

Resultados de la prueba de neutralización de fluidos ácidos en el pozo H-43, campo geotérmico de Los Humeros, Pue.

Magaly del Carmen Flores Armenta, Miguel Ramírez Montes, Fernando Sandoval Medina y César Rosales López

Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Mich., México.

Correo: magaly.flores@cfe.gob.mx

Resumen

El pozo H-43 fue perforado en el campo de Los Humeros, Pue., en 2007-2008, y al evaluar su producción se encontró que producía fluidos ácidos de alto potencial corrosivo. Se decidió por tanto realizar una prueba para neutralizar la acidez de los fluidos de este pozo, que consistió en agregarle una solución de hidróxido de sodio. Esta es una sustancia básica que neutraliza principalmente los grupos ácidos H⁺, con lo que se buscaba aumentar el pH del fluido lo necesario para reducir al máximo su carácter corrosivo. La inyección del hidróxido de sodio se realizó dentro del pozo a fin de proteger de la corrosión a la tubería de revestimiento de 244.4 mm (9 5/8"), y posteriormente a todos los equipos superficiales. Como resultado de la prueba, se logró aumentar el pH del fluido producido por el pozo de 5.2 a un máximo de 6.8, sin alterar su producción de vapor, demostrándose así que el procedimiento de neutralización es factible. Los costos aproximados de las pruebas de neutralización realizadas, incluyendo equipos del sistema de neutralización propuesto, los gastos del neutralizador (NaOH) y la perforación del pozo son de unos 71.4 millones de pesos. Se estimó una relación beneficio/costo de 1.5 y una recuperación de la inversión, considerando los ingresos por venta de energía a valor presente se obtiene en 5 años.

Palabras clave: Los Humeros, corrosión, fluidos ácidos, neutralización.

Results of test of acid fluids neutralization in the well H-43, Los Humeros geothermal field, Pue.

Abstract

The well H-43 was drilled in Los Humeros Geothermal Field, Pue., in 2007 and 2008. When well production was measured, it was found the well produced acid fluids with high corrosion potential. Then it was decided to try to neutralize the acidity of the H-43 fluids by adding a solution of sodium hydroxide. This is a basic substance used to neutralize mainly the acid groups H⁺, and the goal was to raise the pH of the fluids to minimize its corrosive features. First sodium hydroxide was injected into the well to protect the casing of 244.4 mm (9 5/8") against corrosion and then all the surface installations. It was possible to increase the pH of the well fluid from 5.2 up to 6.8 without altering the steam production, thus demonstrating the neutralization procedure is feasible. The approximate costs of the neutralization tests performed, including equipment for the proposed neutralization system, the neutralizer (NaOH), and drilling the well are about 71.4 million pesos (around 5.5 million USD). We estimate a benefit/cost ratio of 1.5 and a return on investment in five years, considering the income from energy sales at present value.

Keywords: Los Humeros, corrosion, acid fluids, neutralization.

Antecedentes

El pozo H-43 se perforó del 26 de agosto de 2007 al 18 de enero de 2008. Se localiza en la zona norte del campo geotérmico de Los Humeros, Pue., que es uno de los cuatro campos geotérmicos en producción en México. El pozo es de tipo vertical con una profundidad total de 2200 m. Su objetivo estructural fue interceptar la zona de fracturamiento del sistema escalonado de dirección N-S y constituido por las fallas Malpaís, Antigua y La Cuesta, con bloque caído al oriente, así como el colapso de Los Potreros que en esta porción presenta una dirección NE-SW (Rocha *et al.*, 2006). A partir de estudios y pruebas realizadas a este pozo se determinaron dos zonas permeables, una de 1550-1900 m y otra entre 2050-2200 m de profundidad (Sánchez y Torres, 2008).

Durante la perforación del pozo se obtuvieron 206 muestras de las rocas cortadas, mismas que fueron estudiadas al microscopio. Entre otras cosas, se detectó la presencia de biotita y/o de mica blanca potásica (muscovita o pirofilita), lo cual puede indicar la presencia de fluidos ácidos (Rocha y Ramírez, 2008)

El pozo se abrió a producción el 19 de febrero de 2008, mediante una placa de orificio de 2" de diámetro al silenciador, midiéndose 61 t/h (toneladas por hora) de vapor y 4 t/h de agua, a una presión de cabezal de 51.7 bara y un pH de 5.2. En 10 días de producción continua el pH del pozo disminuyó hasta valores de 4.4 y el contenido de hierro disuelto en el agua separada llegó a 22.9 ppm, lo cual se asocia a los efectos de corrosión en las tuberías por fluidos ácidos (CFE, 2010).

