración hasta la inyección en frío y en caliente. Este artículo presenta los diferentes estudios realizados con ese objetivo en el campo, incluyendo el análisis de litofacies, de núcleos de formación, de registros de presión, temperatura y *spinner*, las pruebas en pozos y análisis de tasas de aceptación, así como los efectuados en el acuífero superficial. Todos ellos han sido de utilidad para atender los requerimientos de las autoridades ambientales. Finalmente, y en virtud de que las tasas de aceptación de los pozos disminuyen constantemente debido a daños a la formación, se propone incorporar una técnica adicional para reducir el daño, prolongar la vida útil de los pozos de inyección en frío y en caliente, y al mismo tiempo continuar asegurando que no se afecta el medio ambiente ni los acuíferos someros.

Palabras clave: Acuíferos, Cerro Prieto, inyección, salmuera residual.

Studies for recovering injection capacity in wells of the Cerro Prieto, BC, geothermal field

Abstract

As in geothermal fields around the world, at Cerro Prieto geothermal field, BC, former exploratory and production wells are used to inject residual brine. Since the 1980s, studies and activities have been carried out to find ways to recharge the reservoir and dispose of brine without harming the environment or underground aquifers. These include infiltration and cold-and-hot injection. Some of the studies are presented here, including analyses of litho-facies; core samples; pressure, temperature and spinner logs; well tests and injection rates—plus some studies on the shallow aquifer. All have been useful in fulfilling requirements made by environmental authorities. Because injection rates constantly decrease due to formation damage, it is proposed an additional technique be used to reduce such damages and prolong the lifetime of cold-and-hot injection wells—while ensuring the environment and shallow aquifers are not affected.

Keywords: Aquifers, Cerro Prieto, injection, residual brine.

1. Introducción

A la fecha se han realizado diversos estudios para reinyectar el fluido residual en el Campo Geotérmico de Cerro Prieto (CGCP). De manera similar a otros campos geotérmicos del mundo, han sido utilizados antiguos pozos exploratorios y productores, y se han construido pozos *ex profeso*. Al inicio, la reinyección se enfocó

para recargar el yacimiento y disponer el fluido residual sin ocasionar daños al medio ambiente. Sin embargo, esto último tiene mayor relevancia en la actualidad por sus implicaciones ecológicas y porque ya se ha registrado el efecto de la reinyección en pozos productores (Truesdell *et al.* 1999).

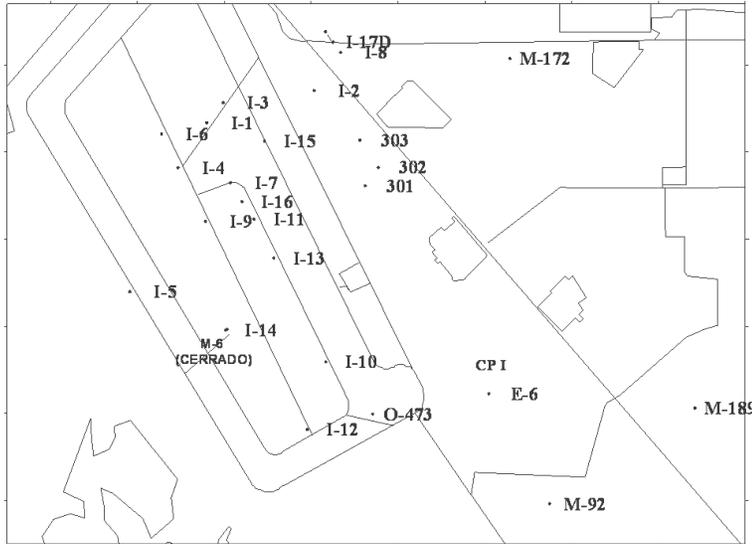


Fig. 1. Ubicación de pozos inyectoros (I) en el campo de Cerro Prieto.

disminuir el efecto de la reinyección en la zona productora.

