

## **Proyecto para recarga dentro de la zona productora sur del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.**

**Elvia Nohemí Medina Barajas, Emigdio Casimiro Espinoza y Héctor Pérez Esquivias**

Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Los Azufres, Residencia de Estudios, Agua Fría, Mich. Correo: [elvia.medina@cfe.gob.mx](mailto:elvia.medina@cfe.gob.mx)

### **RESUMEN**

Para que la energía geotérmica sea efectivamente un recurso renovable es indispensable mejorar la recarga del yacimiento mediante la reinyección de los fluidos extraídos. En el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., la reinyección se llevó a cabo con el objetivo inicial de disponer, en la periferia del yacimiento, la salmuera extraída en superficie evitando cualquier contaminación y sin afectar térmicamente a la zona productora. Sin embargo, en un yacimiento con más de 30 años de explotación y operación comercial continua, se hace indispensable recargar sitios estratégicos para fortalecer la zona productora. Los Azufres, considerado como un yacimiento de líquido dominante, se divide geográficamente en las zonas norte y sur, en las que se han identificado a profundidad tres zonas termodinámicas: la zona más profunda de líquido comprimido, una zona intermedia bifásica y una zona conocida como casquete de vapor en la parte más somera. En la zona sur se localizan los pozos más someros del campo los cuales producían inicialmente una mezcla de agua-vapor, la cual gradualmente ha ido disminuyendo principalmente en su fase líquida, con respecto a su producción y condiciones originales. De acuerdo con estudios de trazadores, se sabe que la inyección en esta zona solamente recarga al 20% de los pozos productores ahí localizados. Por lo tanto, con el doble objetivo de que la reinyección de fluidos no sea solamente un medio para su disposición segura, sino que además recargue los sitios donde actualmente se requiere, se presenta este proyecto de recarga que involucra la ejecución de acciones técnico-operativas, cuyo principal objetivo es alargar la vida útil del yacimiento en la zona productora sur del campo de Los Azufres, contribuyendo así a su manejo sustentable.

*Palabras clave:* Producción, inyección, recarga, ingeniería de yacimientos, sustentabilidad.

### **1. INTRODUCCIÓN**

En la zona productora sur del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., se encuentran localizados los pozos más someros, siendo actualmente un total de 26 pozos productores. De ellos, 16 producen mezcla agua-vapor y 10 producen una sola fase (vapor). Se cuenta con dos pozos inyectores operando en la periferia de la zona productora. Se ha determinado que el agua reinyectada en ellos únicamente tiene influencia en el 20% de los pozos productores localizados aquí. El 40% de los 10 pozos que producen una sola fase, inicialmente producían agua pero actualmente ya no lo hacen, mientras que el 37% de los 16 pozos que producen mezcla han disminuido su producción de agua. Es decir, ha ocurrido una reducción sustancial en la producción de líquido en todos los pozos productores de la zona sur, por lo que se propone este proyecto de recarga, que incluye las características principales de los pozos-proyecto, las profundidades de las zonas permeables de los pozos aledaños a los pozos-proyecto, las correlaciones encontradas entre ellos, las necesidades y requerimientos para probar los pozos-proyecto como inyectores, además de las expectativas en cada sitio propuesto para inyección.

### **2. LOCALIZACIÓN DE POZOS PROPUESTOS PARA INYECCIÓN**

En la Figura 1 se muestra un mapa con la localización de los tres pozos-proyecto propuestos para

recarga, y las profundidades correspondientes al nivel del terreno de cada uno se presentan en la Tabla 1. Como se observa, se trata de tres pozos ya existentes en la zona sur del campo.

*Tabla 1.- Pozos-proyecto para usarse como inyectores.*

Pozo	Profundidad (m)	Año de Construcción
<b>Az-47</b>	2964	1985
<b>Az-31D</b>	1300	1995
<b>Az-81</b>	1560	2015



*Figura 1. Localización de pozos-proyecto de inyección.*

Los pozos Az-47 y Az-31D se seleccionaron debido a que no presentaron condiciones favorables para producción desde su construcción, por lo que actualmente se encuentran fuera del sistema. Pese a ello han servido para realizar pruebas tanto de monitoreo de la presión del yacimiento como de inyección, respectivamente, y con el paso del tiempo han sufrido algún daño en el interior de las tuberías lo que ha impedido su desempeño y utilización. Por su parte, el pozo Az-81 es de construcción más reciente y fue perforado con el objetivo de ser pozo inyector, por lo que en este caso las tuberías se encuentran en perfectas condiciones.

### **3. CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DE LOS POZOS PROPUESTOS**

Para definir la viabilidad de usar los pozos propuestos para recarga, a continuación se describen sus características mecánicas actuales, los sucesos relevantes en su historial de producción, las principales zonas permeables y sus condiciones termodinámicas actuales.

#### **3.1. Pozo Az-47**

Este pozo fue perforado verticalmente del 3 de marzo al 20 de septiembre de 1985 a una profundidad total de 2964 m, siendo el más profundo de la zona sur. En su momento fue perforado con el objetivo

de actuar como pozo exploratorio de gradiente. En la Figura 2 se presenta el croquis de terminación.

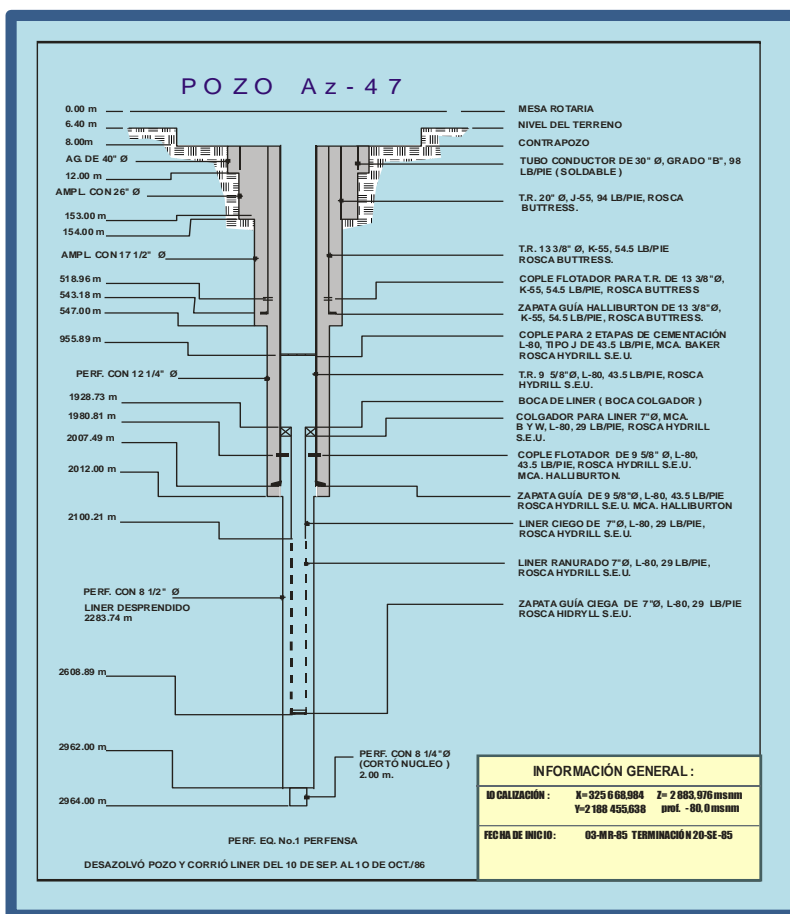


Figura 2. Croquis de terminación del pozo Az-47.

Las pérdidas de circulación durante su construcción se muestran en la Figura 3 donde se puede ver que los intervalos más permeables se encontraron en las profundidades de 670, 880, 975, 1075, 1325, 1455 y de 1600 a 1620 m de profundidad. De ahí en adelante las pérdidas fueron mínimas, es decir menores a 5 m³/h.