Debido a la capacidad de generación eléctrica de este pozo, la cual se estima en 3.8 MW considerando un consumo específico de 13 toneladas por MW, era importante buscar soluciones que permitieran integrarlo al sistema de suministro de vapor para las unidades en operación (Martínez, 2008). Con este objetivo se realizó una prueba para determinar la viabilidad técnica de neutralizar los fluidos ácidos. Esta prueba se realizó del 13 al 16 de julio de 2008 y se corroboró que técnicamente los fluidos ácidos producidos por el pozo H-43 pueden neutralizarse inyectando a profundidad una solución concentrada de NaOH.

Preparativos preliminares

El 28 de febrero de 2008 se cambió el orificio de producción reduciéndose de 50.8 mm (2") de diámetro (\emptyset) a 25.4 mm (1") \emptyset . Con ello se redujo considerablemente el contenido de hierro (disuelto y precipitado) en el fluido producido, sin lograr abatirlo por completo. Por tal motivo, el 29 de febrero se tuvo que purgar por la línea de 50.8 mm (2") \emptyset con un orificio equivalente a 6.35 mm (1/4") \emptyset , y debido a que continuó saliendo una concentración considerable de hierro (disuelto y precipitado) se optó por purgarlo aún más. El 5 de marzo el orificio de producción se redujo a 3.175 mm (1/8") \emptyset , condición en la cual se dejó hasta colocar el equipo inhibidor de corrosión de manera permanente.

La prueba de neutralización de fluidos ácidos incluyó las etapas de desarrollo siguientes.

Etapa 1. Diseño del sistema.

En esta etapa se diseñó el sistema a utilizar para la neutralización de fluidos ácidos y se elaboraron las especificaciones (Cruz y Tovar, 2008; Ramírez y Flores, 2008). Para el diseño del sistema se tuvo el apoyo de personal técnico del ICE (Instituto Costarricense de Energía), y en abril de 2008 personal de la CFE realizó una visita al campo geotérmico de Miravalles, Costa Rica, para conocer el proceso de neutralización de fluidos ácidos que se utiliza en ese campo y estudiar los casos de los pozos H-43 de Los Humeros, y de los pozos 403, 410, 424, 425, 422, 423 y 428D del campo geotérmico de Cerro Prieto, BC (Ramírez y Miranda, 2008).

Etapa 2. Suministro de equipos.

Esta etapa correspondió a la compra de materiales y el suministro de los equipos por parte de los proveedores.

Etapa 3. Instalación de equipos.

Esta etapa consistió en la construcción de una caseta para albergar los tanques para almacenamiento de NaOH y agua, además de las bombas y la instalación de tuberías para la conexión de las bombas a los tanques.

Etapa 4. Pruebas y puesta en servicio del sistema.

Esta etapa consistió en la realización de pruebas para determinar la efectividad de la neutralización y la dosis exacta del producto. Para instalar la cámara dentro del pozo H-43 se contó con el apoyo de personal de la Residencia de Las Tres Vírgenes, BCS, de la CFE, quien facilitó el malacate y un operador. Debido a la complejidad que presenta el pozo por la alta presión (mayor a 50 bar en el cabezal) y alta temperatura (cercana a los 300°C) se tuvieron que realizar tres intentos previos, en fechas diferentes, para inyectar NaOH al pozo.

Los equipos y materiales usados en la prueba fueron los siguientes.

- Tanque de polipropileno reforzado de 5 m³ de capacidad.
- Equipo de bombeo que consta de dos bombas con capacidad máxima de inyección de 52 litros por hora (l/h), con diafragma y amortiguador de pulsaciones.
- Cabeza de inyección de acero inoxidable, la cual permite la inyección desde su parte inferior.
- Tubería capilar (*tubing*) de 6.35 mm (1/4") de diámetro externo y 3.87 mm de diámetro interno de 'incoloy'.
- Hidróxido de sodio al 50% peso/peso, grado industrial.

