

Estudio con un trazador de vapor en la zona aledaña al pozo Az-64, en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Eduardo R. Iglesias¹, Magaly Flores Armenta², José Luis Quijano León², Marco A. Torres Rodríguez², Rodolfo J. Torres¹, Neftalí Reyes Picasso¹ y Fernando Sandoval Medina²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Mor., México.

²Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Morelia, Michoacán, México.
Correo: iglesias@iee.org.mx.

Resumen

En el estudio con trazadores precedente a este, efectuado en la zona Marítaro–La Cumbre del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., se comprobó que la inyección en el pozo Az-15 recarga a un grupo de pozos situados a una distancia máxima del inyector de algo menos de 2000 m. Y se comprobó que la inyección en dicho pozo o bien no recarga a pozos situados a más de 2300 m hacia el este, en las inmediaciones de la falla Laguna Verde, o lo hace muy lentamente en un largo periodo. Como es importante recargar la zona mencionada en último término, se decidió entonces explorar la posibilidad de recargarla desde el pozo Az-64, localizado en dicha área. Para ello se diseñó el presente estudio. Se designaron seis pozos productores para monitorear el arribo del trazador. Debido a que todos estos pozos producen vapor (aunque varios producen también líquido), y por consideraciones económicas, se decidió utilizar en este caso un trazador de vapor solamente. Se utilizó hexafluoruro de azufre (SF₆), un trazador utilizado con éxito previamente en este campo. El 24 de octubre de 2006 se inyectaron 96.4 kg de SF₆ en el pozo Az-64. El monitoreo de los pozos se realizó durante 156 días a partir de esa fecha. El trazador se detectó en los seis pozos productores monitoreados. En todos los casos las formas de las curvas de residencia manifestaron claramente la naturaleza fracturada de la permeabilidad involucrada. En todos los casos las curvas de recuperación del trazador indicaron claramente que la llegada del mismo se había completado dentro del lapso de 156 días de monitoreo. Los mayores porcentajes de recuperación se registraron en los pozos Az-05 (48.5%) y Az-43 (1.27%), los más cercanos al pozo inyector, y situados del mismo lado de la falla Marítaro que el Az-64. El pozo Az-51, situado a 848 m del inyector, y el más lejano de los monitoreados, registró el tercer porcentaje de trazador recuperado ($1.01 \times 10^{-5}\%$), significativamente mayor que lo recuperado en el pozo Az-19 ($6.95 \times 10^{-6}\%$), situado a menor distancia (490 m) del Az-64; estos dos pozos también se encuentran del mismo lado de la falla Marítaro que el inyector. El pozo Az-32, situado a 423 m del inyector pero del otro lado de la Falla Marítaro, recuperó $5.6 \times 10^{-7}\%$ de trazador, cantidad comparable con lo recuperado en el pozo Az-13 ($8.67 \times 10^{-7}\%$), situado del mismo lado de la falla Marítaro y a 539 m del inyector. Estos resultados comprobaron que los pozos productores monitoreados son recargados por lo inyectado en el pozo Az-64 y cuantificaron la fracción de lo inyectado que se recupera como vapor en los mismos. Debido a que sólo se utilizó un trazador de fase vapor, no fue posible determinar qué fracción de lo inyectado se recupera en los pozos monitoreados como líquido. Este trabajo permitió también caracterizar relaciones entre la distribución de la permeabilidad en la zona estudiada y la distribución de fallamiento conocida, sugiriendo algunas relaciones que no se habían considerado previamente.

Palabras clave: Los Azufres, recarga artificial, trazadores geotérmicos, trazadores de vapor.

Study with a steam tracer in a zone near well Az-64, in the Los Azufres geothermal field, Mich.

Abstract

A previous tracer study in the Marítaro–La Cumbre area of the Los Azufres, Mich., geothermal field concluded that injection in well Az-15 recharges a group of producing wells located east of the injector to a maximum distance of about 2000 m. The study also indicated injection in Az-15 either does not recharge wells farther east in the neighborhood of the Laguna Verde fault, or does so at very low rates over a long period. Because it is important to recharge this zone, it was decided to explore the possibility of doing it by injecting in well Az-64, located in the area. Thus the present study was designed. Six producing wells were chosen to monitor tracer arrivals. Because all the chosen wells produce steam (several also produce water) and for economic reasons, it was decided to use a steam-phase tracer. We chose sulfur hexafluoride (SF_6), a tracer successfully used before in the field. On October 24, 2006, we injected 96.4 kg of SF_6 into well Az-64. All six chosen wells were sampled for 156 days, starting the day of injection. The tracer was detected in all six wells and for every well the shape of the residence curve clearly depicted the fractured nature of the corresponding permeability. Again in every case, the recovery curves indicated recovery was completed within the 156-day sampling period. The largest recoveries were in wells Az-05 (48.5%) and Az-43 (1.27%), those closest to the injection well and on the same side of the Marítaro fault as Az-64. Well Az-51, lying at 848 m from the injector and farthest away, registered the third-highest recovery percentage ($1.01 \times 10^{-5}\%$), significantly higher than well Az-19 ($6.95 \times 10^{-6}\%$), located 490 m from the injector; the two wells are on the same side of the Marítaro fault as Az-64. Well Az-32, located 423 m from the injector, but on the other side of the Marítaro fault, recovered $5.6 \times 10^{-7}\%$ of the injected tracer, comparable to $8.67 \times 10^{-7}\%$, the amount recovered in well Az-13 on the same side of the Marítaro fault and 539 m from the injector. The results showed the six monitored wells are recharged from injection in Az-64 and quantified the corresponding recoveries as steam. Because only a steam-phase tracer was used, we were unable to determine liquid-recovery amounts. The work also allowed us to characterize relations between the permeability in the studied zone and the known distribution of faults. Some relationships were suggested unconsidered before.

Keywords: Los Azufres, artificial recharge, geothermal tracers, steam tracers.

1. Introducción

En un estudio con trazadores que precedió al presente, efectuado en la zona Marítaro–La Cumbre del campo geotérmico Los Azufres, Mich. (Iglesias *et al.*, 2008), se comprobó que la inyección en el pozo Az-15 recarga a los pozos Az-65D, Az-04, Az-41, Az-30, Az-28 y Az-66D, situados a una distancia máxima de ese inyector de algo menos de 2000 m. Pero no se detectaron los trazadores utilizados en los pozos Az-28A, Az-43, Az-45, Az-48, Az-51, Az-5, Az-09AD, Az-13, Az-32, Az-09, Az-19 y Az-69, también localizados en la zona Norte del campo, pero a distancias de entre 2300 y 3200 m aproximadamente del pozo Az-15, en las inmediaciones de la falla Laguna Verde (Fig. 1).