2. Estudios realizados

En la búsqueda de alternativas para el manejo y disposición de la salmuera excedente de la laguna de evaporación solar, en 1986 se realizaron pruebas de inyección en pozos antiguos (M-6, M-9 y Q-757). También se realizó un estudio de prefactibilidad para evaluar el desecho de salmuera mediante su infiltración en la porción occidental del campo. Esta porción está cubierta por abanicos aluviales y en su subsuelo existe un acuífero somero que contiene salmuera no apta para ningún uso doméstico o agrícola. El estudio no fue conclusivo.

Subsecuentemente se han perforado pozos inyectoros pero algunos han registrado bajas tasas de aceptación, por lo que ha sido necesario estudiarlos para determinar las causas. Asimismo, estos estudios también se han utilizado para seleccionar nuevos sitios de inyección. A continuación se indican las principales conclusiones de algunos de ellos.

2.1 Análisis de litofacies

Los resultados obtenidos en algunos pozos llevaron a estudiar en detalle los cuerpos de arenas-areniscas, y a reinterpretar la geología de la zona de reinyección, echando mano de nueva información litológica proveniente de pozos, muestras de núcleos, registros eléctricos y de temperatura. En resumen se determinó lo siguiente.

- Existe una definida diferencia litológica entre las zonas de producción de vapor y las de reinyección. En las primeras las unidades de lutitas y areniscas están consolidadas y las zonas mineralógicas (con cementantes de minerales hidrotermales) bien definidas. En cambio hacia la zona de reinyección hay una transición de las

El CGCP se localiza en el Valle de Mexicali, Baja California, México, a 30 km al sureste de la ciudad de Mexicali, y la zona de reinyección es la porción occidental (Fig. 1). Actualmente la salmuera residual es inyectada tanto en frío como en caliente.

El objetivo de este trabajo es presentar los principales estudios realizados para explicar la baja tasa de aceptación de algunos pozos desde el punto de vista geológico y el punto de vista relacionado con la construcción y operación de los mismos.

Además, se realizan recomendaciones de mejora para disminuir el daño a la formación de los pozos e incrementar sus tasas de aceptación, así como algunas estrategias para

areniscas hacia facies de arenas no consolidadas y arenas arcillosas, mientras que las lutitas se convierten en arcillas y arcillas arenosas igualmente sin consolidación.

- Los factores geológicos relacionados con la baja aceptación de los pozos son: presencia de sedimentos finos (arcillas y limos) en los intersticios de las areniscas y las arenas, así como auto-sellamiento de las areniscas por mineralización hidrotermal (pirita, clorita y sílice) ocasionado por la descarga natural del yacimiento geotérmico.

- Se definieron para la zona de reinyección del CGCP dos tipos de litofacies: Lutita-Arcilla y Arenisca-Arena (Álvarez y Camacho, 2003), de forma similar a lo definido en los estudios previos de Lyons y Van de Kamp (1980) y Halfman *et al.* (1984, 1986) para explicar el movimiento de fluidos en el subsuelo. Finalmente, se obtuvo el modelo de litofacies de la zona de reinyección.

2.2 Estudios de muestras de núcleos

Se realizó un estudio sobre muestras de núcleos de formación recuperados en 1988 obteniéndose un mayor detalle sobre la litología de la zona de reinyección (Álvarez, 2001). En general el subsuelo en esta zona está constituido por arenas, areniscas, arenas arcillosas, areniscas limolíticas, arcillas y lutitas. La escasa compactación que llega a ocurrir se debe a la carga litostática y a la cohesión debida a arcillas y limos intersticiales. Además, se confirmó el efecto de descarga del yacimiento que provoca el auto-sellamiento de la formación y la formación de horizontes semi-compactos aislados.

Se realizaron análisis de propiedades petrofísicas en estas muestras de núcleo, que confirman la amplia variación de las propiedades en la zona de reinyección. En Tabla 1 se presentan algunos resultados en núcleos de los pozos inyectoros I-4 e I-7, los cuales contribuyen a explicar por qué el pozo I-7 tiene mayor tasa de aceptación que el I-4.

Pozo	Profundidad (m)	ρ_t	ϕ	kw
I-4	1253 - 1254	2.04 - 2.07	20.5 - 22.6	171
	1257 - 1258	2.07 - 2.09	21.1 - 21.8	3.04
	1293 - 1294	2.09	19.8 - 20.4	-
I-7	647 - 652	1.79 - 1.97	27.8 - 31.2	1070 - 1373

ρ_t : Densidad total de la roca seca en g/cm³.

