

## **Implementación de la perforación bajo balance en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.**

**Elvia Nohemí Medina Barajas<sup>1</sup>, Emigdio Casimiro Espinoza<sup>1</sup>, Miguel Ángel Ramírez Montes<sup>2</sup> y F. Alejandro Sandoval Medina<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Campo Geotérmico de Los Azufres, Residencia de Estudios, Área de Ingeniería de Yacimientos, Agua Fría, Mich. <sup>2</sup>Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Subgerencia de Estudios, Depto. de Ingeniería de Yacimientos, Morelia, Mich. Correo: [elvia.medina@cfe.gob.mx](mailto:elvia.medina@cfe.gob.mx)

### **Resumen**

Desde el inicio de la perforación de pozos en campos geotérmicos se han empleado técnicas y equipos similares a los empleados en la perforación de pozos petroleros. La perforación tradicional incluye el uso de un lodo de perforación, preparado a base de arcilla bentonítica con la finalidad de dar estabilidad al agujero, reducir la fricción de la barrena y arrastrar los recortes de roca hacia la superficie. Se ha comprobado que este lodo de perforación causa un daño en la formación rocosa circundante y en las zonas permeables del pozo, impidiendo parcial o totalmente el arribo de fluidos geotérmicos y evitando una producción óptima. La mayoría de los pozos existentes en el campo geotérmico de Los Azufres se ha perforado bajo esa técnica de perforación, por lo que usualmente se requieren meses o inclusive años para que uno se limpien naturalmente y, en muchos casos, es necesario realizar una estimulación ácida para eliminar el daño a la formación y lograr un desempeño óptimo. Todo ello aumenta el costo de inversión en los pozos geotérmicos, dado que para mantener la producción y cumplir con la entrega de vapor a las unidades de generación es necesario que al terminar un pozo se abra a producción, se evalúe y se integre al sistema en el menor tiempo posible. Bajo esos antecedentes y necesidades, en 2012 se implementó la técnica de perforación bajo balance para perforar los nuevos pozos requeridos en el campo de Los Azufres. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos con la perforación del pozo Az-89, que fue el primer pozo perforado en Los Azufres, empleando esta nueva técnica.

*Palabras clave:* Perforación, lodos bentoníticos, daño a la formación, pozo Az-89.

### **1. Introducción**

Las técnicas de perforación de pozos han evolucionado de acuerdo al tipo de recurso que se requiere extraer del subsuelo. Se han modificando a través del tiempo con el fin de hacer más eficientes y redituables los medios y técnicas de extracción. La perforación en el campo geotérmico de Los Azufres inició en 1976 aplicando técnicas similares a las empleadas para la perforación de pozos petroleros. Sin embargo, dada la naturaleza del recurso geotérmico que presenta condiciones termodinámicas diferentes a las de un ambiente petrolero, surgió la necesidad de adaptar esas técnicas para que pudieran ser aplicadas en ambientes geotérmicos.

La perforación de pozos ha sido una actividad que ha sido constante en Los Azufres, que depende de las necesidades de expansión y crecimiento del campo. Existen actualmente más de 70 pozos perforados en todo el campo, en los cuales se ha empleado la técnica convencional de perforación en la que se utiliza como medio de circulación de recortes un fluido denominado lodo de perforación. Se ha comprobado que este lodo de perforación causa daño a la formación e impide el desempeño óptimo de los pozos en su etapa productiva. Remover o eliminar ese daño en la formación implica, de manera natural, que el pozo vaya por si solo eliminando el lodo durante su periodo de apertura. Sin embargo,

este proceso puede durar desde semanas hasta años, y en muchos casos el pozo simplemente no puede remover el lodo por sí solo, por lo que se requiere el empleo de técnicas externas para tratar de eliminar el daño. Entre ellas están la estimulación ácida o el fracturamiento hidráulico.

Llevar a cabo una estimulación ácida o un fracturamiento hidráulico implica una inversión adicional a los costos que se generaron en la perforación original del pozo y, en algunos casos, pudiera no solucionarse del todo el problema, lo que significa perder la inversión tanto en la construcción del pozo como en su limpieza posterior.

La producción de vapor actual en Los Azufres es de alrededor de 1700 toneladas por hora (t/h) de vapor extraídas mediante 42 pozos productores. Con esa producción operan los 185 MW de capacidad instalada, lo que coloca a este campo como el segundo más importante de la república mexicana. En el año 2014 deberá entrar en operación otra unidad de 50 MW, que actualmente está en construcción, por lo que fue necesario tomar las previsiones necesarias para contar con vapor suficiente para satisfacer la nueva demanda, que básicamente consisten en la perforación de los nuevos pozos requeridos.