La falta de detección de los trazadores en estos pozos no significa necesariamente que los mismos no reciben recarga alguna desde el pozo Az-15. Es posible que, debido a las grandes distancias al inyector involucradas, no haya habido tiempo en los 279 días de la prueba para el arribo de los trazadores. También es posible que aunque los trazadores hubieran llegado a este conjunto de pozos, la concentración de los mismos hubiera disminuido a valores menores que los límites de detección correspondientes, debido a las altas dispersiones esperadas para las grandes distancias al inyector y a los correspondientes largos tiempos de residencia. De cualquier manera, los resultados del estudio precedente sugieren que, si existe, la recarga de este conjunto de pozos desde el Az-15 es o bien pequeña o tiene lugar muy lentamente en un largo periodo.

El conjunto de pozos que no registró trazadores en el estudio previo se localiza en la zona parcialmente delimitada por la confluencia de la falla Laguna Verde con las fallas Marítaro y La Cumbre (Fig. 1). Esta es una zona muy productiva del campo y sería importante implementar su recarga. La Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) decidió entonces explorar la posibilidad de recargar dicha zona inyectando en el pozo Az-64 (Fig. 1). Para ello se diseñó el presente estudio. Los objetivos específicos del mismo son: (1) establecer si existe una conexión hidráulica entre el pozo inyector Az-64 y un conjunto de pozos productores de la zona designados por la GPG; y (2) en el caso de que la conexión exista, determinar qué fracción de lo inyectado recarga cada uno de los productores designados.

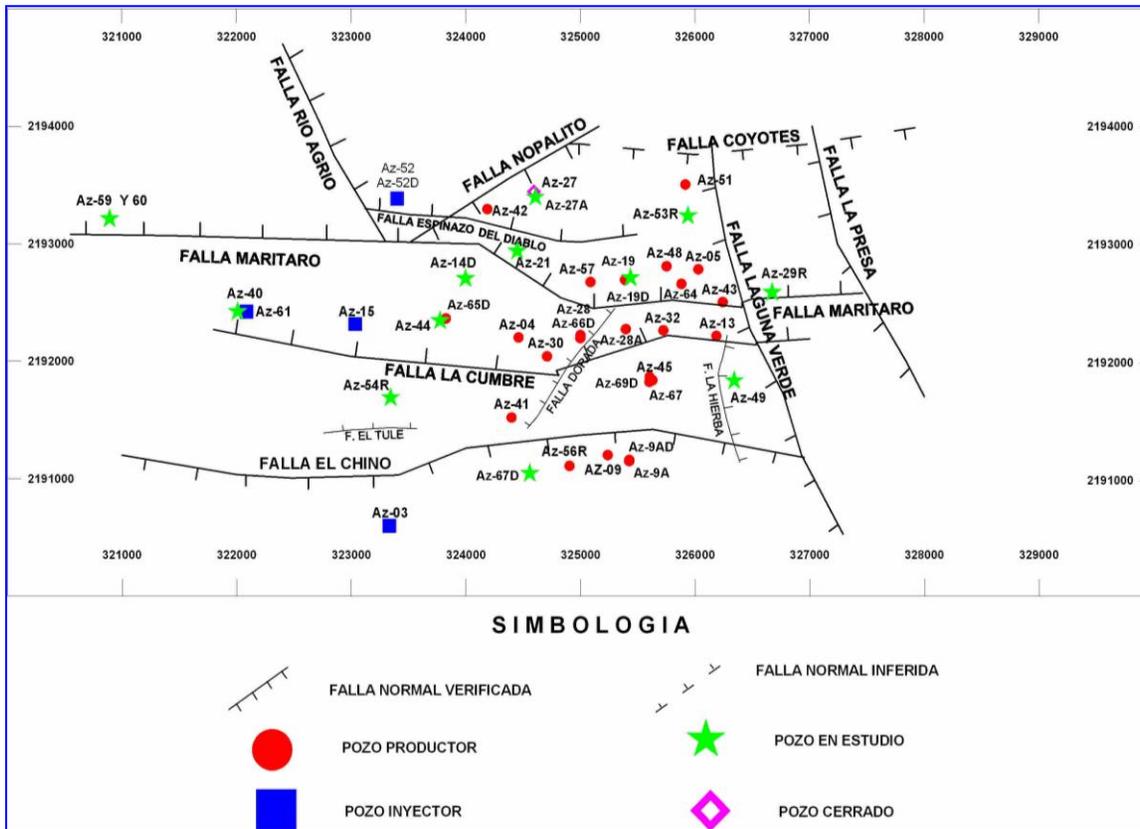


Fig. 1. Área de interés para este estudio en Los Azufres

2. Método y materiales

La GPG designó los pozos productores Az-05, Az-43, Az-32, Az-19, Az-13, y Az-51 (en orden de distancia creciente al inyector) para monitorear el arribo del trazador en este estudio. La Tabla 1 presenta las distancias de estos pozos al inyector Az-64 y sus respectivas producciones de agua y vapor.

Debido a que todos estos pozos producen vapor (aunque varios producen también líquido, Tabla 1), y por consideraciones económicas, se decidió utilizar en este caso un trazador de vapor solamente.

Los trazadores geotérmicos de fase vapor fueron investigados por varios autores en años recientes (e.g., Adams, 1995; Adams *et al.*, 2000, 2001). Muchos de los candidatos considerados resultaron inestables o marginalmente estables a 300° C, que es la temperatura aproximada del yacimiento en la zona de interés. Escogimos el gas hexafluoruro de azufre (SF₆), que no es tóxico, ni inflamable, ni corrosivo, como trazador de fase vapor, por su estabilidad térmica a altas temperaturas, estabilidad química a condiciones de yacimiento, bajo límite de detección, disponibilidad comercial, accesibilidad económica y logística de campo relativamente simple. El límite de detección de SF₆, referido al vapor condensado es aproximadamente 0.01

ppt, por cromatografía de gases con detector de captura de electrones. Este es el mismo trazador de fase vapor utilizado en el estudio precedente (Iglesias *et al.*, 2008).

Pozo	Distancia al Az-64 (m)	Producción (t/h)	
		Agua	Vapor
Az-05	195.02	0.00	75.64
Az-43	392.08	1.97	52.37
Az-32	423.57	0.00	53.43
Az-19	490.54	10.20	62.71
Az-13	539.55	0.36	71.50
Az-51	847.76	14.62	32.22

Tabla 1. Pozos productores designados

Para implementar este nuevo estudio, la GPG efectuó los trabajos necesarios para poder inyectar salmuera de desecho en el pozo Az-64. Estos trabajos incluyeron el tendido de una línea de inyección, la instalación de presas para almacenar salmuera, y la preparación del pozo para la inyección.

El 24 de Octubre de 2006 se inyectaron 96.4 kg de SF₆ en el pozo Az-64. El monitoreo de los pozos productores comenzó el mismo día y se realizó durante 156 días a partir de esa fecha.

Las muestras de vapor se recolectaron en botellas de vidrio tipo Giggenbach, previamente rellenas con 50 ml de una solución 4N de NaOH, y después evacuadas. Dependiendo de las configuraciones disponibles en los distintos pozos, las muestras de vapor se obtuvieron directamente del vaporoducto o del cabezal del pozo, en este caso por medio de un separador transportable.