ϕ : Porosidad en %.

kw : Permeabilidad absoluta, salmuera a condiciones de yacimiento, en milidarcys.

Tabla 1. Resumen de las determinaciones petrofísicas en núcleos de formación de los pozos inyectoros I-4 e I-7 (Datos de Contreras, 1999).

El efecto de los sedimentos finos intersticiales en los horizontes de arena sobre la capacidad aceptación de los pozos se evaluó en el laboratorio de petrofísica (Contreras, 1999; Contreras y García, 2003). Se ensayaron muestras para determinar la permeabilidad empleando agua pura y salmuera como fluidos de medición, resultando que la permeabilidad al agua resultó ser mucho menor que la permeabilidad a la salmuera, llegando éstas a diferir entre sí en tres órdenes de magnitud debido al hinchamiento de arcillas activas. Lo anterior explica la baja aceptación de algunos pozos, ya que el hinchamiento de las arcillas obstruye los conductos de flujo y afecta la permeabilidad.

2.3 Análisis de historia de inyección

Actualmente la reinyección en el campo de Cerro Prieto se realiza por gravedad (sin bombeo) y en frío. La salmuera separada de los pozos productores se envía por drenes o tuberías a la Laguna de Evaporación Solar ubicada al occidente del campo, donde su temperatura se reduce y se depositan parte de los compuestos que lleva en solución, particularmente sílice. Después se toma la salmuera directamente de la laguna y se conduce hacia los pozos inyectores, utilizándose bombas cuando el pozo está alejado, como es el caso de los pozos I-8 e I-17D (Fig. 1).

Se analizó el comportamiento histórico de las tasas de aceptación de 19 pozos inyectores y se lograron definir básicamente dos tipos de tendencia histórica: a) Una declinación bien definida en la capacidad de aceptación, como ocurre con el pozo inyector I-1 cuya historia de inyección entre octubre de 1992 y marzo de 2007 se reproduce en la Figura 2 (izquierda), y b) Una tendencia a mantener constante la capacidad de aceptación, es decir sin declinación, como ocurre por ejemplo con el pozo inyector E-6 cuya historia de inyección entre mayo de 1990 y febrero de 2008 aparece también en la Figura 2 (derecha). Estos comportamientos se atribuyen principalmente a la permeabilidad y al efecto ocasionado por el agua reinyectada que contiene alto contenido de sólidos totales disueltos.