Desarrollo de la prueba

La prueba se realizó del 13 al 16 de julio de 2009. Antes del inicio de las actividades el pozo se encontraba purgado por línea de 2" Ø y registraba una presión de cabezal de 103.4 barg (1500 psig). Con el pozo cerrado, se bajó la cámara de inyección hasta 1000 m de profundidad y se abrió el pozo. Durante 30 minutos se inyectó agua a razón de 700 ml/min, y posteriormente se bajó la cámara hasta 1350 m de profundidad para reiniciar la inyección de agua con el mismo gasto de 700 ml/min.

Al inicio de la inyección de agua se midió un pH de 5.16 en el fluido extraído. La inyección de agua se mantuvo durante 16 horas y durante este lapso de tiempo se estuvo monitoreando el pH, el gasto de inyección y la presión de inyección, además de tomar muestras para el análisis de Na, Fe, Cl y pH.

El 14 de julio se midió el gasto de vapor del pozo, siendo de 52 t/h a una presión de cabezal de 58.6 barg (850 psig). Este mismo día empezó la inyección de NaOH diluido al 47%, con un gasto promedio de 300 ml/min, el cual no se mantuvo constante, variando entre 260 y 320 ml/min. La presión de inyección del NaOH empezó con una variación entre 137.9 y 165.5 barg (2000 y 2400 psig).

El pH original, antes de empezar la inyección de NaOH, fue de 5.1 a 5.3 y así se mantuvo hasta 150 minutos después de iniciada la inyección, cuando se observó un incremento llegando a ser de entre 5.6 y 5.7. Cinco horas (300 minutos) después del inicio de la inyección de NaOH el pH medido fue de 5.8, alcanzando un valor máximo de 6.8 a los 540 minutos (Fig. 1). De tal manera, el pH del fluido del pozo empezó a subir hasta los 150 minutos de inyección de NaOH, y alcanzó su valor máximo a los 540 minutos (9 horas), con un gasto de inyección promedio de 300 ml/min de hidróxido de sodio al 47%.

A las 9 horas de estar inyectando NaOH la presión de la bomba comenzó a bajar, por lo cual se suspendió la inyección de NaOH y se empezó a inyectar agua para mantener la presión dentro del *tubing* y evitar su posible obstrucción. Al día siguiente se revisó la bomba y se observó que su diafragma y sello se encontraban perforados, por lo que se decidió suspender actividades, sacar el *tubing* a superficie y cerrar el pozo, dando por concluida la prueba el 16 de julio.

Durante toda la prueba, para el control del proceso de neutralización se realizaron mediciones de acidez del agua (pH) cada 30 minutos, y se tomaron muestras de líquido cada hora para determinar Na, Cl, Fe y pH. El gasto de inyección de la solución de NaOH varió entre 260 a 320 ml/min y la presión de inyección máxima fue de 165.7 barg (2400 psig), con el pozo produciendo 52 t/h a una presión en cabezal de 58 barg (850 psig).

Para evitar fallas en el suministro de energía eléctrica, se instaló un generador portátil que sin embargo no fue preciso utilizar.