3. Resultados y discusión

A continuación se presentan las curvas de residencia y de recuperación de cada trazador en los seis pozos productores, durante los 156 días que duró el muestreo. Los pozos se presentan en orden de distancia creciente al pozo inyector.

3.1. Pozo Az-05

La Fig. 2 presenta los resultados observados hasta el momento en el pozo Az-05, situado a 195 m del pozo inyector, muy cerca del mismo, y del mismo lado de la falla Marítaro que el pozo inyector (Fig. 1). En este pozo se recibió una señal extraordinariamente intensa del trazador, con una concentración máxima de 5.89 e-06 gr/gr, y una recuperación de 46% a los 30 días desde la inyección. La extraordinaria intensidad de la señal y la extremadamente alta recuperación para un tiempo tan corto, se deben en gran medida a la gran proximidad entre el pozo inyector y el pozo Az-05.

En la curva de residencia (concentración) se distinguen dos picos superpuestos (notar el “hombro” que presenta la curva entre 2 y 3 días) y una larga cauda característica. Los picos reflejan la existencia de otros tantos “canales” de permeabilidad entre el pozo inyector y el pozo Az-05. Como se observó anteriormente (Iglesias *et al.*, 2008) la naturaleza fracturada de la permeabilidad del campo se manifiesta claramente en los resultados obtenidos con trazadores.

La intensidad de la señal registrada y la extraordinaria magnitud de la recuperación para un tiempo tan corto revelan que la permeabilidad de estos canales es muy considerable. Aunque desde el punto de vista de la recarga y el mantenimiento de la presión del yacimiento estos resultados son positivos, los mismos sugieren que existe riesgo de que se produzca interferencia térmica significativa en un tiempo relativamente corto.

Finalmente, en la cauda de la curva de residencia se detectó el trazador con baja intensidad hasta los 156 días que duró el monitoreo, aunque debido a la escala esto no se distingue en esta curva. Sin embargo se evidencia

en la curva de recuperación, que registra 64% a los 30 días y continúa creciendo lentamente hasta alcanzar 48.5% a los 165 días (Fig. 2).

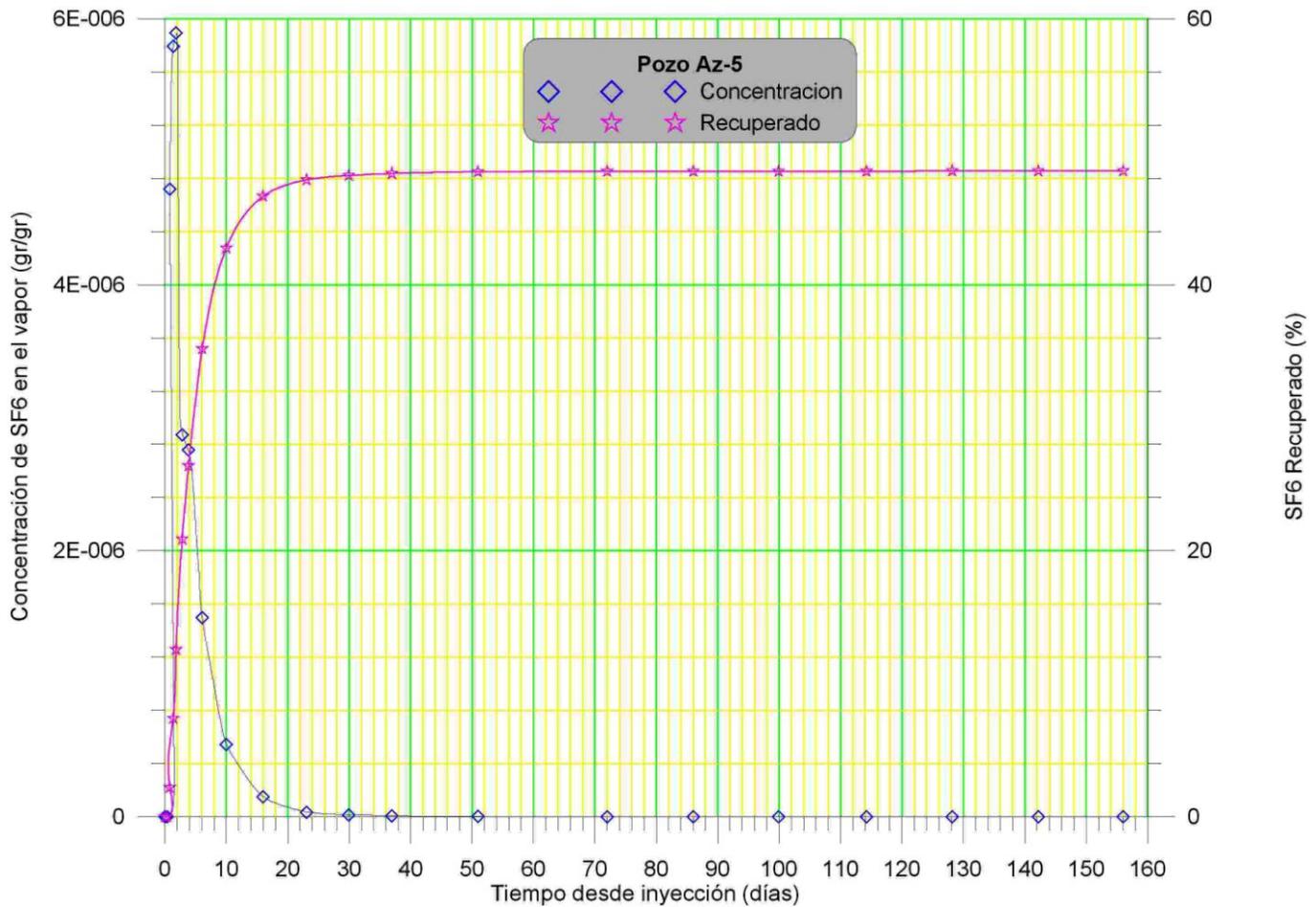


Fig. 2. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-05

Estos resultados comprueban fehacientemente que la inyección de salmuera en el pozo Az-64 recarga la zona de alimentación del pozo Az-05, y que al menos 48.5% de lo inyectado recarga a este pozo. Además, revelan que inyectar en el pozo Az-64 implica riesgo de que se produzca interferencia térmica significativa en un tiempo relativamente corto.

3.2. Pozo Az-43

La Fig. 3 presenta los resultados observados en el pozo Az-43. Este pozo está situado a 392 m del pozo inyector, relativamente cerca del mismo, y del mismo lado de la falla Marítaro que el pozo inyector (Fig. 1). La concentración máxima de trazador observada fue de 1.65 e-07 gr/gr, aproximadamente 2.8% de la concentración máxima observada en el pozo Az-05. En este pozo (Az-43) se registró la máxima recuperación de 1.27% a los 30 días desde la inyección, aproximadamente 2.62% de lo recuperado en el pozo Az-05 en el mismo tiempo. Las menores magnitudes relativas a lo registrado en el pozo Az-05 están relacionadas con la mayor distancia al pozo inyector y con el menor gasto de vapor en este pozo (Tabla 1).