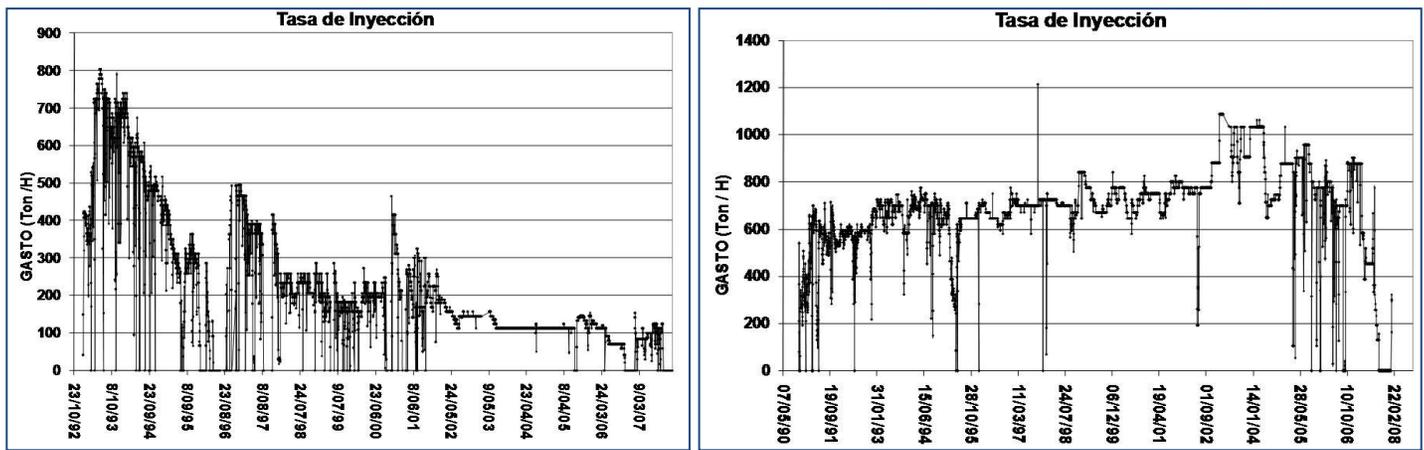


Fig. 2. Historia de inyección en los pozos I-1 (izquierda) y E-6 (derecha) del campo geotérmico de Cerro Prieto (tasa de inyección o gasto en toneladas por hora).

Por su parte, el pozo M-6 fue perforado hasta 2042 m de profundidad y terminado con disparos en la tubería de revestimiento (T.R.) de 11 $\frac{3}{4}$ " \varnothing entre 534 y 740 m de profundidad y un tapón mecánico a 766 m. Este pozo fue de los primeros utilizados para reinyección a lo largo de casi cinco años. Del análisis y reinterpretación del comportamiento de la inyección en él se definió lo siguiente:

- El intervalo disparado corresponde a una intercalación de cuerpos poco consolidados de lutitas y areniscas.
- Mediante análisis de muestras de núcleo y de registros se determinaron dos horizontes permeables: de 400 a 800 m y 1750 a 2042 m de profundidad.
- Con una transmisibilidad (KH) de 22,334.79 md-m y un índice de inyectividad entre 19.4 y 23.85 $\text{m}^3/\text{H}/\text{kg}/\text{cm}^2$ a diferentes gastos, calculados mediante pruebas, se clasificó como buen pozo inyector por su alta permeabilidad (Ribó, 1987; Aragón y Acosta, 1987).
- En 1991 se realizaron pruebas de acidificación en el pozo, lográndose incrementar favorablemente la tasa de inyección de 25 a 250 t/h, y llegando hasta 300 t/h (Fig. 3). Sin embargo, posteriormente se registró una declinación de 65.7 t/h por año, hasta que el pozo debió salir de operación en 1995 y actualmente está cerrado.

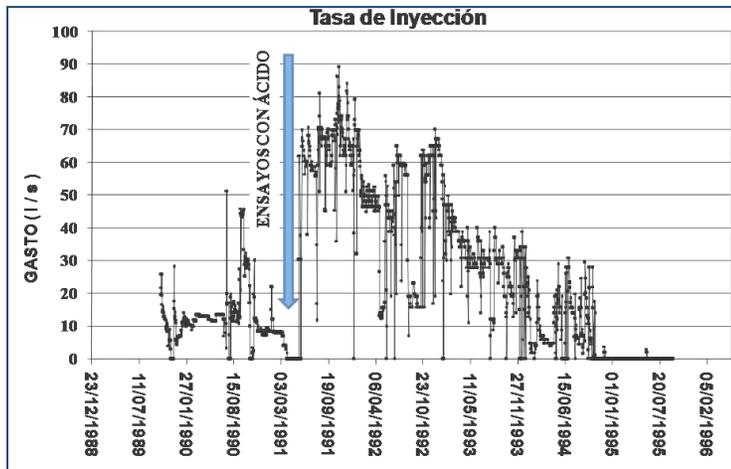


Fig. 3. Historia de inyección del pozo M-6.

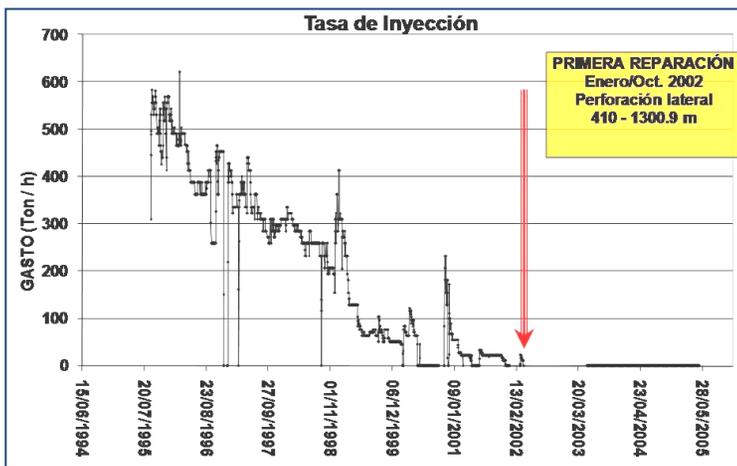


Fig. 4. Historia de inyección del pozo I-4.