Pero tomando en cuenta los antecedentes, se determinó cambiar la técnica de perforación que se había venido aplicando por más de 30 años y se implementó una técnica nueva conocida en español como perforación bajo balance (UDB: *Under Balance Drilling*). Esta técnica surgió en el ambiente petrolero, pero desde hace tiempo se ha aplicado en campos geotérmicos de Estados Unidos y otros países. Debido a sus beneficios técnicos se decidió probarla para perforar seis nuevos pozos en Los Azufres. El pozo Az-89 fue el primero de ellos, estando los demás en perforación. En este trabajo se presentan los resultados obtenidos durante su construcción y evaluación.

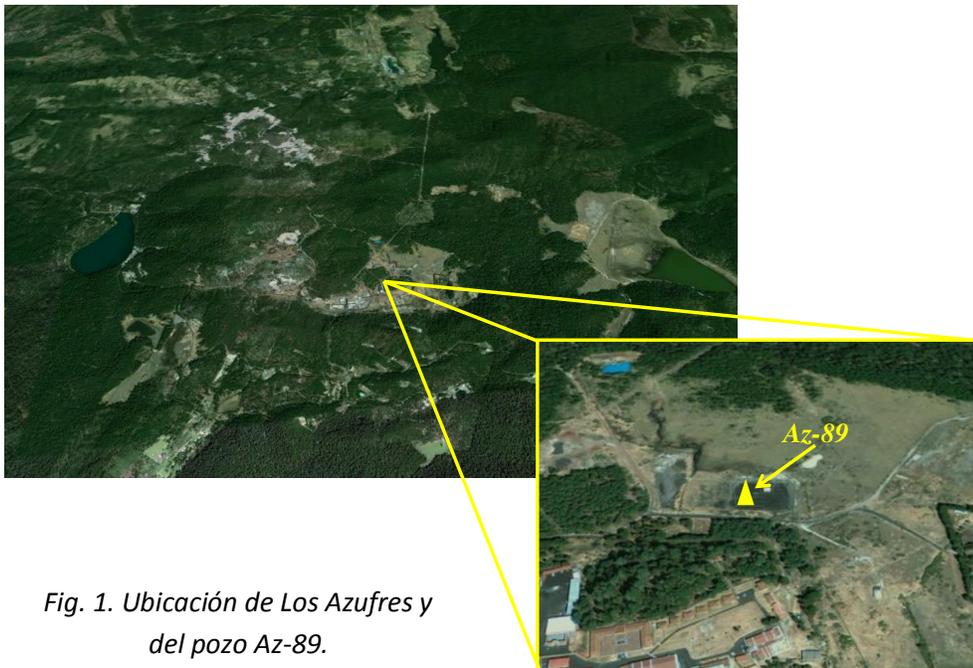


Fig. 1. Ubicación de Los Azufres y del pozo Az-89.

El campo geotérmico de Los Azufres se localiza dentro de la Faja Volcánica Mexicana, en medio de un bosque de pino y oyamel a una altitud promedio de 2800 msnm, y cubriendo una extensión territorial de 90 km<sup>2</sup> aproximadamente. El pozo Az-89 se localiza en la parte centro-sur del campo (Fig. 1).

## 2. Perforación convencional y perforación bajo balance

La perforación convencional utiliza como medio de circulación un fluido denominado lodo hecho a base de arcillas bentoníticas que tiene las funciones de lubricar y enfriar la barrena, remover y transportar los ripios a la superficie, enjarrar y estabilizar la pared del agujero y minimizar

atascamientos y derrumbes en el interior del pozo. El lodo forma una columna hidrostática pesada que al encontrarse con un medio fracturado o permeable puede invadirlo fácilmente, lo que ocasiona la pérdida de circulación. Las pérdidas de circulación se cuantifican como el volumen de lodo infiltrado en la formación, el cual ya no es posible recuperar. Conforme el lodo invade la zona circundante al agujero va reduciendo también la permeabilidad de la formación y disminuye su capacidad de permitir el flujo de fluidos geotérmicos hacia el agujero. Esto es lo que se conoce como daño en la formación.