En la curva de residencia se insinúan dos picos superpuestos, que reflejan la existencia de otros tantos "canales" de permeabilidad entre el pozo inyector y el pozo Az-43. Nuevamente, la naturaleza fracturada de la permeabilidad del campo se manifiesta claramente en los resultados obtenidos con trazadores.

Estos resultados comprueban fehacientemente que la inyección de salmuera en el pozo Az-64 recarga la zona de alimentación del pozo Az-43, y que aproximadamente 1.27% de lo inyectado en el pozo Az-64 recarga a este pozo. La magnitud del factor de recuperación observada sugiere que el riesgo de interferencia térmica en este pozo por la inyección en el Az-64 es pequeño.

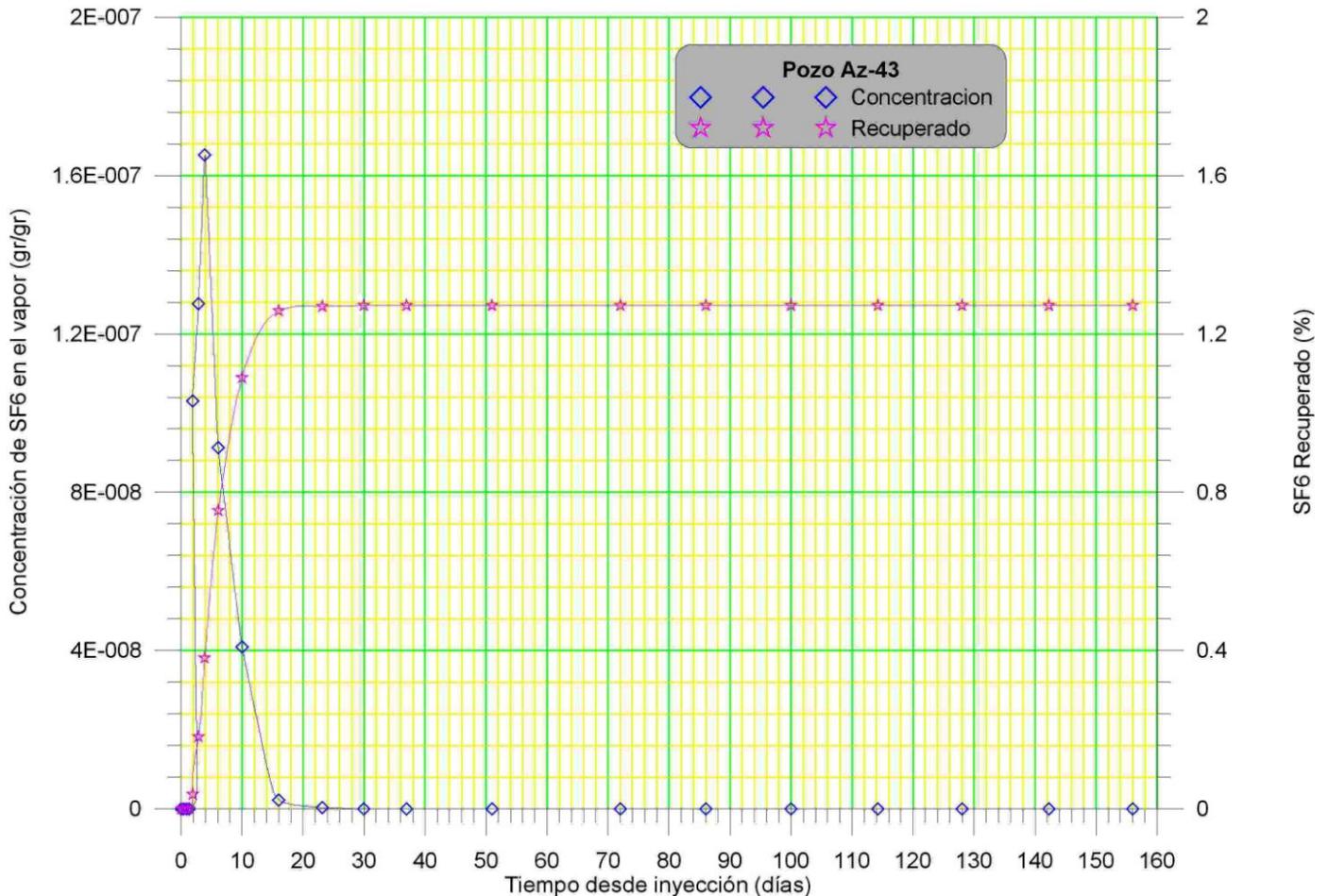


Fig. 3. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-43

3.3. Pozo Az-32

La Fig. 4 presenta los resultados observados en el pozo Az-32. Este pozo está situado a 424 m del pozo inyector, relativamente cerca del mismo, y del lado opuesto de la falla Marítaro que el pozo inyector (Fig. 1).

La concentración máxima de trazador observada fue de 2.38×10^{-13} gr/gr, aproximadamente $0.4 \times 10^{-5}\%$ de la concentración máxima observada en el pozo Az-05. En este pozo (Az-32) se registró una recuperación máxima de $5.60 \times 10^{-7}\%$ a los 72 días desde la inyección. Esto es aproximadamente seis órdenes de magnitud menor que lo recuperado en el pozo Az-05. Las menores magnitudes relativas a lo registrado en el pozo Az-05 están relacionadas con la mayor distancia al pozo inyector, con el menor gasto de vapor en este pozo (Tabla 1), y probablemente con el hecho de que el mismo se localiza del otro lado de la falla Marítaro.

En la curva de residencia se perciben siete picos, que reflejan la existencia de otros tantos “canales” de permeabilidad entre el pozo inyector y el pozo Az-32. Nuevamente, la naturaleza fracturada de la permeabilidad del campo se manifiesta claramente en los resultados obtenidos con trazadores.

Estos resultados comprueban fehacientemente que la inyección de salmuera en el pozo Az-64 recarga la zona de alimentación del pozo Az-43, y que la recarga es mucho menor que la registrada en los pozos Az-05 y Az-43. Los resultados sugieren que no existe riesgo de interferencia térmica por recarga desde el pozo Az-64, pero también indican que dicha recarga no es significativa.