mezcla de agua y vapor. Sin embargo, el pozo I-16 que casi no admitía inyección por gravedad, a partir de julio de 2006 incrementó su tasa de entre 10-49 t/h hasta 280 t/h. Esto implica que en la zona de reinyección actual del CGCP se está presentando saturación y reactivación térmica en algunos sectores.

En noviembre de 2005 se calibraron 23 pozos y se corrieron registros de temperatura y presión, se midió la profundidad del nivel estático y en algunos se realizaron pruebas de inyección-recuperación. Como un producto de todo ello, se obtuvieron configuraciones de isotermas (Fig. 5), de presión, de profundidad de nivel estático y el factor de daño de la formación en algunos pozos.

Debido a que desde agosto de 2003 el pozo inyector I-9 presenta presión en el cabezal y flujo intermitente de agua y vapor, en 2005 se realizaron análisis químicos e isotópicos de sus fluidos, en conjunto con los del I-4. La conclusión es que los fluidos son una mezcla de salmuera inyectada y de la descarga hidrotermal proveniente del yacimiento geotérmico.

2.6 Registros de *spinner*

Se corrieron registros con *spinner* en algunos pozos inyectores, a fin de definir los cuerpos permeables dentro del intervalo inyector, así como contar con elementos técnicos adicionales para programar la terminación y selección de nuevos sitios en el futuro.

2.4 Reparación de pozos inyectores

Para mejorar la tasa de aceptación, a la fecha se han intervenido cinco pozos. La intervención ha consistido principalmente en la calibración y limpieza de las tuberías, la desviación del pozo y su profundización.

Sin embargo, en algunos casos los resultados no han sido los esperados, como en el caso del pozo I-4 (Fig. 4), por lo que se propone incorporar técnicas de estimulación ácida para mejorar la capacidad de aceptación, considerando los buenos resultados obtenidos con las pruebas en el pozo M-6 (Fig. 3).

2.5 Perforación de pozos inyectores

En 2004 se construyeron cuatro pozos con objetivos específicos de inyección (pozos I-14, I-15, I-16 e I-17D, ver Fig. 1). A partir de los resultados obtenidos con su perforación, se puede concluir que la mejor opción para reinyección es la porción noroeste del CGCP, donde se ubican los pozos I-8 e I-17D.

Los pozos I-14, I-15 e I-16 no resultaron adecuados para reinyección por gravedad, ya que registraron presión positiva y los dos primeros fluyeron en forma intermitente produciendo una

A partir de esos registros se determinó que en ciertos casos el intervalo de tubería ranurada resulta ser mayor que el espesor de los cuerpos permeables. Por ejemplo, en el pozo I-8 el intervalo de tubería ranurada es de 856 m mientras que el espesor permeable es de sólo 382 m.

Adicionalmente, durante la toma de esos registros se observó que en algunos pozos se podría inyectar un gasto mayor al actual, por lo que resulta recomendable el uso de bombas a boca de pozo.

2.7 Inyección en caliente

En abril de 2005 se iniciaron las pruebas para inyectar en caliente en el pozo 626, mismo que actualmente está en operación.

Asimismo, desde febrero de 2006 se reinyecta en el pozo 303 la salmuera separada proveniente de los pozos 301 y 302, con un gasto promedio de 200 t/h a una temperatura de 150 a 170°C y una presión de 5 a 8 bar (Fig. 6). A la fecha el pozo 303 no ha presentado mayor problema.

Por otro lado, en 2008 dos pozos ubicados en el sector Cerro Prieto II fueron intervenidos con el objetivo de utilizarlos como pozos inyectores en caliente. Tampoco con estos pozos se esperan mayores problemas.