Resultados e interpretaciones

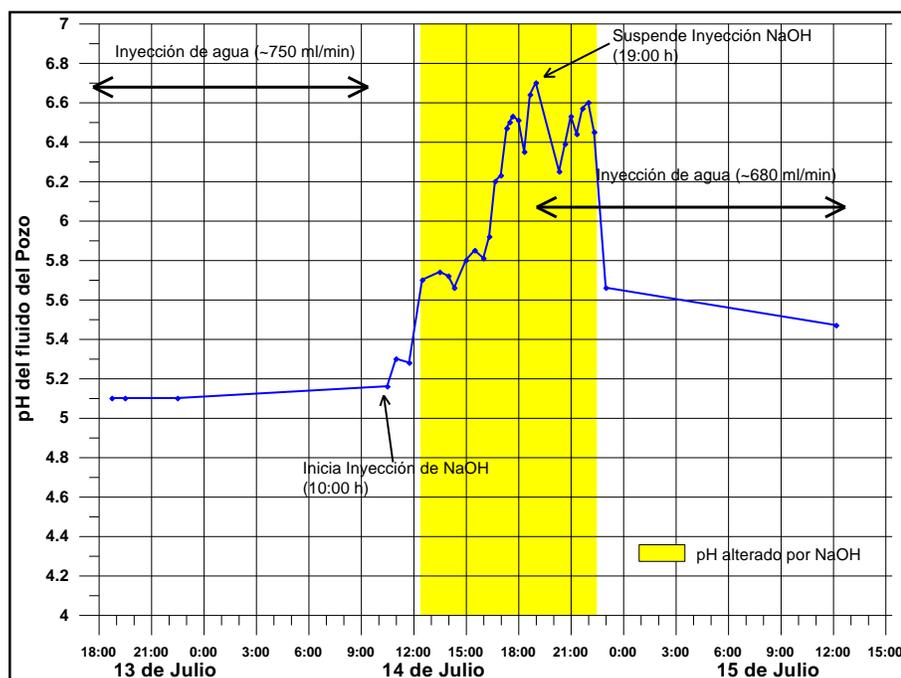


Fig. 1. Comportamiento del pH durante la prueba de neutralización.

una drástica disminución en el contenido de hierro (de 3.2 a 0.4 ppm) debido a la inyección de esta última. Esto confirma que la inyección de hidróxido de sodio reduce la corrosión del acero de las tuberías del pozo.

La Figura 3 muestra la evolución en el contenido de cloruros y sodio en los fluidos del pozo durante la misma prueba. El contenido de cloruros también presenta una fuerte reducción de 55 a 15 ppm, mientras que,

En la Figura 1 se presenta de manera gráfica la variación del pH con respecto al tiempo durante la prueba de inyección de la solución de NaOH, apreciándose que después de estabilizar el gasto de inyección el fluido del pozo se mantuvo durante 5 horas en un pH promedio de 6.5 con valores mínimos de 6.2 y máximos de 6.7. Debido a los problemas mencionados en la bomba de inyección, no fue posible disminuir el gasto de inyección para determinar el control que se podría tener sobre el sistema.

La Figura 2 muestra la variación en el contenido de hierro durante la prueba, tanto durante la inyección de agua como durante la inyección de la solución de NaOH. Se observa

como era de esperar, el contenido de sodio se eleva de un máximo de 10 a un máximo de 78 ppm, volviendo a bajar cuando se suspende la inyección de NaOH.

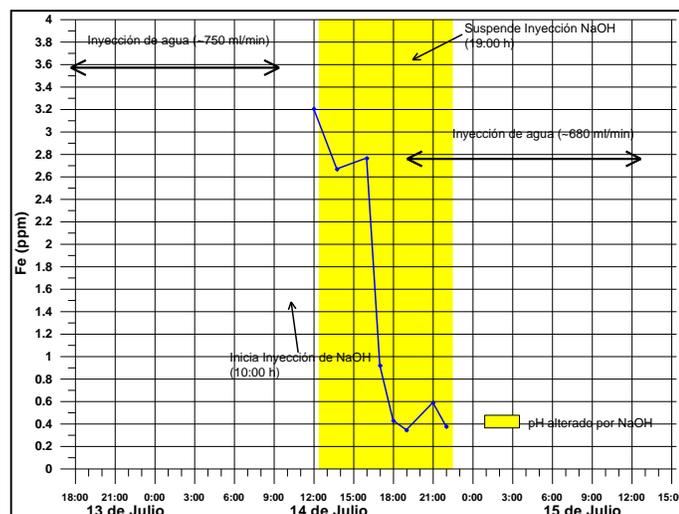


Fig. 2. Comportamiento del Fe durante la prueba de neutralización.

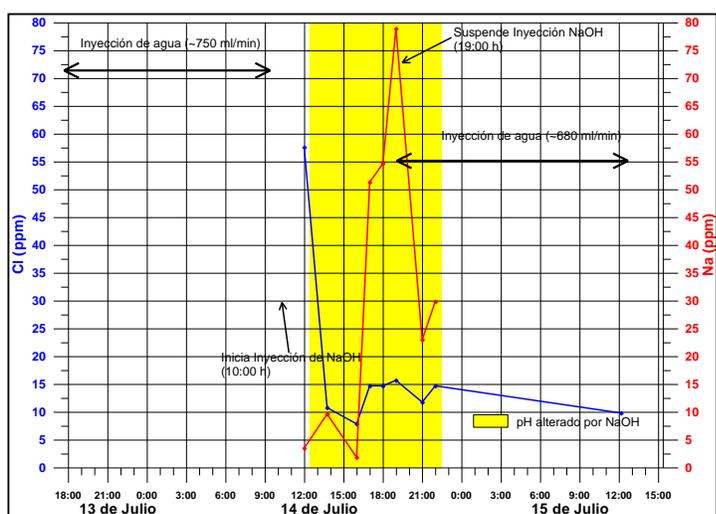


Fig. 3. Comportamiento del Cl y del Na durante la prueba de neutralización.