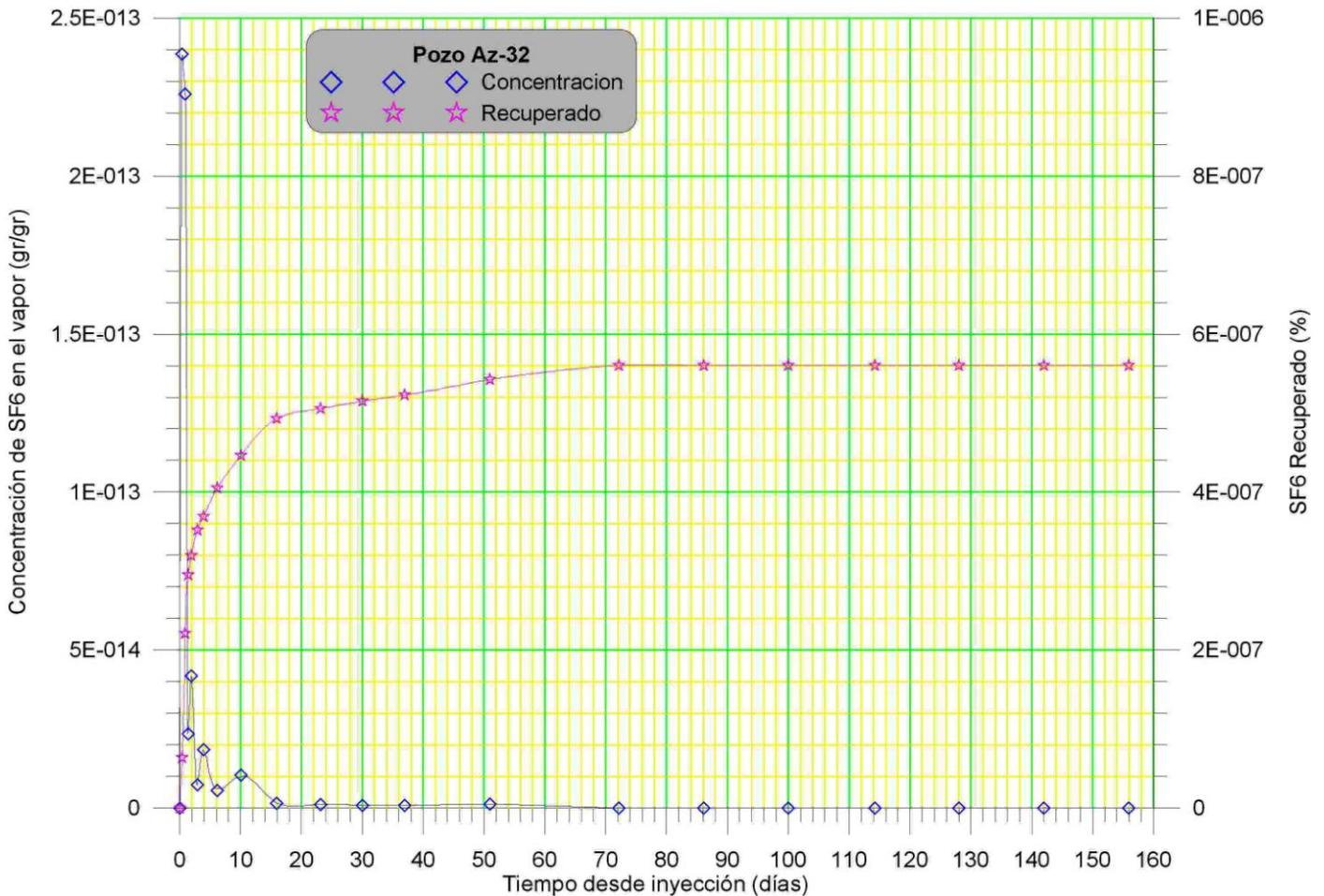


Fig. 4. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-43

3.4. Pozo Az-19

La Fig. 5 presenta los resultados observados en el pozo Az-19. Este pozo está situado a 491 m del pozo inyector, y del mismo lado de la falla Marítaro que el pozo inyector (Fig. 1).

La concentración máxima de trazador observada fue de 1.07×10^{-12} gr/gr, aproximadamente $0.18 \times 10^{-4}\%$ de la concentración máxima observada en el pozo Az-05, y un orden de magnitud mayor que la observada en el pozo Az-32, que es más cercano al inyector. En este pozo (Az-19) se registró una recuperación total de $6.95 \times 10^{-6}\%$ a los 114 días desde la inyección, aproximadamente seis órdenes de magnitud menor que lo recuperado en el pozo Az-05, pero un orden de magnitud mayor que lo recuperado en el pozo Az-32. Las menores magnitudes relativas a lo registrado en el pozo Az-05 están relacionadas con la mayor distancia al pozo inyector y con el menor gasto de vapor en este pozo (Tabla 1). Las mayores magnitudes de máxima concentración y recuperación respecto del pozo Az-32, que es más cercano al inyector, se relacionan probablemente con el hecho de que el Az-19 está del mismo lado de la falla Marítaro que el inyector.

En la curva de residencia se perciben claramente cinco picos, que reflejan la existencia de otros tantos “canales” de permeabilidad entre el pozo inyector y el pozo Az-19. Nuevamente, la naturaleza fracturada de la permeabilidad del campo se manifiesta claramente en los resultados obtenidos con trazadores.