3. Conclusiones y recomendaciones

Las bajas tasas de aceptación en algunos pozos inyectores se deben principalmente a la interferencia de sedimentos finos intersticiales en los cuerpos de arena y arenisca, así como al auto-sellamiento de la formación por los minerales depositados por la descarga hidrotermal natural del yacimiento en la porción oeste del CGCP.

Los pozos inyectores presentan dos tipos principales de tendencia en el comportamiento de las tasas de inyección: a) con declinación definida, atribuida al efecto ocasionado por el contenido de sólidos totales disueltos del agua, y b) sin declinación, que se asocia a formaciones con alta permeabilidad.

En el pozo M-6 se realizaron pruebas de acidificación en 1991, con lo cual se logró un incremento notable en su tasa de inyección. Aunque esta tasa declinó de nuevo posteriormente, es recomendable incorporar la estimulación ácida como otra opción para reparar pozos inyectores.

Con base en los resultados obtenidos en los últimos pozos inyectores construidos y en su comportamiento, se confirma que las condiciones de presión y temperatura de la zona de inyección actual están cambiando, por lo que se recomienda continuar con el monitoreo con registros, iniciado en 2005.

Para mejorar la tasa de aceptación de los pozos inyectores se propone:

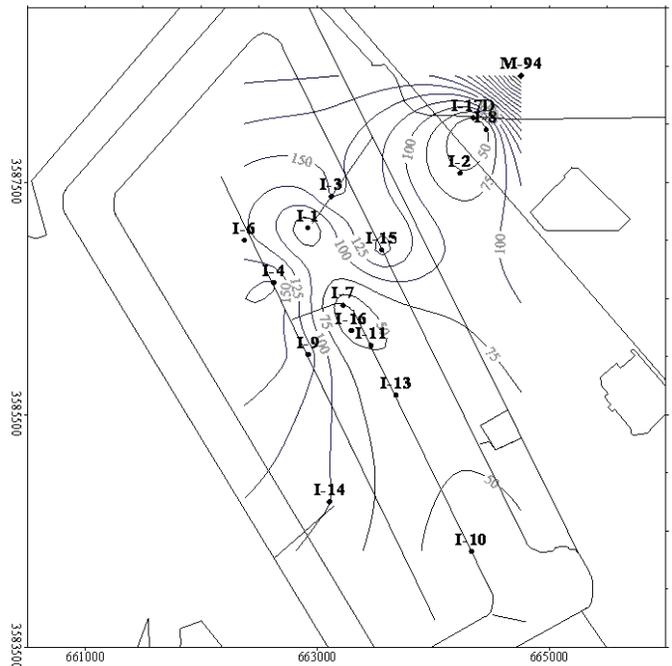


Fig. 5. Isotermas a 500 m de profundidad en la zona de inyección de Cerro Prieto.

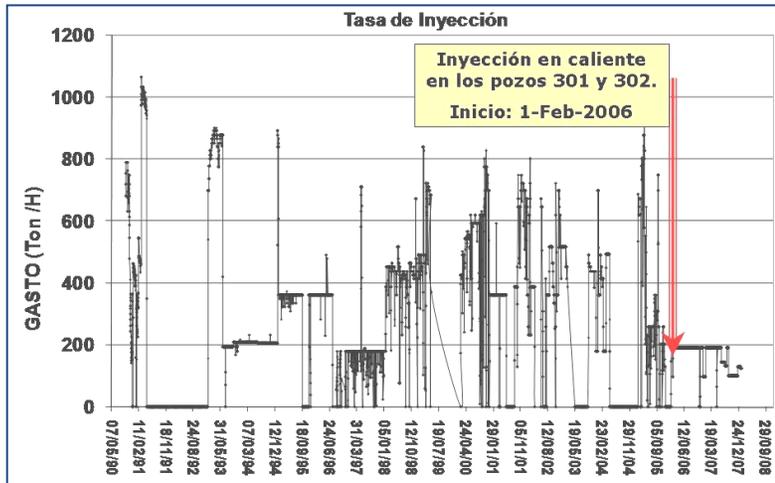


Fig. 7. Historia de inyección del pozo 303.