Después de su terminación, se realizaron pruebas de permeabilidad e intentos de inducción sin obtener éxito en su arranque. La producción y presión de cabezal se abatía hasta 1.4 kg/cm² por lo que se quedó purgado por línea de 1/4" de diámetro de 1986 a 1993. Debido a que este pozo carecía de condiciones favorables para su integración al sistema de generación, se determinó utilizarlo para monitoreo de presión de fondo, lo cual se realizó de 1994 a 1996.

De 1996 a 2005 continuó purgado por tubería de 1/4" y en el año 2000 se intentó evaluar su producción debido a que se observó aumento en la presión de cabezal hasta 53 kg/cm². La producción se midió por orificios de 2" y 3" de diámetro obteniéndose una producción puntual de 18 t/h de vapor con 9.29 kg/cm² de presión de cabezal. Sin embargo, la producción y la presión se abatían de manera gradual.

Durante el periodo de evaluación, en mayo de 2000 se perfiló el pozo, encontrándose una posible rotura en la TR de 9 5/8" de diámetro, de acuerdo al perfil que se muestra en la Figura 4.

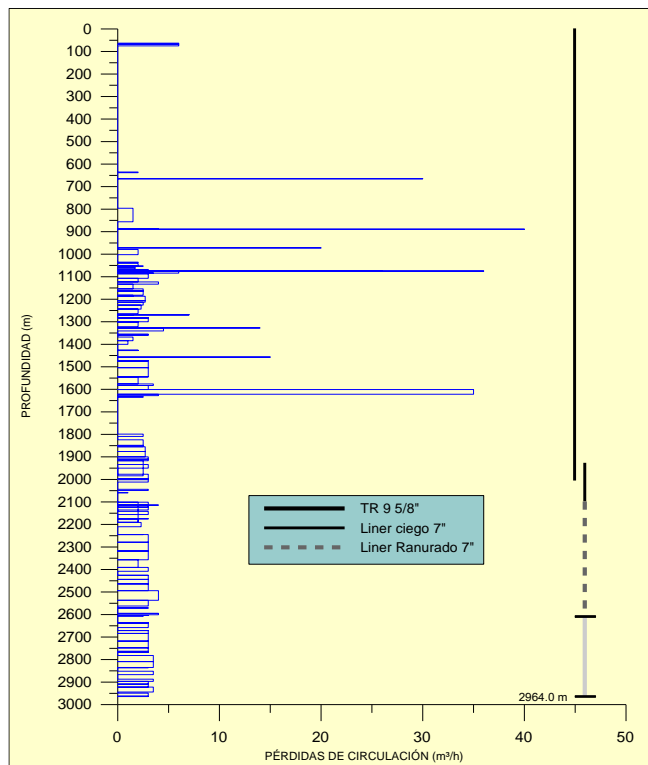


Figura 3. Pérdidas de circulación en el pozo Az-47.

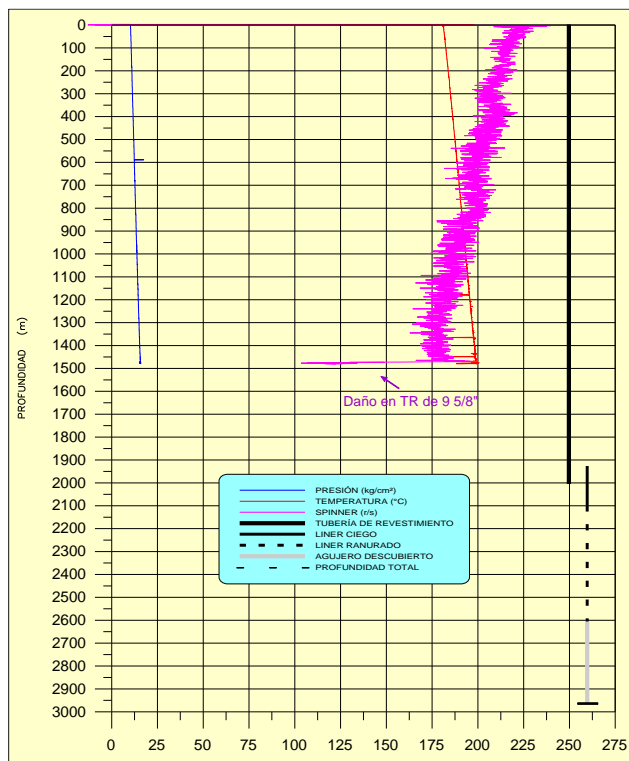


Figura 4. Perfilado del pozo Az-47

De 2005 a 2007 se volvió a monitorear la presión de fondo y durante la maniobra realizada para retirar la cámara e ir recuperando el tubing en superficie, este se reventó. Quedaron en el interior del pozo 500 m de tubing y la cámara. Desde entonces ha permanecido purgado por 1/4", condición que mantiene hasta la fecha.

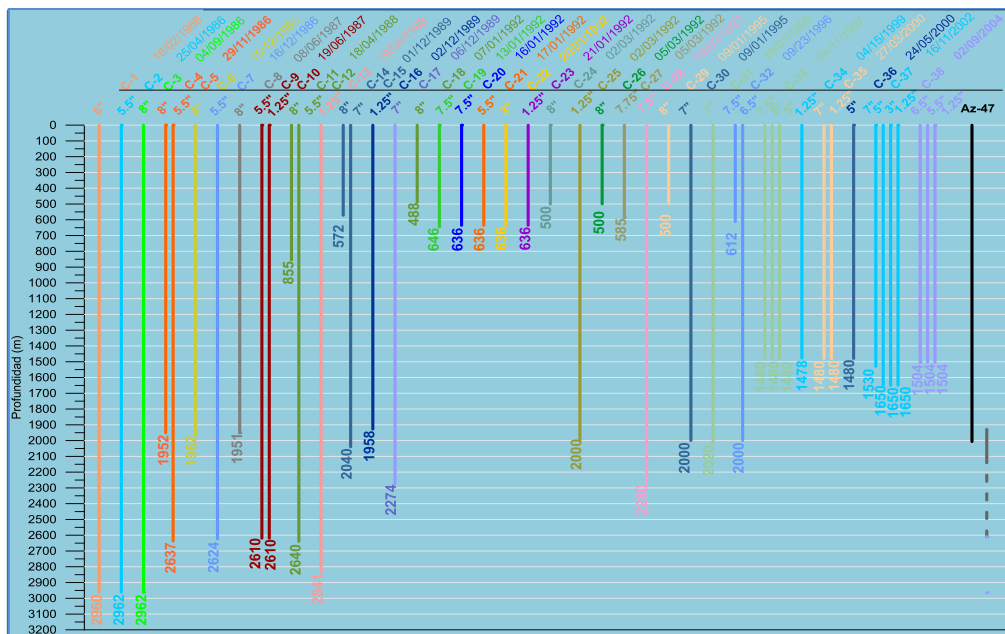


Figura 5. Historial de calibraciones del pozo Az-47.

La Figura 5 muestra el historial de las calibraciones realizadas al pozo Az-47, con el objetivo de dar seguimiento al estado mecánico de las tuberías. Se puede ver que de 1988 a 1995 se realizaron varias calibraciones y en todas se detectó una resistencia entre 488 y 636 m de profundidad (dentro de la TR de 9 5/8" de diámetro), bajando globos de 8", 7 3/4" y 7 1/2" de diámetro sin poder bajar a mayor profundidad. Después de bajar herramientas con diferentes diámetros se logró vencer esa resistencia y, aunque se sigue detectando resistencia con diámetros mayores, es posible bajar con globo de 7" y diámetros menores hasta 1530 m de profundidad, de acuerdo con la calibración de 2002. La calibración más reciente, realizada en 2004, indicó que es posible bajar hasta 1504 m de profundidad con diámetros menores.

Como se mencionó, en el año 2000 se hizo el perfilado del pozo que indicó una entrada de fluido a 1480 m de profundidad, la cual está sustentada por las pérdidas de circulación encontradas a esa profundidad. Como las calibraciones posteriores a este registro pudieron bajar hasta 1530 m y 1504 m de profundidad, se cree que la tubería del pozo posiblemente se encuentra desacoplada.