El pH medido antes y después de la prueba no significa que el aumento de pH se haya debido a un cambio en la composición química del fluido, sino que obedece más bien al periodo de estabilización del fluido del pozo, ya que en ocasiones anteriores después de 48 horas de estar fluyendo el pozo, se registran valores de pH cercanos a 3.7.

Es de recalcar que el proceso de neutralización en este pozo parece ser sumamente sensible. Como se observa en la Figura 4, al suspenderse la inyección de NaOH el pH vuelve a bajar en sólo 4 horas, que es aproximadamente el tiempo que tarda en llegar el agua al punto de inyección a través del *tubing*.

Lo anterior confirma que técnicamente se puede elevar el pH ácido del pozo H-43 al valor necesario para integrarlo a la producción comercial sin riesgos de corrosión, y que además se puede mantener este valor en el tiempo, siempre que se cuente con un adecuado sistema de inyección de neutralizador. De la actual prueba se determinó un gasto máximo de 320 ml/min con una concentración del 47% de NaOH.

Los análisis de contenido de hierro en el fluido producido por el pozo indican que en condiciones de neutralización el contenido de hierro es de aproximadamente 0.35 ppm, mientras que en condiciones de acidez llega hasta 3.2 ppm. Considerando una producción total de 50 t/h, con esta diferencia en el contenido del hierro puede inferirse que si el fluido no es neutralizado se corroerían las tuberías de ademe del pozo a razón de unos 130 kg de hierro diarios, es decir unas cuatro toneladas al mes. Es evidente que las tuberías del pozo quedarían inutilizables en menos de un mes con una producción continua de 50 t/h. Por ello, el sistema de neutralización que se instale finalmente deberá ser continuo y provisto de mecanismos de respaldo para evitar su interrupción.

Relación beneficio/costo

Los costos aproximados directos de la prueba de neutralización incluyendo los equipos del sistema de neutralización propuesto y los gastos del neutralizador (NaOH) fueron de unos 1.4 millones de pesos (108 mil dólares americanos al tipo de cambio de esas fechas). La perforación del pozo, incluyendo tuberías de ademe y cabezal, costó en números redondos 70 millones de pesos (5.43 millones de dólares americanos). Por lo tanto, la inversión del pozo más el sistema de neutralización resultaría en 71.4 millones de pesos, sin

considerar otros costos como instalaciones superficiales (separador, vaporductos, casetas), ni el suministro de energía eléctrica, gastos de personal ni movimiento de equipos (malacate).

La producción de vapor del pozo H-43 es, como se midió en su apertura, de 50 t/h de vapor en números cerrados. En términos energéticos esta producción de vapor equivale a una generación eléctrica de 3.8 MW, considerando un consumo específico promedio de 13 t/h por MW, que es el actual en las unidades a contrapresión que operan en el campo de Los Humeros. Si el costo del MWh generado es de 650 pesos (50.4 dólares americanos) según la metodología de cálculo de proyectos de la Unidad de Inversiones de la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, los ingresos anuales por la energía eléctrica producida por este pozo serían de 21.6 millones de pesos.

Para el cálculo del valor presente neto se consideró una tasa de descuento del 12%, y se tomó en cuenta el consumo anual de NaOH, considerado como mantenimiento al pozo. El ingreso a valor presente por venta de energía durante diez años es de unos 109.8 millones de pesos. Por lo tanto, la relación beneficio-costos resulta ser de 1.5, recuperándose la inversión inicial de 71.4 millones de pesos en poco menos de cinco años.

Conclusiones

La inyección en el pozo H-43 de 320 ml/min de NaOH, en promedio, permitió que el pH del fluido producido por este se incrementara de 5.3 a 6.8, y que la concentración de Fe en el mismo fluido se redujera de 3.2 ppm a 0.35 ppm. Por lo tanto, la prueba de neutralización permite concluir que técnicamente este pozo puede integrarse a la producción comercial mediante un sistema continuo de neutralización, sin riesgo de corrosión para las tuberías de ademe ni para los equipos superficiales.