- a. Incorporar la técnica de estimulación ácida para disminuir el daño de la formación. Esta técnica ya ha sido utilizada satisfactoriamente en los campos geotérmicos de Los Azufres y Las Tres Vírgenes, para no mencionar a otras partes del mundo.
- b. De acuerdo a los resultados de los registros *spinner* y lo observado durante su corrida, se recomienda el uso de bombas a boca de pozo para incrementar la aceptación de los pozos inyectoros.

- c. Se recomienda el tratamiento químico de la salmuera residual previamente a su inyección, para disminuir el contenido de sólidos disueltos que pueden depositarse en la formación, dañándola, y provocando una paulatina disminución de la tasa de inyección.
- d. Considerando el resultado de los últimos pozos inyectoros perforados y la evidencia de presión positiva y flujo de agua y vapor en algunos de ellos, se concluye que la zona de inyección debe reubicarse, y localizarse preferencialmente hacia la porción noroeste del campo, donde se ubican los pozos I-8 e I-17D (véase Fig. 1).

Con el objeto de evitar y/o disminuir el efecto no deseado de la salmuera reinyectada en el yacimiento se propone lo siguiente.

- a. Probar el esquema de reinyección con bombas a boca de pozo en pozos nuevos, fuera de los límites del campo. Por ejemplo, hacia el norte del pozo I-17D y al sur, alrededor del pozo M-92.
- b. Calibrar, correr registros, rehabilitar y realizar pruebas en los pozos M-92 y M-189 para definir la posibilidad de integrarlos al grupo de pozos inyectoros.
- c. Continuar con el programa de inyección en caliente para disminuir y eliminar paulatinamente la que se realiza en frío.

Finalmente, la reinyección en Cerro Prieto debe enfocarse principalmente a la disposición de la salmuera residual para prevenir todo tipo de afectación al medio y evitar además observaciones o requerimientos por parte de las autoridades ambientales. Para esto se recomienda incrementar la eficiencia del sistema de reinyección, adoptando por lo menos algunas de las medidas recomendadas.

Referencias

- Álvarez R., J., 2001. Geological description of cores from the Cerro Prieto geothermal field, Mexico. *Transactions of the Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 25, pp.
- Álvarez R., J., and J. Camacho H., 2003. Lithofacies of the injection zone in the Cerro Prieto geothermal field, Mexico. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 27, pp.

- Aragón A., A., y J. Acosta S., 1987. Resultados de las pruebas de inyección en el pozo M-6 del campo geotérmico de Cerro Prieto. CFE, Reporte interno No. 1387-012, Subgerencia Estudios Geotérmicos. Inédito.
- Contreras L., E., 2003. Determinación de propiedades en núcleos del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Estudio del Instituto de Investigaciones Eléctricas bajo contrato con CFE, No. 800112392. Inédito.
- Contreras L., E., y P. García M., 1999. Determinaciones petrofísicas en muestras de núcleos de pozos del Campo Geotérmico de Cerro Prieto. Estudio del Instituto de Investigaciones Eléctricas bajo contrato con CFE, No. RGCP-CLS-003/99. Inédito.
- Halfman, S.E., M.J. Lippmann, R. Zelwer, and J.H. Howard, 1984. A Geologic interpretation of geothermal fluid movement in Cerro Prieto Field, Baja California, México. *Amer. Assoc. Petrol. Geol. Bull.*, Vol. 68, No. 1.
- Halfman, S.E., A. Mañón, and M.J. Lippmann, 1986. Update of the hydrogeological model of the Cerro Prieto Field based on recent well data. *Transactions of the Geothermal Resources Council*, Vol. 10.
- Lyons, D.J., and P.C. Van de Kamp, 1980. Subsurface geological and geophysical study of the Cerro Prieto geothermal field, Baja California, México. LBL Report 10540, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA. Inédito.
- Ribó M., M., 1987. Informe sobre pruebas de inyección-recuperación efectuadas en el pozo M-6. CFE, Informe interno No. SEG/E/YAC/PIR-02/87, Coordinadora Ejecutiva de Cerro Prieto. Inédito.
- Truesdell, A., M.J. Lippmann, J. De León, and M. Rodríguez, 1999. Cerro Prieto cold water injection: Effects on nearby production wells. LBL Report N-44025, Earth Sciences Division, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, CA. Inédito.