### 3.2. Pozo Az-31D

Este pozo fue perforado verticalmente del 2 de febrero al 5 de mayo de 1982 a una profundidad total de 1300 m; después, del 24 de enero al 18 de febrero de 1995 fue intervenido por sidetrack de 817.26 m hasta 1300 m de profundidad. En la Figura 6 se muestra el croquis de terminación.

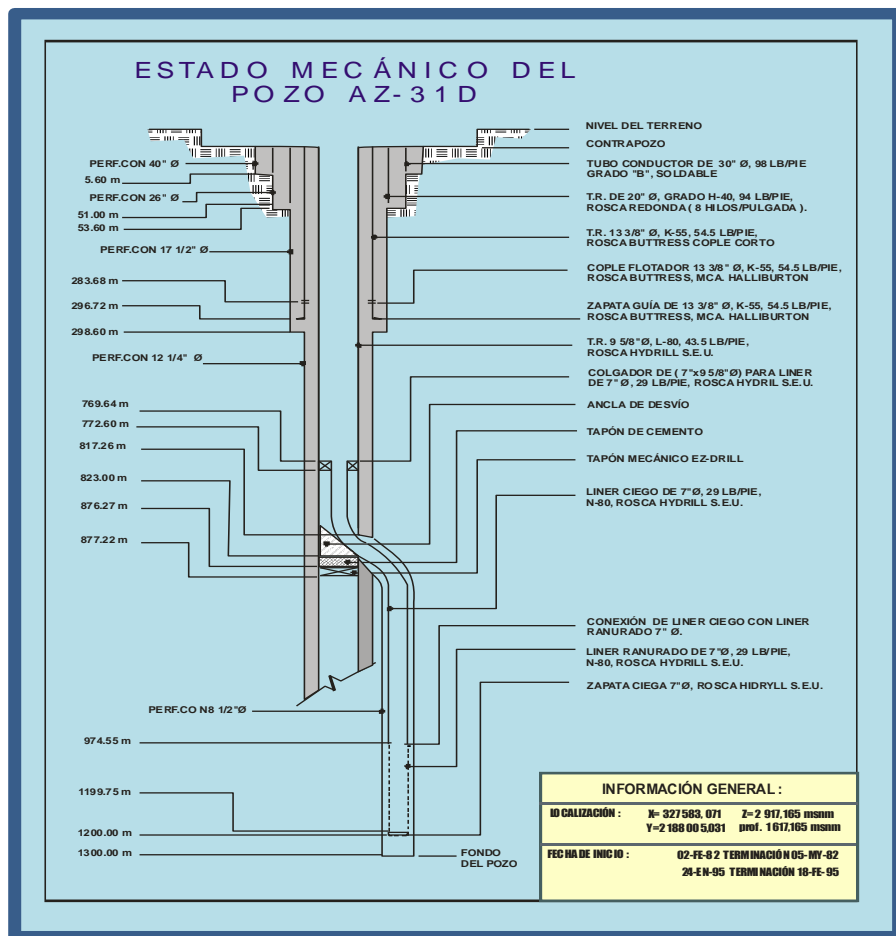


Figura 6. Croquis de terminación del pozo Az-31D.



En la Figura 7 se muestran las pérdidas de circulación encontradas durante su construcción, pudiéndose observar un intervalo permeable de 1005 a 1045 m de profundidad, mientras que la principal zona permeable se encontró a 1140 m de profundidad.

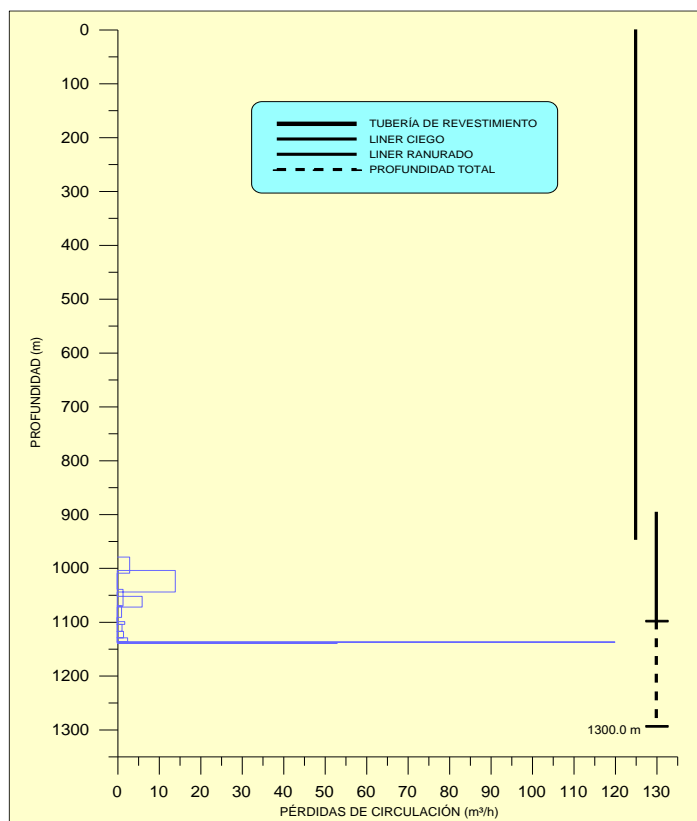


Figura 7. Pérdidas de circulación durante la perforación del pozo Az-31D.

Desde su terminación, el pozo se purgó por línea de 1/4" de diámetro y se observó una buena presión de cabezal de hasta 57 kg/cm² entre 1982 y 1985, tiempo en que se puso a fluir. Sin embargo, la presión de cabezal (Pc) se abatía, por lo que en 1985 se probó como inyector aceptando agua del pozo Az-18 durante 15 días. Posteriormente se volvió a purgar por tubería de 1/4" entre 1985 y 1987. De 1987 a 1994 funcionó como pozo inyector y estuvo aceptando entre 60 y 90 t/h de agua producida por los pozos Az-18, Az-26 y drenes de la U-6. Tiempo después se intentó hacerlo fluir nuevamente sin éxito y en 1995 se determinó repararlo por *sidetrack*, quedando la configuración de sus tuberías como se indica en la Figura 6. Posteriormente a su reparación, el pozo quedó purgado por 1/4" y se intentó hacerlo fluir, sin éxito, en repetidas ocasiones de 1995 a 1998. Continuó purgado de 1998 a 2006 y en 2007 se evaluó de nuevo obteniéndose una producción de 6 t/h de vapor con Pc de 13 kg/cm² manteniéndose fluyendo hacia el silenciador. En 2012 se evaluó otra vez, aumentando su producción a 12 t/h con una Pc de 14 kg/cm² por orificio de 1 3/4" al silenciador, y hasta la fecha se mantiene en estas condiciones.

En la Figura 8 se presenta gráficamente el historial de calibraciones realizadas al pozo Az-31D, después de su intervención de 1995, con el objetivo de dar seguimiento al estado mecánico de sus tuberías. Se puede ver que en la calibración realizada en 1996 no fue posible bajar hasta el fondo del pozo, debido a que durante una maniobra de toma de muestra de fondo se tuvieron problemas en la recuperación, quedándose un pescado en el fondo. Las calibraciones siguientes detectan resistencia a diferentes profundidades, por lo que se cree que esas resistencias han sido ocasionadas por el

pescado del fondo. Se han realizado seis calibraciones de 1996 al 2012 encontrándose en todas ellas obstrucción, y en el último dato se detecta obstrucción a 937 m de profundidad con barra de 1 1/4" de diámetro.