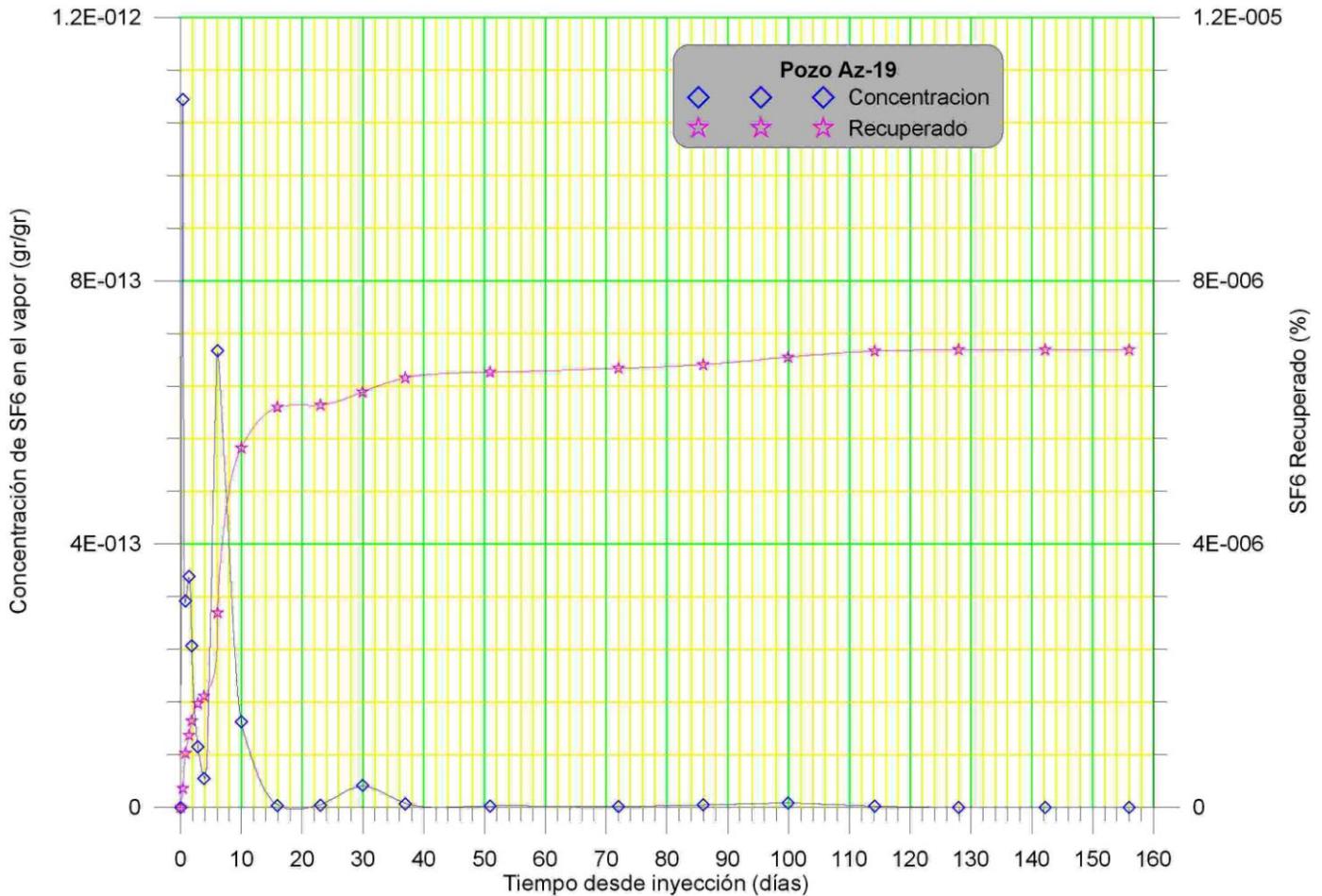


Fig. 5. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-19

Estos resultados comprueban fehacientemente que la inyección de salmuera en el pozo Az-64 recarga la zona de alimentación del pozo Az-19, y que la recarga es mucho menor que la registrada en los pozos Az-05 y Az-43. Los resultados sugieren que no existe riesgo de interferencia térmica por recarga desde el pozo Az-64, pero también indican que dicha recarga no es significativa.

3.5. Pozo Az-13

La Fig. 6 presenta los resultados observados en el pozo Az-13. Este pozo está situado a 540 m del pozo inyector, y del lado opuesto de la falla Marítaro que el pozo inyector (Fig. 1).

La concentración máxima de trazador observada fue de 2.01 e-13 gr/gr, aproximadamente 0.34 e-05% de la concentración máxima observada en el pozo Az-05, y del mismo orden de magnitud que la observada en el pozo Az-32, que es más cercano al inyector y está situado del mismo lado de la falla Marítaro. En este pozo (Az-13) se registró una recuperación máxima de 8.67 e-07% a los 37 días desde la inyección, aproximadamente ocho órdenes de magnitud menor que lo recuperado en el pozo Az-05 en el mismo tiempo, y del mismo orden de magnitud que lo recuperado en el pozo Az-32. Las menores magnitudes relativas a lo registrado en el pozo Az-05 están relacionadas con la mayor distancia al pozo inyector y con el menor gasto de vapor en este pozo (Tabla 1). Las magnitudes de máxima concentración y recuperación similares a las del

pozo Az-32, que es más cercano al inyector, se relacionan probablemente con el hecho de que el Az-13 está del mismo lado de la falla Marítaro que el Az-32.

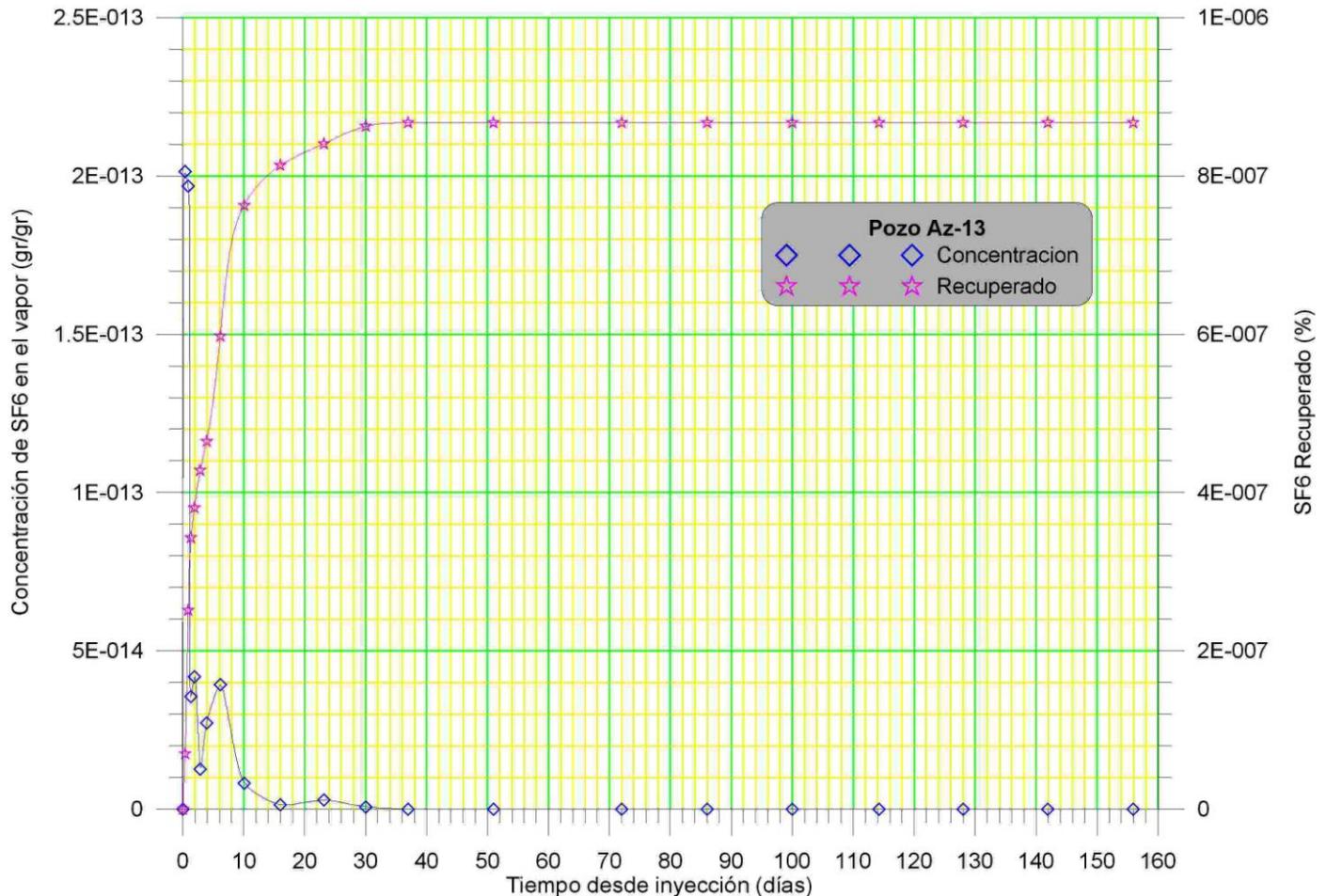


Fig. 6. Curvas de residencia v recuperación de SF₆ en el pozo Az-13

En la curva de residencia se perciben claramente cuatro picos, que reflejan la existencia de otros tantos “canales” de permeabilidad entre el pozo inyector y el pozo Az-19. Nuevamente, la naturaleza fracturada de la permeabilidad del campo se manifiesta claramente en los resultados obtenidos con trazadores.