La inversión realizada en este pozo, incluyendo su costo de perforación, de la prueba y del sistema propuesto, es de unos 71.4 millones de pesos. Pero los ingresos por la venta de la energía eléctrica que se podría generar con el vapor producido por el pozo son de unos 20.8 millones de pesos anuales, que a valor presente neto durante diez años suman 109.8 millones de pesos. Por tanto, se obtiene una relación beneficio-costos de 1.5 y se recupera la inversión total en cinco años.

Agradecimientos

Un reconocimiento al personal de la Residencia de Los Humeros, Pue., a las áreas de geoquímica, yacimientos, mediciones y suministro de vapor, por su participación entusiasta en el desarrollo y seguimiento de las actividades.

Referencias

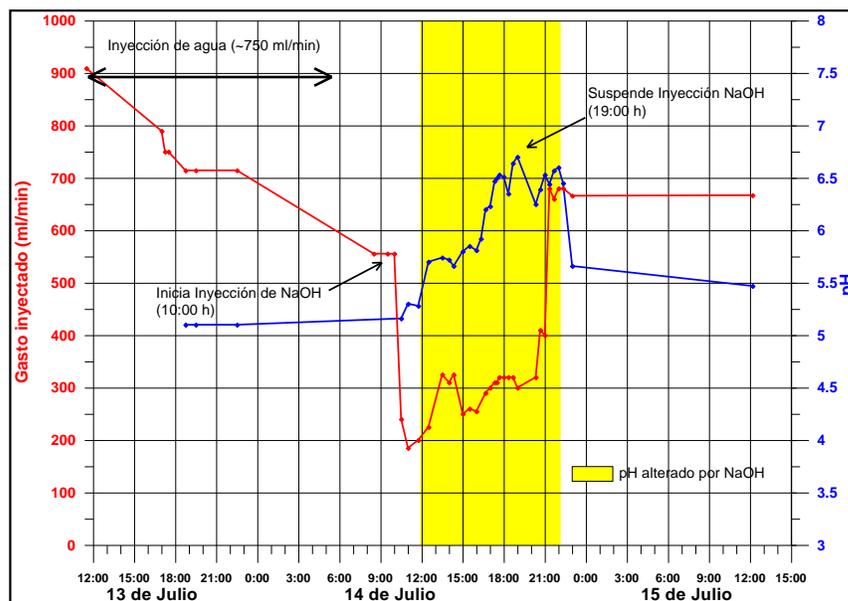


Fig. 4. Volumen inyectado al pozo (curva roja) y variación del pH del fluido producido (curva azul).

- CFE, 2010. Base de datos GDManager del Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. Inédito.
- Cruz, I. y R. Tovar, 2008. Evaluación preliminar de la cantidad de inhibidor de corrosión para la neutralización del fluido del H-43. CFE, Informe interno S/N de la Residencia de Los Humeros. Inédito.
- Martínez, M., 2008. Análisis de Declinación de Producción de los Pozos. CFE, Residencia de Los Humeros, Informe O-2159-019-R-03. Inédito.
- Ramírez, M. y M. Flores, 2008. Sistema de neutralización de ácidos para el campo geotérmico Los Humeros, Pue. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Informe DINYAC-006-2008. Inédito.
- Ramírez, M. y C. Miranda, 2008. Reporte de la visita al Campo Geotérmico de Miravalles en Costa Rica. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Informe DINYAC-014-2008. Inédito.
- Rocha, V.S., E. Jiménez y J. Arredondo, 2006. Propuesta para pozos de respaldo en el C.G. Los Humeros: H-41, H-42 y H-43. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Informe OGL-HM-01/06. Inédito.
- Rocha, V.S. y G. Ramírez, 2008. Informe de los resultados de la perforación del pozo H-43, Los Humeros Puebla. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Informe GG-HM-01-08. Inédito.
- Sánchez, M. y M.A. Torres, 2008. Análisis y diagnóstico de las pruebas durante la perforación del Pozo H-43 del Campo Geotérmico Los Humeros, Pue. CFE, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Informe DINYAC-037-2008. Inédito.