### 3.1. Fundamentos de la perforación bajo balance (UBD)

La perforación bajo balance emplea como fluido de circulación una mezcla de agua y gas. La presión ejercida por el fluido de circulación en la formación del agujero, está intencionalmente diseñada para ser menor que la presión litostática, o presión de poro en la sección de agujero abierto. Dependiendo de la presión efectiva de la formación, la condición bajo balance puede permitir o no el flujo continuo de fluidos de la formación hacia el agujero. La presión hidrostática del fluido de perforación puede ser por sí sola menor que la presión de la formación, o puede ser incrementada mediante la inyección de aire, gas natural o nitrógeno dentro de la fase líquida del fluido de perforación. En el primer caso se dice que la presión del fluido está bajo balance, y en el segundo que está sobre balance (Fig. 2). Con el fin de controlar el influjo de fluidos de la formación y las presiones en superficie y fondo, una operación de perforación bajo balance requiere de equipo adicional y procedimientos específicos a los desarrollados en operaciones de perforación convencional.

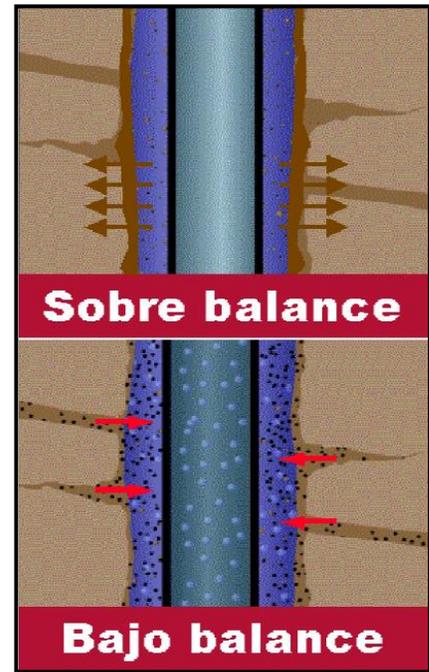


Fig. 2. Perforación sobre y bajo balance.

### 3.2. Ventajas y desventajas de la perforación convencional y UDB

En la Tabla 1 se clasifican las ventajas y desventajas de la perforación convencional y UDB que se han aplicado en el campo geotérmico de Los Azufres, desde el punto de vista de perforación. Se puede ver que operativamente la UDB presenta más ventajas que una perforación convencional.

Perforación convencional		Perforación bajo balance	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
	Altos costos de lodo de perforación.	Minimiza pegas diferenciales.	Ingeniería adicional y operaciones más complejas.
Es posible cuantificar pérdidas de circulación con mayor precisión.	Mayor tiempo en la perforación del pozo.	Incrementa la velocidad de perforación de 2 a 5 veces dependiendo también de la elección de la barrena.	En pozos desviados tipo "J" y verticales no es posible obtener datos de rumbo y dirección del pozo por limitantes en la temperatura de la herramienta.

Menor posibilidad de atrapamiento de la sarta	Manejo especial de lodos bentoníticos.	Menor contaminación debido al uso de químicos biodegradables.	Limitaciones de motores de fondo debido a altas temperaturas.
Mayor estabilidad del agujero, debido a la presión del sobre-balance ejercido sobre la pared de la formación.		Incremento en la vida de la barrena debido a que se elimina el confinamiento sobre la roca por la presión de la columna hidrostática, disminuyendo el trabajo que se realiza en perforar, siendo más eficiente en la remoción de recortes.	Inestabilidad de las paredes del pozo, ya que a medida que aumenta el grado de bajo balance, la fuerza de soporte disminuye, aumentando la inestabilidad del agujero.
Menores probabilidades de arranque del pozo.			Requerimiento de equipos especializados para mantener todo el tiempo la condición UDB.

Tabla 1. Ventajas y desventajas de la perforación convencional y UDB.

En la Tabla 2 se clasifican las ventajas y desventajas de los dos tipos de perforación, analizadas ahora desde el punto de vista técnico. De nuevo, puede verse que existen más ventajas de la perforación UDB.

Perforación convencional		Perforación bajo balance	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Mejor obtención de muestras de canal (ripios).	Daño a la formación por la invasión de lodos de perforación.	No hay daño a la formación por invasión de lodos de perforación.	
Es posible cuantificar pérdidas de circulación con mayor precisión	Se enmascaran zonas de aporte de fluidos.	Elimina trabajos de estimulación ácida	No se cuenta con información precisa de pérdidas de circulación.
	Lenta recuperación térmica del pozo.	Rápida recuperación térmica del pozo.	
	Se altera la permeabilidad de la formación.	Se conserva casi inalterada la permeabilidad de la formación.	
	Lento arribo de fluidos geotérmicos al pozo.	Permite el arribo de fluidos geotérmicos al pozo.	
		Permite la producción del pozo en cuanto se sea penetrada su zona de producción.	