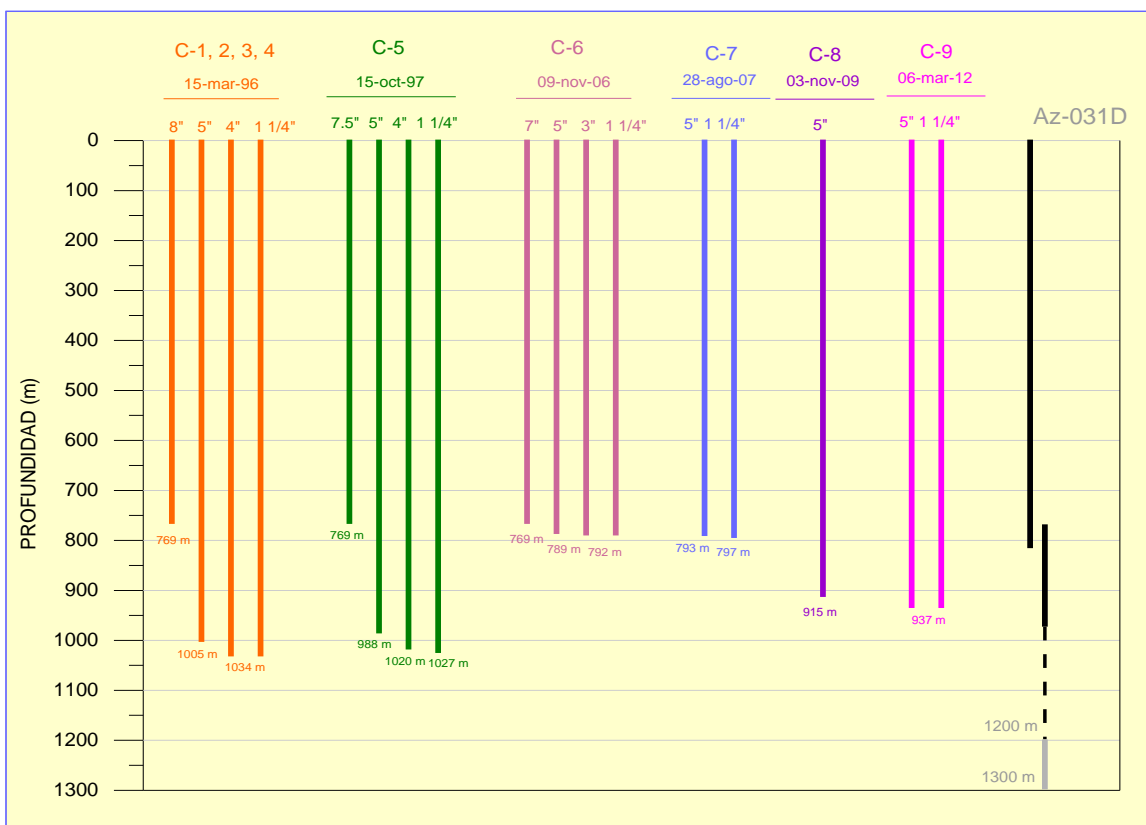


Figura 8. Historial de calibraciones en el pozo Az-31D.

### 3.3. Pozo Az-81

Es un pozo desviado construido en dos etapas, entre el 4 de enero y el 11 de marzo de 2015 y después del 22 de junio al 13 de julio de 2015. El objetivo inicial del pozo era ser un pozo inyector. Sin embargo, por tratarse de una zona nueva tuvo también objetivos exploratorios y finalmente se intentó que fuera pozo productor. En la Figura 9 se muestra el croquis de terminación.

Las pérdidas de circulación encontradas durante su construcción se muestran en la Figura 10. Este pozo se perforó con dos técnicas de perforación: la primera etapa con la técnica convencional utilizando lodo de perforación, y en ella se encontró un intervalo permeable de 401 a 590 m que no tuvo interés geotérmico y se obturó con cemento. La segunda etapa se perforó con la técnica conocida en español como perforación bajo balance (UBD, o *underbalanced drilling*), con la cual no es posible cuantificar pérdidas de circulación, dado que la presión del fluido de perforación se mantiene menor o igual a la presión del yacimiento para evitar un posible daño a la formación. Sin embargo, eso no quiere decir que no se hayan encontrado zonas permeables en el pozo. La Figura 11 muestra los resultados de la última serie de registros de presión y temperatura (PT), donde se pueden ver zonas convectivas, indicativas de aporte de fluidos al pozo a mayor profundidad y en el intervalo donde no se pudieron cuantificar las pérdidas de circulación durante su perforación.

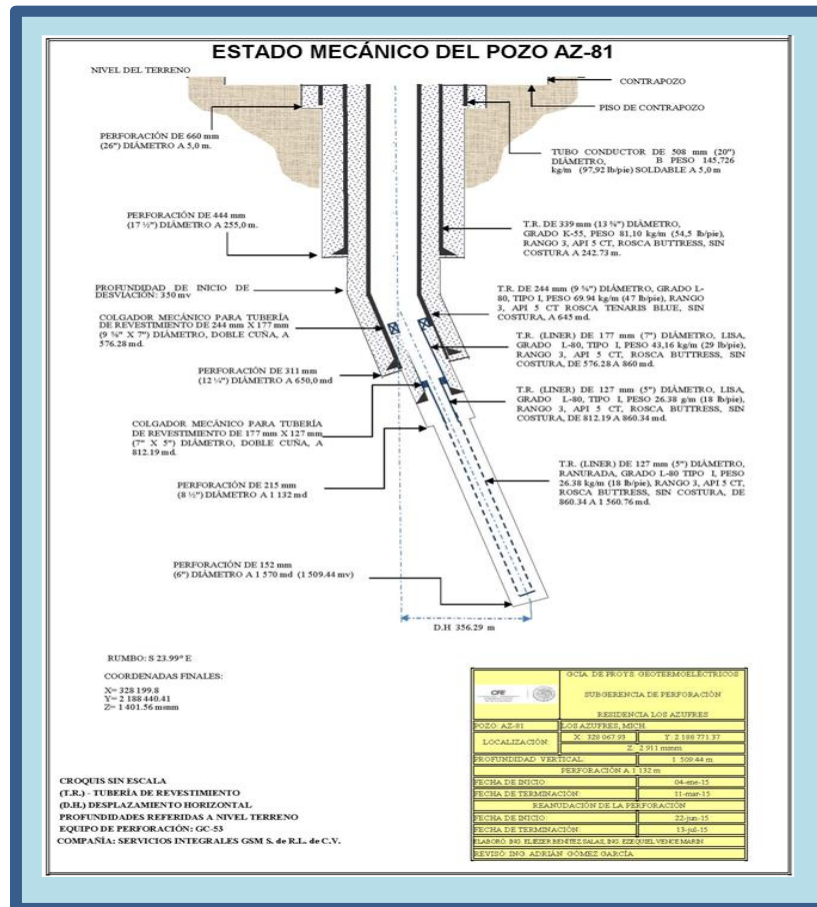


Figura 9. Croquis de terminación del pozo Az-81.

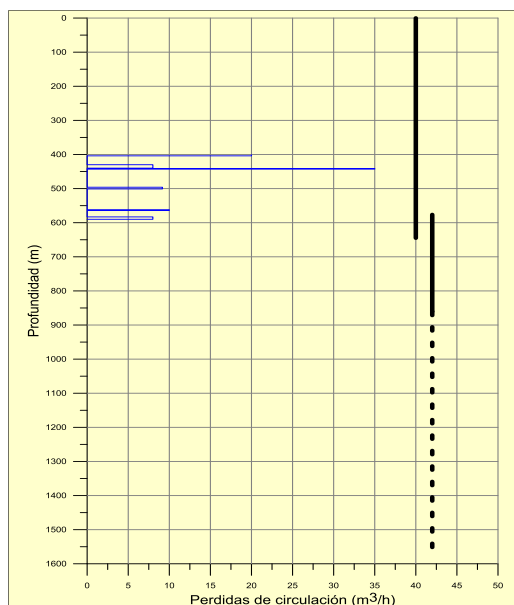


Figura 10. Pérdidas de circulación.