Estos resultados comprueban fehacientemente que la inyección de salmuera en el pozo Az-64 recarga la zona de alimentación del pozo Az-13, y que la recarga es mucho menor que la registrada en los pozos Az-05 y Az-43. Los resultados sugieren que no existe riesgo de interferencia térmica por recarga desde el pozo Az-64, pero también indican que dicha recarga no es significativa.

3.6. Pozo Az-51

La Fig. 7 presenta los resultados observados en el pozo Az-51. Este pozo está situado a 848 m del pozo inyector, el más lejano, y del mismo lado de la falla Marítaro que el pozo inyector (Fig. 1).

La concentración máxima de trazador observada fue de 5.1×10^{-12} gr/gr, aproximadamente $0.87 \times 10^{-4}\%$ de la concentración máxima observada en el pozo Az-05, y del mismo orden de magnitud que la observada en el pozo Az-19, que es más cercano al inyector y está situado del mismo lado de la falla Marítaro. En este pozo (Az-51) se registró una recuperación máxima de $1.01 \times 10^{-5}\%$ a los 51 días desde la inyección,

aproximadamente siete órdenes de magnitud menor que lo recuperado en el pozo Az-05 en el mismo tiempo, y casi dos veces mayor que lo recuperado en el pozo Az-19. Esto último es inesperado, ya que este pozo está casi dos veces más lejos del inyector que el pozo Az-19. Esto sugiere que la falla Laguna Verde (ver Fig. 1) podría proveer permeabilidad entre el inyector y el pozo Az-51.

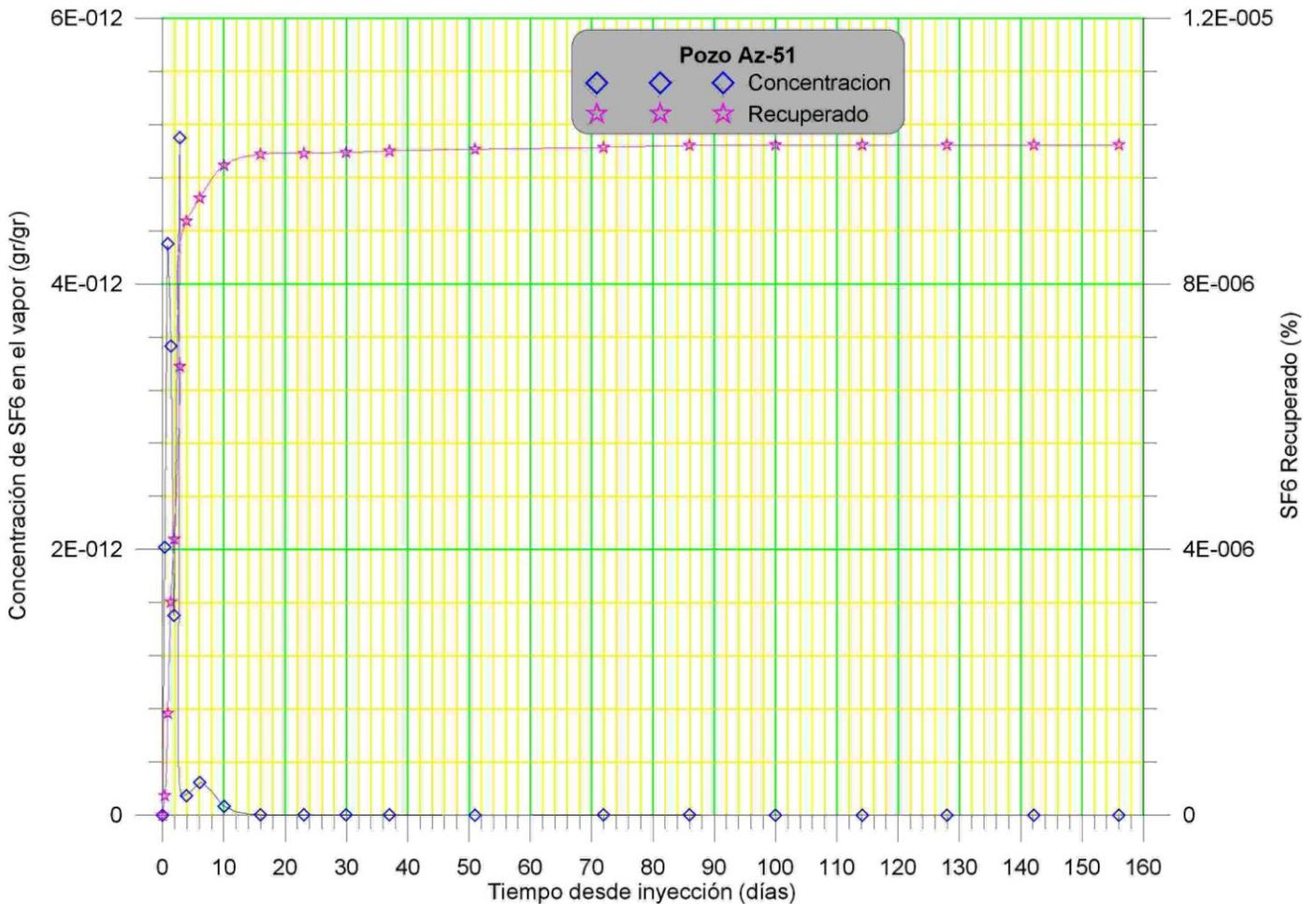


Fig. 7. Curvas de residencia y recuperación de SF6 en el pozo Az-51.

En la curva de residencia se perciben claramente tres picos, y se insinúa un cuarto, que reflejan la existencia de otros tantos “canales” de permeabilidad entre el pozo inyector y el pozo Az-51. Nuevamente, la naturaleza fracturada de la permeabilidad del campo se manifiesta claramente en los resultados obtenidos con trazadores.

Estos resultados comprueban fehacientemente que la inyección de salmuera en el pozo Az-64 recarga la zona de alimentación del pozo Az-51, y que la recarga es mucho menor que la registrada en los pozos Az-05 y Az-43. Los resultados sugieren que no existe riesgo de interferencia térmica por recarga desde el pozo Az-64, pero también indican que dicha recarga no es significativa.

3.7. Distribución de la permeabilidad

En esta sección intentamos interpretar, a la luz de los resultados disponibles, algunos rasgos de la distribución de permeabilidad que interconecta los pozos en la zona estudiada. Con el objeto de facilitar las interpretaciones, en la Tabla 2 se resumen varias magnitudes de interés que se discutieron más arriba. También se mencionan las fallas interceptadas por los pozos, incluyendo el inyector Az-64, de acuerdo con la información provista por CFE.