		Simplifica terminación del pozo.	
--	--	----------------------------------	--

Tabla 2. Ventajas y desventajas técnicas de la perforación convencional y UDB.

En la Tabla 3 se clasifican las ventajas y desventajas de los dos tipos de perforación comparando algunos rubros en costos. Se observa que existen más ventajas de la perforación bajo balance en algunos rubros donde se minimizan costos.

Perforación Convencional		Bajo Balance	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Bajo costo en perforación.	Altos costos de fluidos de perforación (lodos).	Disminuye costos de perforación por aumento en la velocidad de perforación.	Aumento de costos por equipos no convencionales de perforación.
	Altos costos por desgaste de barrenas.	Disminuye costos por incremento en la vida de las barrenas.	Aumento por costos en personal especializado en operaciones bajo balance.
		Disminuye el costo de fluidos de perforación.	
		Disminuye el tiempo de recuperación de la inversión.	

Tabla 3. Ventajas y desventajas en costos de la perforación convencional y UDB.

### 3. Resultados termodinámicos durante la construcción del pozo

El pozo Az-89 fue el primer pozo geotérmico construido en México con la técnica de perforación bajo balance. Se localiza en la zona centro sur del campo (ver ubicación en Figura 1) y es un pozo desviado que empezó a perforarse el 22 de octubre de 2012. Se concluyó en un total de 108 días, llegando a una profundidad de 1876 m. La primera etapa de su construcción se realizó con perforación convencional, hasta 1040 m de profundidad, etapa en donde se cementó la TR de 9 5/8". A partir de ahí se continuó construyendo con perforación bajo balance.

Durante la construcción de un pozo, la identificación de pérdidas de circulación es muy importante ya que representan posibles zonas de aporte de fluidos geotérmicos. En el caso del pozo Az-89 se obtuvieron dos intervalos de pérdidas de circulación importantes: uno de 1030 a 1140 m de profundidad, y otro de 1850 a 1870 m. Se presentaron pérdidas parciales y totales con gastos que van de 20 a 100 m<sup>3</sup>/h, como se muestran en la Figura 3. También se corrieron registros de temperatura. En la Figura 4 se observa un gran intervalo permeable que va desde los 1200 m hasta el fondo del pozo, alcanzando una temperatura máxima de 282°C. Se obtuvo una rápida recuperación térmica del pozo, de unos 20°C en seis horas, y la máxima temperatura estabilizada se calculó en casi 300°C, a 1500 m de profundidad.

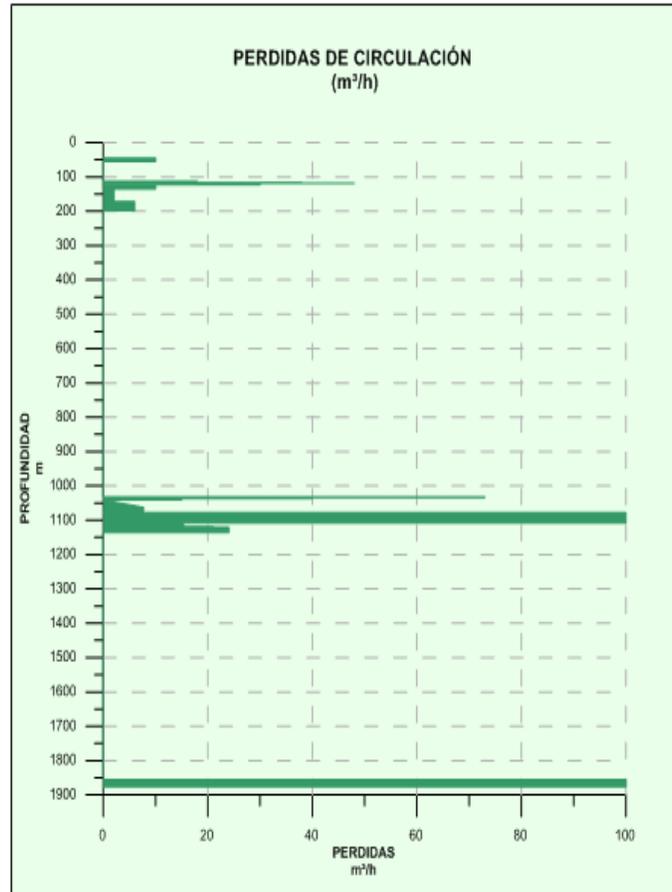


Fig. 3. Pérdidas de circulación durante la perforación del pozo Az-89.