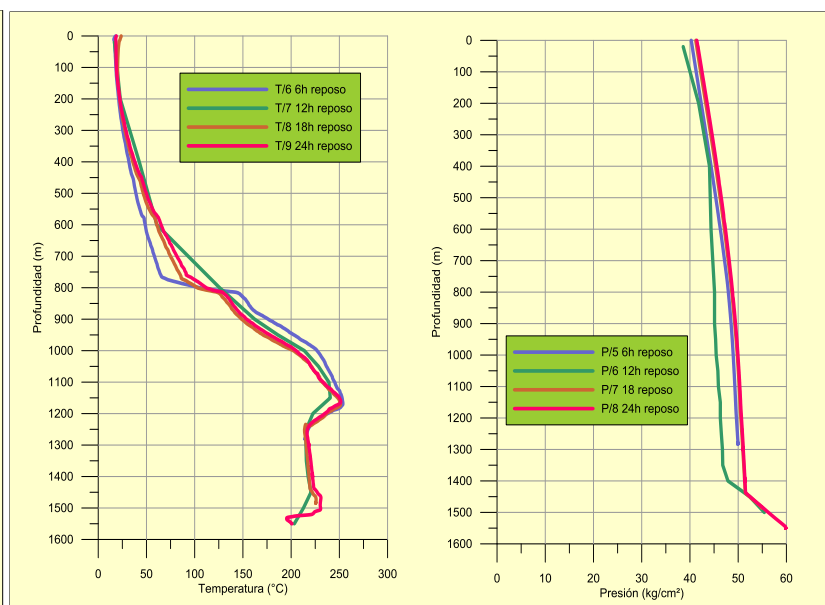


Figura 11. Segunda Serie Registros PT en el pozo Az-81.

Desde su terminación el pozo quedó cerrado y en noviembre de 2015 se purgó por línea de 1/2" de



diámetro midiendo una  $P_c$  de 43.28 kg/cm<sup>2</sup>. Sin embargo la presión cabeceaba por lo que se decidió instalar dos purgas de ½", midiéndose una  $P_c$  de 26.46 a 29.36 kg/cm<sup>2</sup> cabeceando hasta su apertura. El 28 de junio de 2016 se realizó su apertura y se realizó su evaluación inmediata con el fin de definirlo como productor o como inyector. La evaluación se hizo con orificios de 3", 2.5" y 2" de diámetro hacia el silenciador. Los resultados se muestran en la Figura 12, pudiéndose ver que el pozo una producción máxima de 25 t/h de vapor y 75 t/h de agua, con una  $P_c$  de 14 barg, y puede ser integrado al sistema de generación actual.

El historial de calibraciones del pozo Az-81 se muestra en la Figura 13, en la que se observa que se el estado mecánico de sus tuberías sólo se ha verificado en una ocasión, pero siendo un pozo nuevo, se encuentra totalmente libre de obstrucciones hasta el fondo.

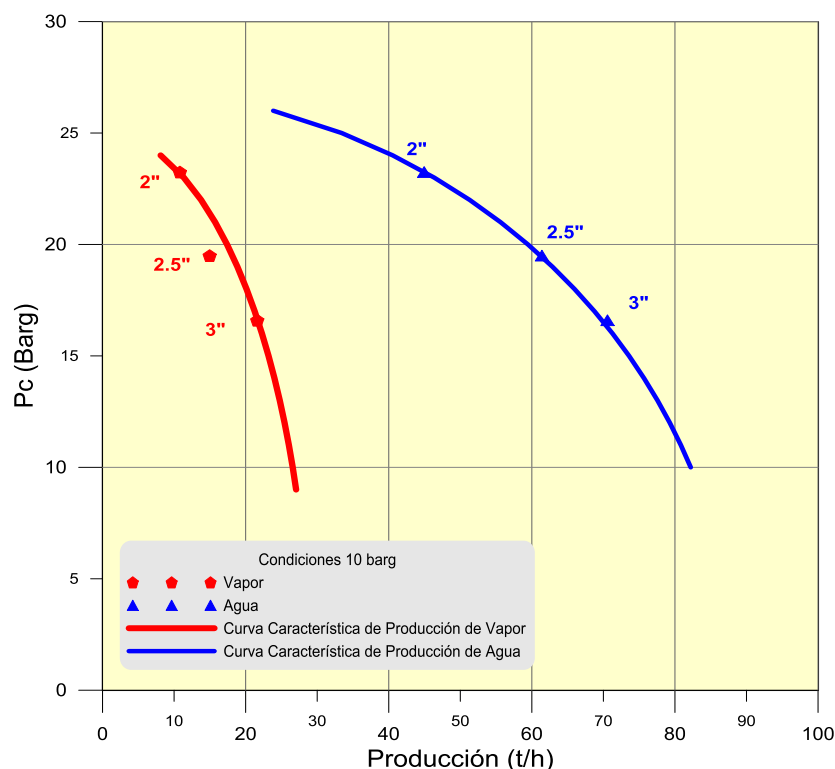


Figura 12. Curva característica del pozo Az-81.

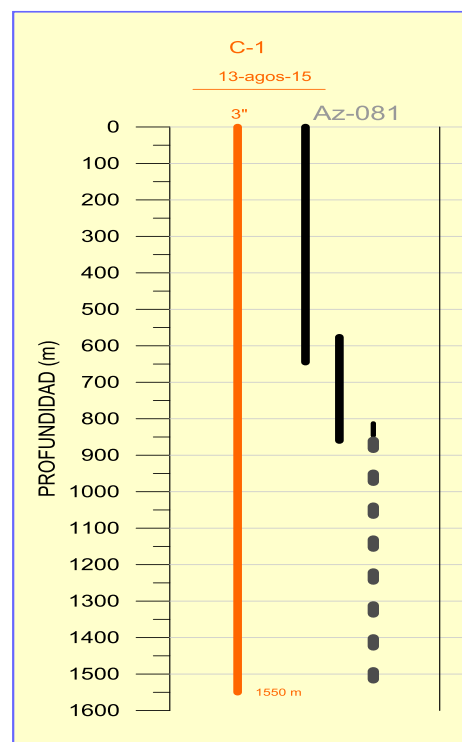


Figura 13. Historial de calibraciones.

## 4. ANÁLISIS DE ZONAS PERMEABLES A INFLUIR Y EXPECTATIVAS

En este inciso se muestra un mapa de localización de los pozos-proyecto para prueba de inyección, los pozos aledaños al pozo-proyecto y una correlación de zonas permeables de los pozos en los que se espera influir por la recarga.

### 4.1. Pozo Az-47

La Figura 14 muestra el mapa de localización de los pozos aledaños al Az-47. La reinyección de agua se realizó inicialmente mediante los pozos Az-08 y Az-07A, en la periferia de la zona productora. Por estudios de trazadores se sabe que el agua reinyectada llegó principalmente a los pozos Az-2A, Az-46 y Az-33, que son pozos productores de mezcla. Los pozos Az-37, Az-38 y Az-17 son pozos menos

profundos, que producen de la zona denominada casquete de vapor, por lo que producen una sola fase. Sin embargo, el pozo Az-36, que es más profundo, llegó a producir 40 t/h de agua en el año 1990 y actualmente produce 0 t/h de agua, por lo que su producción de fase líquida ha declinado por completo en 27 años de producción. Por lo tanto, se considera indispensable inyectar en esa zona, lo que se espera hacer al menos en parte con el pozo Az-47 que se propone utilizar ahora para recargar en la dirección que indica la flecha naranja de la Figura 14.