Pozo	Distancia (m)	Gasto vapor (t/h)	Residencia (días)	cmax (gr/gr)	Recuperación máxima (%)	Falla interceptada
Az-64	0	-	-	-	-	Marítaro
Az-05	195.02	75.64	9.9	5.89 E-06	48.5	Laguna Verde
Az-43	392.08	52.37	9.9	1.65 E-07	1.27	Marítaro
Az-32	423.57	53.43	9.9	2.38 E-13	5.60 E-07	La Cumbre
Az-19	490.54	62.71	9.9	1.07 E-12	6.95 E-06	Marítaro
Az-13	539.55	71.5	9.9	2.01 E-13	8.67 E-07	La Cumbre
Az-51	847.76	32.22	9.9	5.10 E-12	1.01 E-05	Coyotes

Tabla 2. Datos relevantes sobre los pozos implicados en el estudio

En primer lugar, el arribo de grandes cantidades de trazador en 30 días al pozo Az-05, discutido en la sección 3.1, indica que existe una conexión hidráulica muy significativa entre la falla Marítaro, interceptada por el pozo inyector, y la falla Laguna Verde, interceptada por este productor (Tabla 2). El pozo Az-05 se ubica en el ángulo formado por la intersección de las fallas Marítaro y Laguna Verde (Fig. 1), ambas fallas con sus respectivos buzamientos hacia el pozo Az-05. La existencia de una conexión hidráulica significativa entre ambas fallas, en esa zona, refuerza la conocida noción de que en las inmediaciones de este tipo de intersección entre fallas se incrementa la permeabilidad.

El pozo Az-43 también registró una alta recuperación del trazador. Esto lo ubica en el segundo lugar en cuanto a recuperación en este grupo de pozos. Este pozo también ocupa el segundo lugar en distancia al inyector (Tabla 2). Los resultados mencionados implican una alta permeabilidad entre el pozo inyector Az-64 y este pozo. El hecho de que ambos pozos interceptan la falla Marítaro sugiere fuertemente que la misma es la responsable de la permeabilidad que los interconecta.

Los pozos Az-51 y Az-19, que se encuentran del mismo lado de la falla Marítaro (Fig. 1), registraron el tercer y cuarto lugar respectivamente en relación con la recuperación del trazador (Tabla 2), con valores similares. Sin embargo, la magnitud de la recuperación en estos pozos es seis o siete órdenes de magnitud menor que las registradas en los pozos Az-43 y Az-05 respectivamente, sugiriendo permeabilidades menores que las indicadas para los pozos mencionados en último término. Llama la atención que, estando Az-51 a una distancia del inyector 73% mayor que la del pozo Az-19 al Az-64, tanto la concentración máxima como la recuperación observada en el mismo son significativamente mayores que las correspondientes magnitudes en el pozo Az-19. La razón de esta aparente anomalía parece encontrarse en la presencia de la Falla Laguna Verde, que con rumbo aproximado SSE–NNW vincula las fallas Marítaro y Coyotes, ambas de rumbo aproximado E–W (Fig. 1). Esto sugiere que el flujo comprobado entre el pozo inyector Az-64 y el productor Az-51 se produce vía las fallas Marítaro–Laguna Verde–Coyotes. Los registros de perforación del Az-51 soportan esta interpretación, ya que el pozo cortó la falla Laguna Verde a aproximadamente 1046 m y la falla Coyotes a 1832 m; aunque la zona superior se dejó aislada con tubería de revestimiento, es posible que exista canalización hacia la zona ranurada del pozo.

Finalmente, en la Tabla 2 se han destacado en color azul claro los pozos Az-32 y Az-13, que interceptan la falla La Cumbre y se encuentran del lado opuesto de la falla Marítaro al que se encuentra el inyector (Fig. 1). Como se mencionó, tanto las concentraciones máximas como las recuperaciones registradas en estos pozos resultaron significativamente menores que las mismas magnitudes correspondientes al pozo Az-19, que se encuentra más lejos del inyector que el pozo Az-32, y a una distancia similar a la del pozo Az-13, pero del mismo lado de la falla Marítaro que el inyector Az-64. Esto indica que existe permeabilidad a través de la falla Marítaro, y que esta es significativamente menor que a lo largo de la misma.

4. Conclusiones

El trazador fue detectado en los seis pozos de observación designados, con lo que se demostró fehacientemente que la inyección en el pozo Az-64 recarga las zonas productoras de los mismos.

Los porcentajes de recuperación varían grandemente entre los pozos estudiados. Para los pozos Az-05 y Az-43 son significativos, 48.5 % y 1.27 % respectivamente. Para el resto de los pozos en este estudio los factores de recuperación no son significativos.

La permeabilidad entre los pozos Az-64 y Az-05 es muy considerable, y los resultados sugieren que existe riesgo de que se produzca interferencia térmica significativa en un tiempo relativamente corto, si se inyecta permanentemente en el pozo Az-64. Los resultados de los demás pozos sugieren que no existe riesgo de interferencia térmica por recarga desde el pozo Az-64.

La conexión hidráulica entre el pozo Az-64 y el pozo Az-05 se efectúa muy probablemente vía las fallas Marítaro–Laguna Verde. La conexión hidráulica entre el pozo Az-64 y el pozo Az-43 se efectúa muy probablemente a través de la falla Marítaro. El flujo entre el pozo inyector Az-64 y el productor Az-51 se produce probablemente vía las fallas Marítaro–Laguna Verde–Coyotes. El flujo entre el pozo inyector Az-64 y el productor Az-19 se produce probablemente vía la falla Marítaro.

La falla Marítaro no actúa como una barrera impermeable entre los pozos Az-13 y Az-32 y el inyector Az-64, aunque la permeabilidad a través de la misma es significativamente menor que a lo largo de la misma.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades de la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos de la CFE y a las autoridades del Instituto de Investigaciones Eléctricas, las facilidades brindadas para la publicación de este trabajo. Se agradece también especialmente al personal del Laboratorio de Química de la Residencia de Los Azufres su generosa colaboración en el muestreo de los pozos, que contribuyó en forma importante para el éxito de este estudio.

Referencias

- Adams, M.C., 1995. Vapor, liquid and two-phase tracers for geothermal systems. *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, Eds. E. Barbier, G. Frye, E. Iglesias, G. Pálmason, pp. 1875-1880.
- Adams, M.C., Y. Yamada, M. Yagi, T. Kondo, and T. Wada, 2000. Stability of methanol, propanol, and SF₆ as high-temperature tracers. *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Eds. E. Iglesias, D. Blackwell, T. Hunt, J. Lund, S. Tamanyu, pp.3015-3019.
- Adams, M.C., J.J. Beall, S.L. Eney, P.N. Hirtz, P.M. Kilbourn, B.A. Koenig, R. Kunzman, and J.L.B. Smith, 2001. Hydrofluorocarbons as geothermal vapor-phase tracers. *Geothermics*, v. 30, pp. 747-775.
- Iglesias E.R., M. Flores Armenta, J.L. Quijano León, M.A. Torres Rodríguez, R.J. Torres y N. Picasso Reyes, 2008. Estudio con trazadores de líquido y vapor en la zona Marítaro–La Cumbre del campo geotérmico de Los Azufres, Mich. *Geotermia*, Vol. 21, No. 1, pp. 12-24.