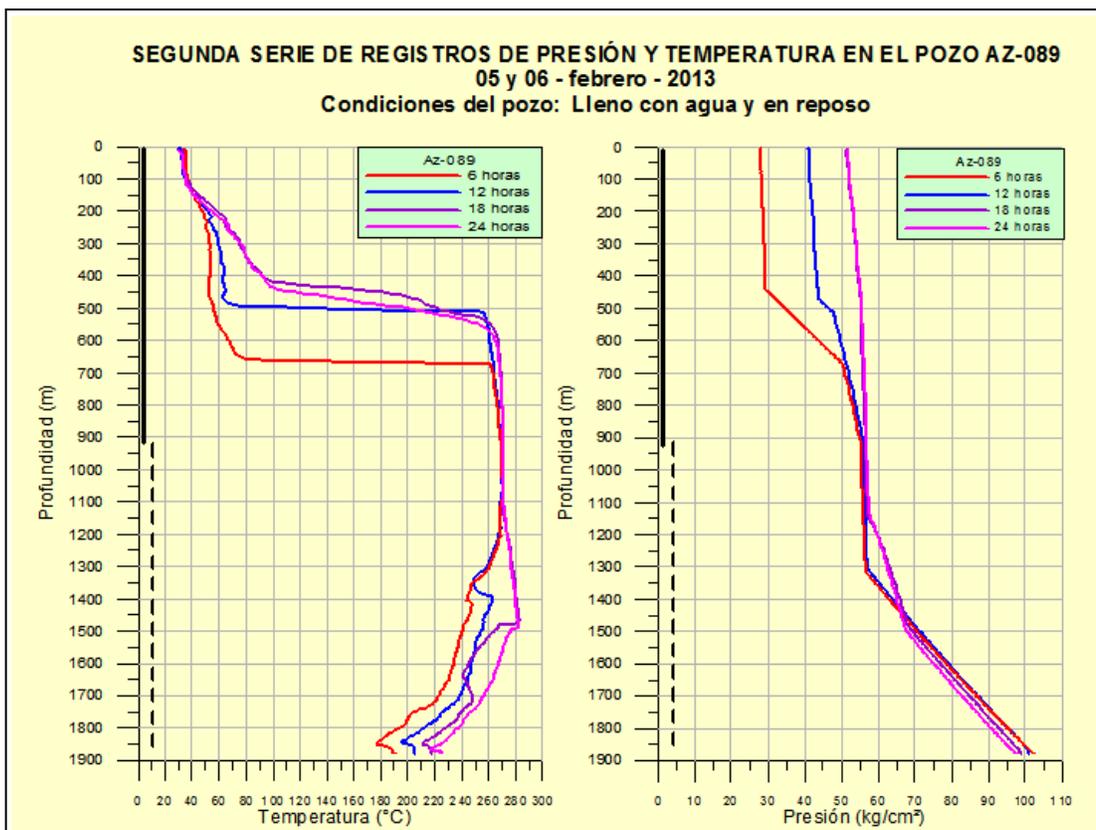
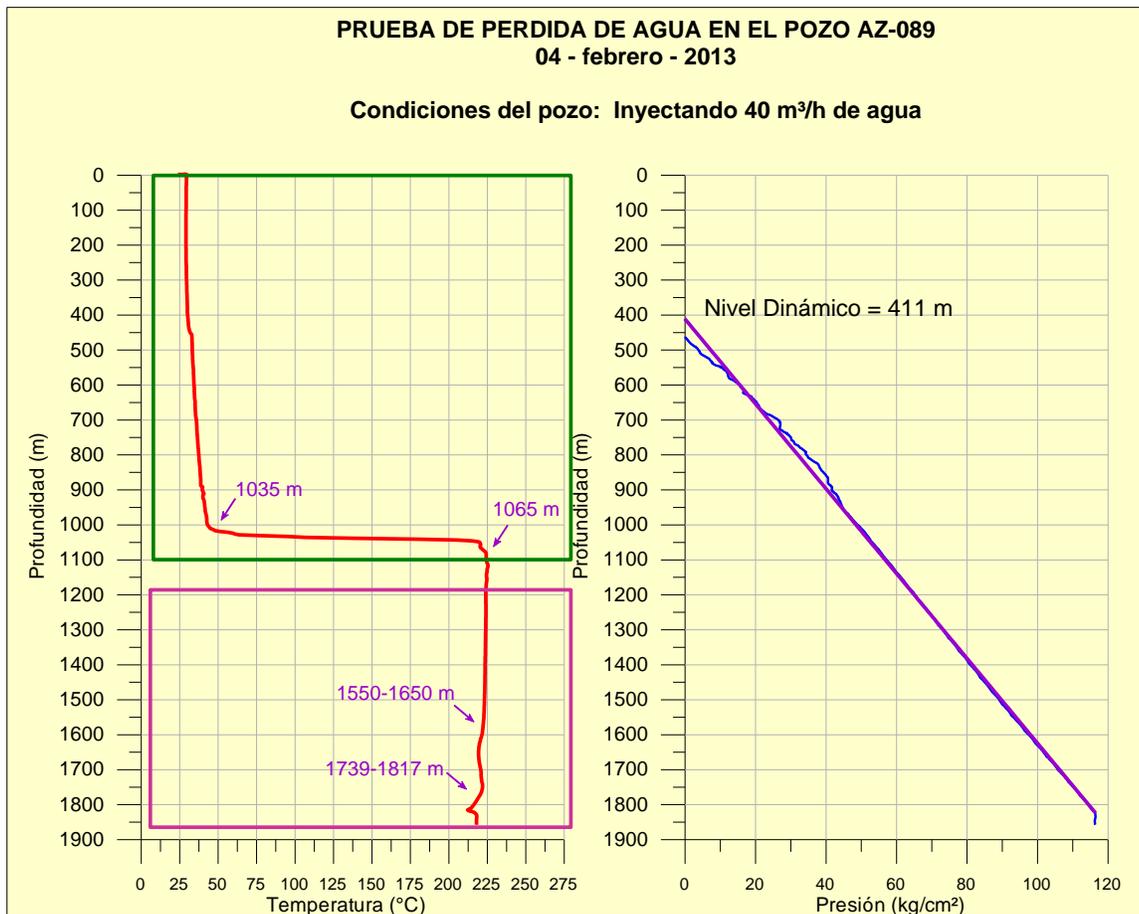