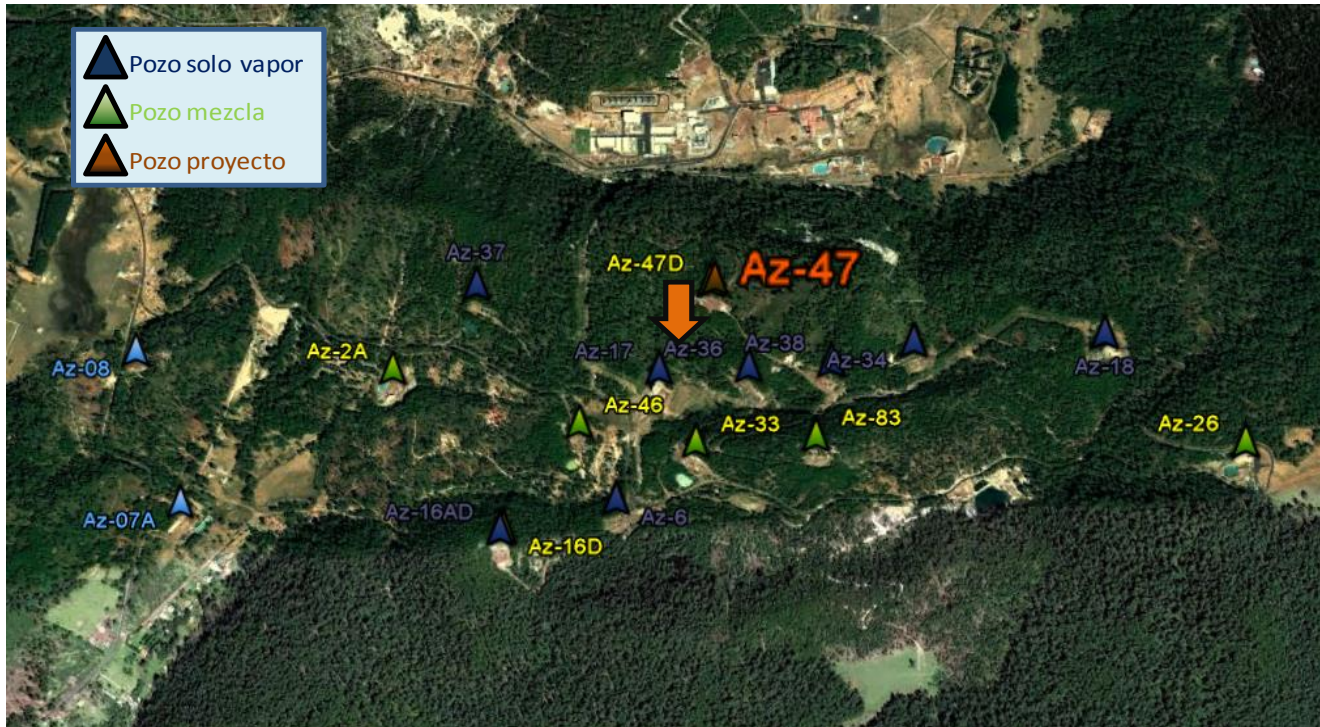


Figura 14. Localización de pozos aledaños al pozo-proyecto Az-47.

En la Figura 15 se muestra una correlación de las zonas permeables de los pozos aledaños al pozo-proyecto Az-47.

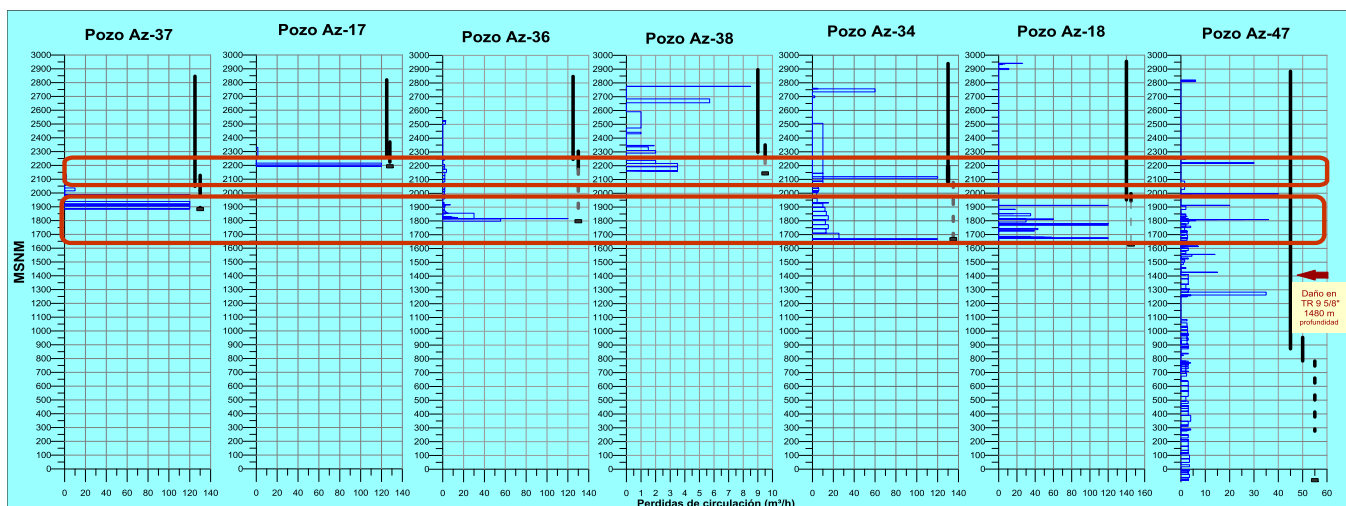


Figura 15. Correlación de zonas permeables de pozos aledaños al pozo Az-47.



Pueden verse dos correlaciones en la Figura 15: una en el intervalo de los 2220 a 2100 msnm (680 a 800 m de profundidad) entre los pozos Az-17, Az-38, Az-34 y Az-47, y otra en el intervalo de los 1950 a 1700 msnm (950 a 1200 m de profundidad) entre los pozos Az-37, Az-36, Az-34, Az-18 y Az-47. Aprovechando el daño en la TR de 9 5/8" a 1403 msnm (1480 m de profundidad) encontrado en el pozo-proyecto de inyección Az-47, se plantea inyectar justamente a esa profundidad y se tendría un intervalo de 250 m de espesor de margen para no afectar térmicamente las zonas productoras de estos pozos analizados.

#### 4.2. Pozo Az-31D

La Figura 16 muestra el mapa de localización de los pozos aledaños al pozo Az-31D, que es otro de los pozos-proyecto, donde se puede observar que se ubica más al oriente de la zona sur. El pozo más cercano es el Az-26, que es productor de mezcla con producción de 175 t/h de agua en 1986. Actualmente este pozo produce solamente 5 t/h de agua, por lo que ha sufrido una declinación del 97% en su producción de agua. Otro pozo cercano es el Az-18, que era inicialmente productor de mezcla, con una producción de agua de hasta 75 t/h en 1986. Actualmente produce 0 t/h de agua, por lo que su producción de agua ha declinado por completo en los 30 años en que ha estado produciendo. Por ello también se considera indispensable la inyección en esa zona, lo que se espera hacer con el pozo Az-31D, cuya agua recargaría al yacimiento en la dirección que indica la flecha naranja en la Figura 16.

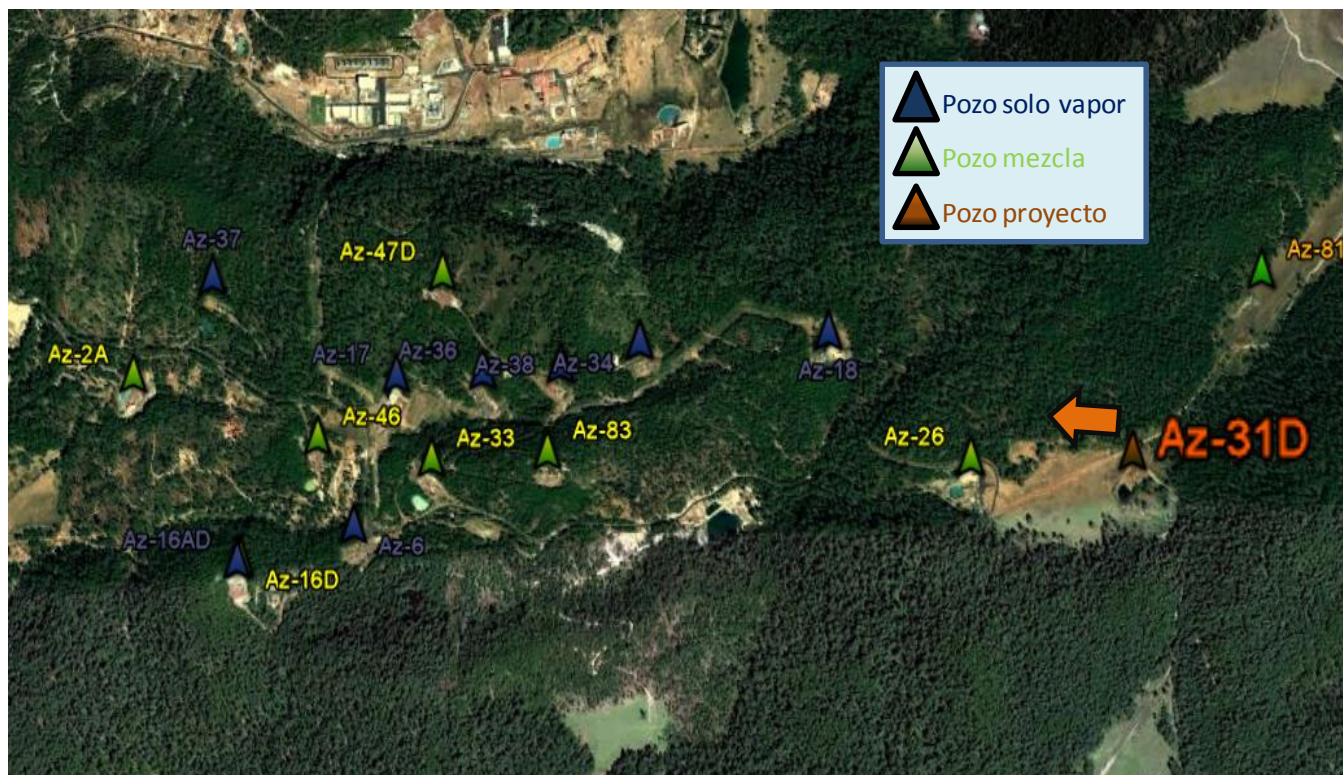


Figura 16. Localización de pozos aledaños al pozo Az-31D.

La Figura 17 presenta una correlación de zonas permeables de los pozos aledaños al pozo-proyecto Az-31D. Se pueden ver dos, una en el intervalo de los 2250 a 2100 msnm (650 a 800 m de profundidad) entre los pozos Az-02, Az-16AD, Az-46, Az-33, Az-83, Az-18 y Az-26, y otra en el intervalo de los 1800 a 1600 msnm (1100 a 1300 m de profundidad) entre los pozos Az-02, Az-16D,

Az-33, Az-83, Az-26 y Az-31.

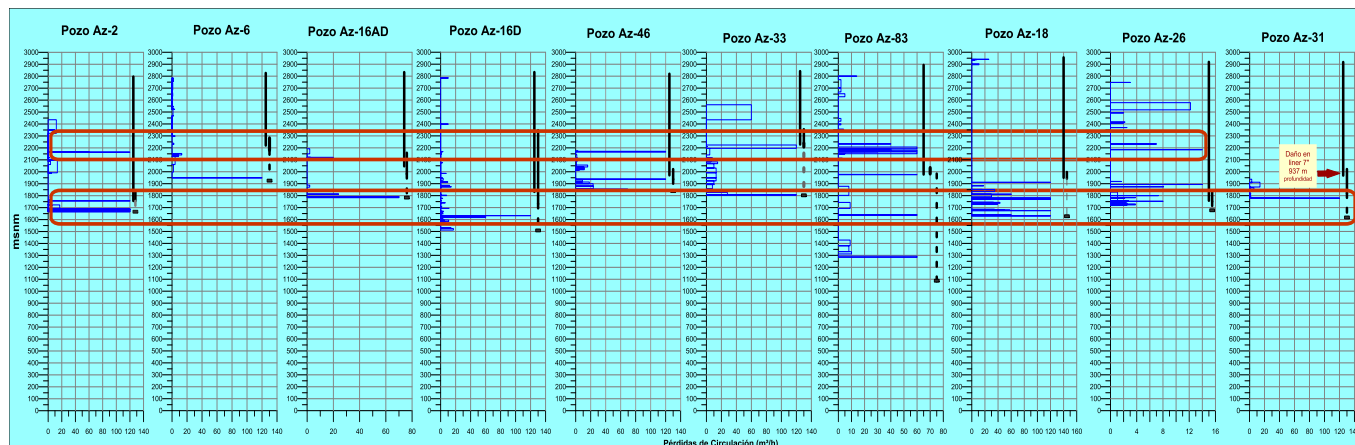


Figura 17. Correlación de zonas permeables de pozos aledaños al pozo Az-31D.

En este caso, se propone reparar el pozo Az-31D e inyectar en su zona permeable. Aunque se encuentra en el mismo intervalo productor que los pozos analizados, se tendría una distancia de al menos 450 m entre las zonas productoras del pozo más cercano (Az-26) y el pozo-proyecto de recarga Az-31D, por lo que se espera que no habría afectación térmica a las zonas productoras de los pozos cercanos. Por otro lado, existe el antecedente de que el pozo Az-31D ya había operado como pozo inyector durante seis años en el pasado, sin haber registros de afectación térmica a los pozos periféricos.

#### 4.3. Pozo Az-81

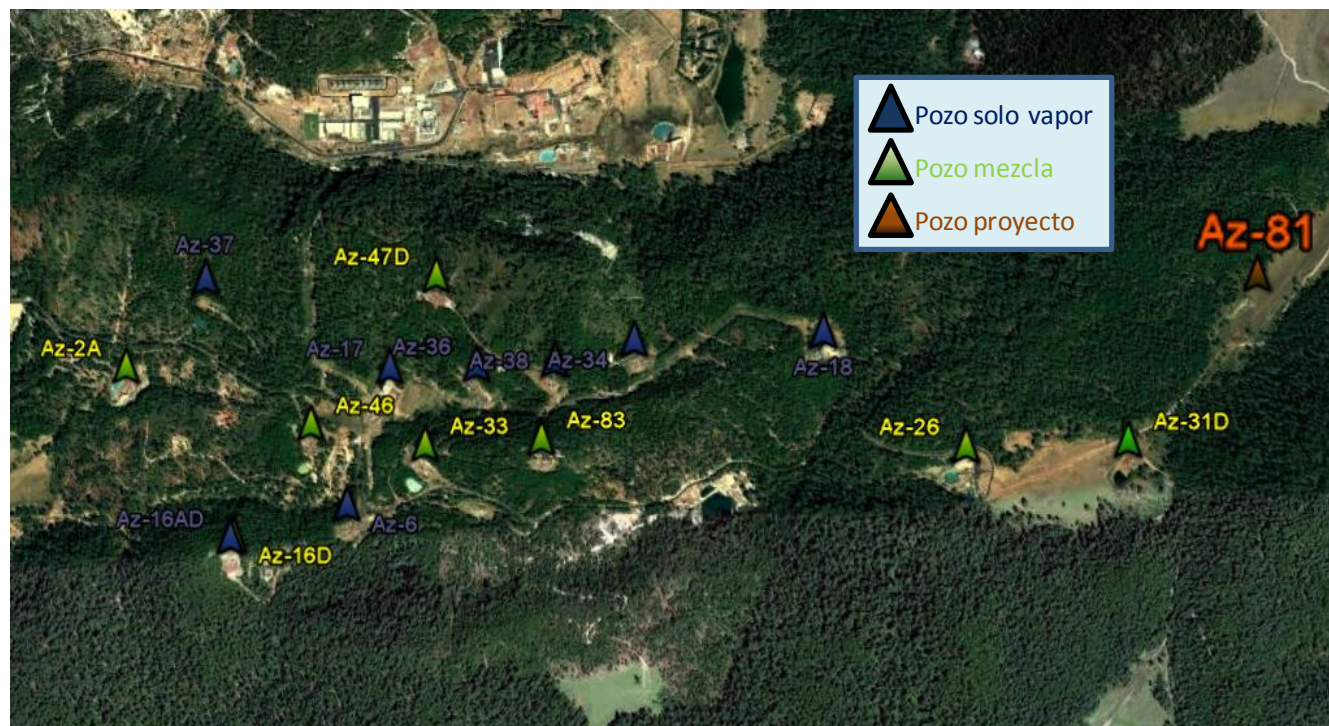


Figura 18. Localización de pozos aledaños al pozo Az-81.