Fig. 4. Registros de presión y temperatura en el pozo Az-89.

En la Figura 5 se muestran las zonas permeables obtenidas con una prueba de pérdida de agua. Se pueden identificar claramente dos zonas de mayor importancia, una a 1035 y otra a 1065 m de profundidad. El espejo de agua se encontró a 411 m de profundidad, relacionándose con los niveles encontrados en pozos aledaños al Az-89.



*Fig. 5.  
Resultados  
de la  
prueba de  
inyección y  
pérdida de  
agua.*

Se hizo finalmente una prueba de permeabilidad, de la que se obtuvo un índice de inyectividad de 11.7 m<sup>3</sup>/h-bar, lo que indica que no hay daño en la formación y que existe una buena permeabilidad de las zonas de aporte encontradas en el pozo (Fig. 6).

#### 4. Resultados termodinámicos durante la etapa de calentamiento

En Los Azufres, la etapa de calentamiento de un pozo consiste en abrirlo por un diámetro mínimo para que libere gases y empiece a calentarse por sí solo. Este proceso de calentamiento se lleva un tiempo variable, y para determinar cómo va evolucionando el pozo se toman perfiles de presión y temperatura a los 3, 7, 14 y 28 días de calentamiento. En el caso del pozo Az-89 se tomaron dos perfiles: uno a los 7 y otro a los 14 días de calentamiento. Los resultados se muestran en la Figura 7. En ella puede verse que en sólo 14 días de calentamiento se pudo obtener la presión media del yacimiento. En otros pozos que han sido perforados con las técnicas convencionales de perforación, es difícil obtener este dato en poco tiempo. En los mejores casos se llega a obtener después de 28 días de calentamiento, y en los peores simplemente no se llega a obtener.

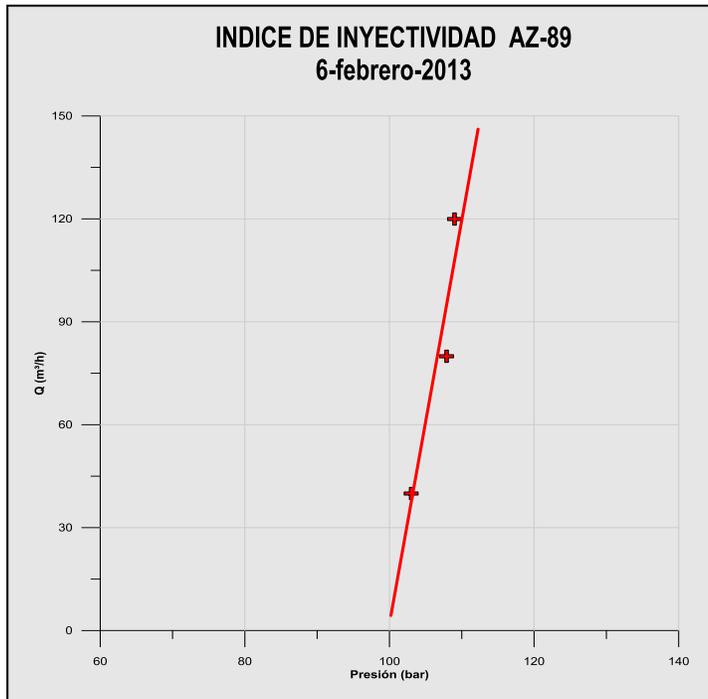


Fig. 6. Índice de inyectividad determinado en el pozo Az-89 mediante prueba de permeabilidad.

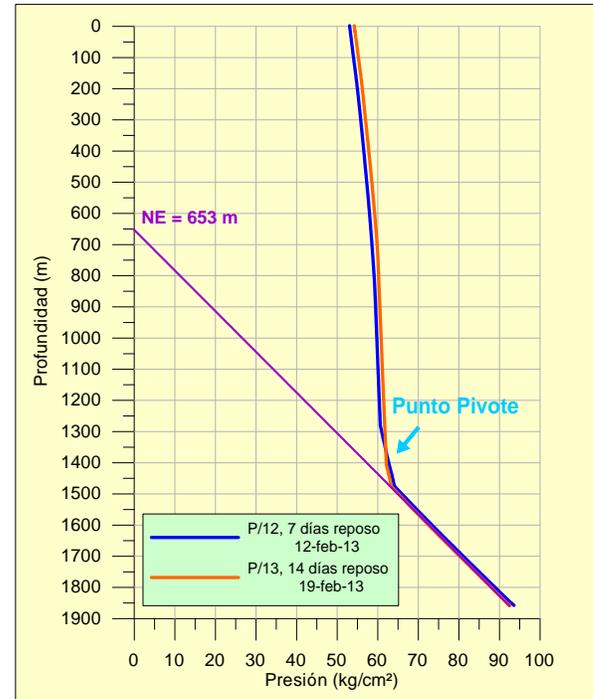


Fig. 7. Perfiles de presión del pozo Az-89 en su etapa de calentamiento.

## 5. Evaluación de la producción del pozo

Una vez que fue equipado el pozo, se abrió a producción y se elaboró un programa de evaluación por orificios de 2", 3" y 4" de diámetro a condiciones atmosféricas, durante los meses de marzo y abril de 2013. Durante este periodo de evaluación se tomaron mediciones para calcular el  $Q_a$  (gasto de agua) y  $Q_v$  (gasto de vapor) fluyendo hacia el silenciador, además de medir la  $P_c$  (presión de cabezal) del pozo.

Los resultados obtenidos durante esta evaluación se muestran en la Tabla 4 y la curva característica de producción obtenida con estos resultados se muestra en la Figura 8.

Presión Cabezal (bar)	Orificio		Q vapor (t/h)	Q agua (t/h)	Entalpía (kj/kg)	Q vapor (t/h)	Q agua (t/h)
	(plg)	(mm)					
<b>Condiciones atmosféricas</b>						<b>Condiciones a 10 barg</b>	
48.2	2	44.45	39	2	2549	26.3	4.60
36.1	3	50.80	72	6	2475	66.7	11.90
24.4	4	76.20	85	7	2487	78.8	13.25

Tabla 4. Resultados de la evaluación del pozo Az-89.

De esta evaluación se obtiene que el pozo Az-89 tiene una capacidad máxima de producción de vapor de 86 t/h a una presión de 14 barg (Fig. 9, izquierda), producción que se asemeja a la de algunos pozos aledaños a él ya en etapa productiva. Cabe comentar que el pozo Az-89, una vez abierto a producción

después de su terminación, alcanzó esa producción sin requerir limpieza adicional, lo que también puede ser atribuible al técnica de perforación bajo balance que se utilizó en él.