La Figura 18 muestra el mapa de localización del pozo Az-81 y sus pozos aledaños, que son los mismos que los aledaños al pozo AZ-31D, aunque el Az-81 se encuentra más alejado de ellos. Los pozos más cercanos son los pozos Az-31D, Az-26 y Az-18.

La Figura 19 muestra una correlación de las zonas permeables de los pozos aledaños al pozo-proyecto Az-81. En este análisis se identifican dos correlaciones: una en el intervalo de los 1850 a 1750 msnm (1100 a 1200 m de profundidad) entre los pozos Az-36, Az-47, Az-34, Az-18 Az-26 y Az-81, y otra en el intervalo de los 1700 a 1640 msnm (1250 a 1310 m de profundidad) entre los pozos Az-47, Az-34, Az-18 y Az-81. Cabe mencionar que como el pozo Az-81 no tiene información de pérdidas de circulación, sus zonas permeables se determinaron con datos de la última serie de registros PT, como se indicó antes.

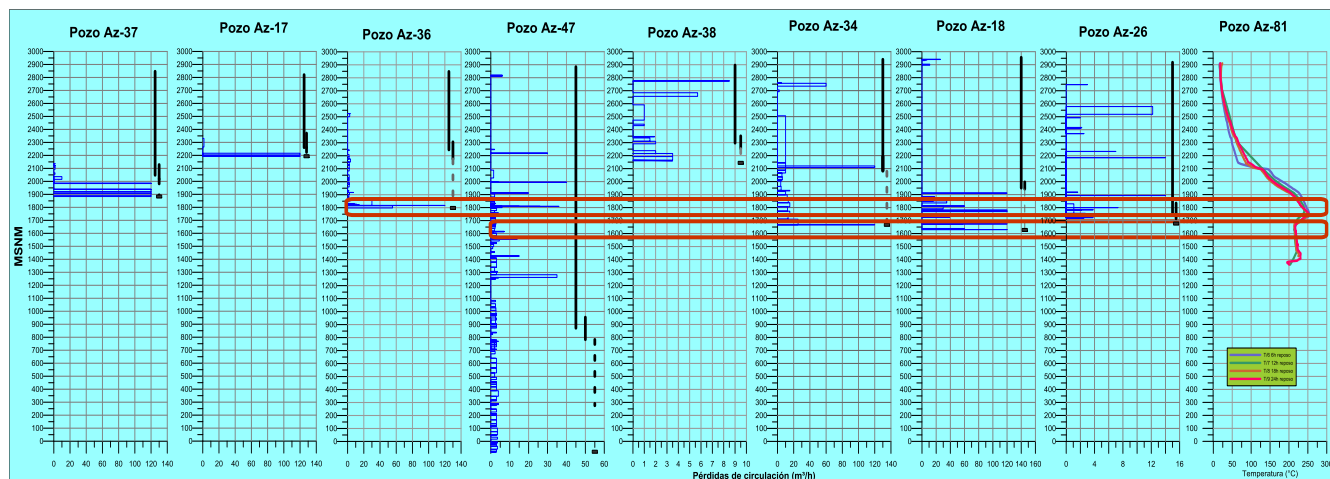


Figura 19. Correlación de zonas permeables de pozos aledaños al pozo Az-81.

## 5. PLANTEAMIENTOS Y REQUERIMIENTOS POR POZO PROPUESTO

Las necesidades y operaciones a realizar para probar el uso de cada uno de los pozos-proyecto como pozos de inyección, se presentan a continuación.

En la Figura 20 se muestra el estado actual de las instalaciones superficiales con las que cuenta el pozo y una tabla con la secuencia de las operaciones propuestas.



Planteamiento	Operación / Maniobra
1	Enfriamiento del pozo.
2	Maniobras de pesca.
3	Calibración de tuberías.
4	Instalación de bicales en pozos de monitoreo.
5	Disposición de agua de la presa del Az-47D.
6	Instalación de arreglo de inyección de presa del Az-47D al Az-47.
7	Prueba de inyección por gravedad

Figura 20. Vista actual de las instalaciones superficiales del pozo Az-47 (izquierda) y logística de operaciones para prueba de inyección en este pozo (derecha).

Por su parte, la Figura 21 muestra lo mismo, para el caso del pozo Az-31D.



Planteamiento	Operación / Maniobra
1	Enfriamiento del pozo.
2	Maniobras de pesca.
3	Limpieza mecánica y química.
4	Calibración de tuberías.
5	Instalación de bicales en pozos de monitoreo.
6	Disposición de agua de la presa del Az-26 o Az-81.
7	Instalación de arreglo de inyección del Az-26 al Az-31D o del Az-81 al Az-31D.
8	Prueba de inyección por gravedad.

*Figura 21. Vista actual de las instalaciones superficiales del pozo Az-31D (izquierda) y logística de operaciones para prueba de inyección en este pozo (derecha).*

Finalmente, la Figura 22 presenta el estado actual de las instalaciones superficiales del pozo Az-81 y una tabla con la secuencia de las operaciones propuestas.



Planteamiento	Operación / Maniobra
1	Enfriamiento del pozo.
2	Instalación de bicales en pozos de monitoreo.
3	Disposición de agua de la presa del Az-26.
4	Instalación de arreglo de inyección del Az-26 al Az-81.
5	Prueba de inyección por gravedad.

*Figura 22. Vista actual de las instalaciones superficiales del pozo Az-81 (izquierda) y logística de operaciones para prueba de inyección en este pozo (derecha).*

## 6. CONCLUSIONES

De acuerdo a la información analizada para este proyecto de recarga de la zona productora sur del yacimiento del campo de Los Azufres, se concluye lo siguiente.

- Existen en la zona productora sur dos intervalos de aporte de fluidos importantes, que se observaron en todos los pozos productores ahí existentes: uno entre 2250 y 2100 msnm (700 a 850 m de profundidad), que es de donde los pozos producen en una sola fase, y otro de 1950 a 1650 msnm (1000 a 1300 m de profundidad), de donde los pozos producen mezcla.
- De acuerdo al análisis del pozo Az-47, este resulta una buena opción para ser empleado como pozo de recarga, pues se utilizaría el agua producida por el pozo Az-47D, que se encuentra dentro de la misma plataforma, para probar inicialmente la inyección por gravedad y, en un mediano plazo, probar la inyección en caliente.
- El pozo Az-31D en sus condiciones actuales tiene una producción conservadora de vapor de



alrededor de 13 t/h, que es posible integrar al sistema de generación. Pero por otro lado también es una buena opción como pozo inyector, ya que así estuvo funcionando anteriormente y serviría para recargar específicamente el sitio donde se ubica, que es una de las zonas donde es necesario recargar. Para este pozo se requiere una intervención con limpieza mecánica y química, para asegurar que la inyección se haga en el fondo del pozo.

- Sin embargo, para el caso del pozo Az-81 se recomienda dejarlo como pozo productor y no utilizarlo en este proyecto de recarga específica, pues tiene una buena capacidad productora en una zona relativamente nueva del yacimiento.
- Finalmente, se recomienda probar inicialmente con el pozo Az-47 y monitorear por medio de un estudio de trazadores la efectividad de su recarga en los pozos aledaños a éste. Sólo en caso de que esta funcione como aquí se ha previsto, se procedería con el pozo Az-31D.