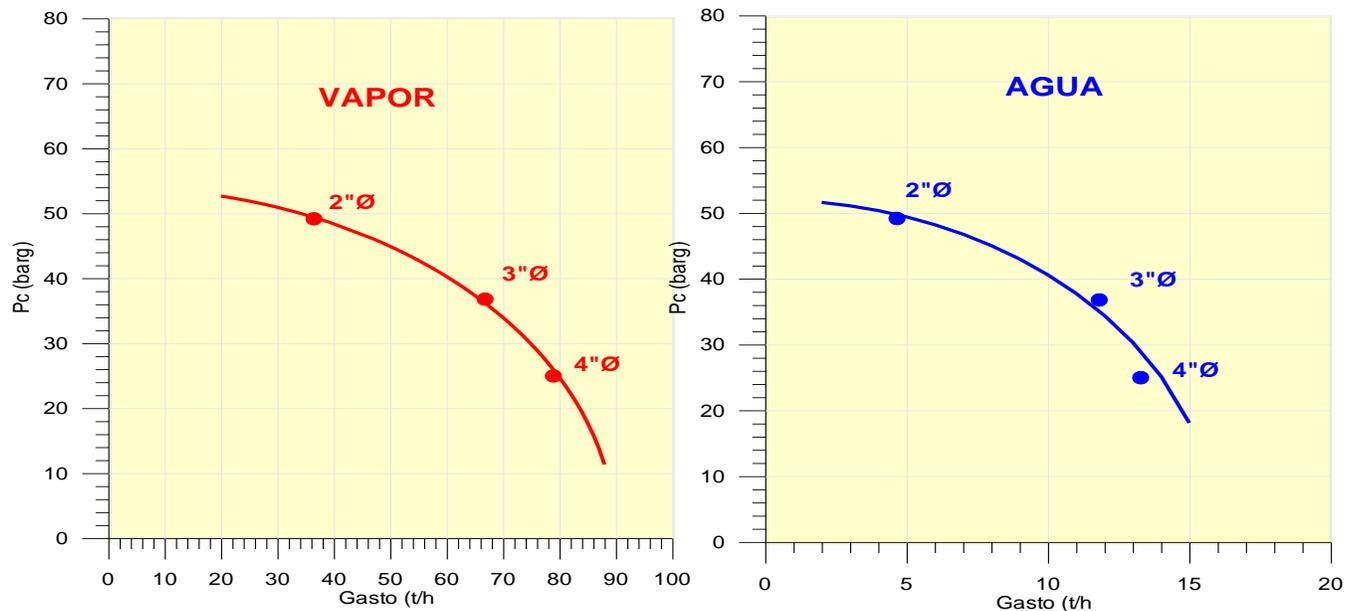


Fig. 9.- Curvas características de producción de vapor y agua en el pozo Az-89.

## 6. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos a partir de la perforación bajo balance del primer pozo en el campo de Los Azufres, puede concluirse lo siguiente.

- Se encontraron zonas permeables importantes mediante los perfiles de temperatura tomados durante una serie de registros con 24 horas de reposo.
- Se obtuvo un buen índice de inyectividad, comparable con índices obtenidos en pozos estimulados.
- Se observó una rápida recuperación térmica del pozo en 24 horas de reposo, alcanzando temperaturas cercanas a los 300°C.
- Al abrir el pozo a producción se observó que al cabo de 24 horas el pozo ya estaba produciendo agua limpia (salmuera geotérmica).
- Con base en los resultados de las pruebas obtenidas, se comprobó que el pozo Az-89 está libre de daño en la formación.
- A partir del momento de su terminación, fue posible evaluarlo por completo e integrarlo a producción comercial en un periodo de dos meses.
- La implementación de la perforación bajo balance (UBD) en el pozo Az-89 fue exitosa ya que el pozo no presenta daño en la formación y su capacidad de producción es óptima.

## Bibliografía consultada

CFE, 2012. Costos de perforación del pozo Az-89. CFE, archivos internos. Inédito.

Nas, S., 2001. *Introducción a la Perforación Bajo Balance*. Bucksburn, Aberdeen.

Sandoval, A., E. Medina y A. Hernández, 2012. *Resultados termodinámicos de la perforación del pozo Az-89*". CFE, reporte interno O-2159-031-R-0. Inédito.

Sandoval, A. y L. Reyes, 2013. *Resultados de la Evaluación de la Producción del pozo Az-89*". CFE, reporte interno. Inédito.