

Estudio con trazadores de líquido y vapor en la zona Marítaro – La Cumbre del campo geotérmico de Los Azufres, Mich.

Eduardo R. Iglesias⁽¹⁾, Magaly Flores Armenta⁽²⁾, José Luis Quijano León⁽²⁾, Marco A. Torres Rodríguez⁽²⁾, Rodolfo J. Torres⁽¹⁾ y Nefalí Reyes Picasso⁽¹⁾

⁽¹⁾*Instituto de Investigaciones Eléctricas, Av. Reforma 113, 62490 Cuernavaca, Mor., México.*

⁽²⁾*Comisión Federal de Electricidad, Alejandro Volta 655, 58290 Morelia, Mich., México.*

Resumen

Se efectuaron dos pruebas simultáneas en la zona Marítaro – La Cumbre del campo geotérmico de Los Azufres, Mich., México. Los objetivos de estas pruebas fueron determinar si la salmuera de desecho inyectada en el pozo Az-15 recarga las zonas de alimentación de seis pozos productores designados por CFE, y estimar qué fracción de lo inyectado recarga dichos pozos productores. Debido a que sólo tres de los pozos productores producen agua y todos producen vapor, se utilizaron dos trazadores: hexafluoruro de azufre (SF₆) para la fase vapor y 1,3,6-trisulfonato de naftaleno (1,3,6-tsn) para la fase líquida. Todos los pozos de observación registraron el SF₆, y los tres pozos que producen agua registraron además el 1,3,6-tsn, probando que los fluidos inyectados en el pozo Az-15 recargan las zonas de alimentación de los pozos productores monitoreados. En los tres pozos en los que se detectó el trazador de fase líquida continuaban recuperándose cantidades significativas de 1,3,6-tsn al suspenderse el muestreo. Los totales de 1,3,6-tsn recuperados en los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28 hasta 279 días después de la inyección, fecha en que se suspendió el muestreo, fueron respectivamente 6.1%, 0.90% y 0.16%, para un total recuperado de 7.61%. Se concluye que estas cantidades representan cotas inferiores para las magnitudes de recuperación esperadas en cada uno de los pozos y para el total recuperado. Cuando se suspendió el muestreo, los pozos Az-65D, Az-66D y Az-30 continuaban produciendo SF₆ a bajas concentraciones, y el resto de los pozos no registraba producción del trazador de vapor. Los totales recuperados en los pozos Az-65D, Az-04, Az-41, Az-30, Az-28 y Az-66D fueron respectivamente 4.82 e-02%, 1.37 e-03 %, 1.48 e-03 %, 6.38 e-04 %, 1.38 e-03 % y 4.31 e-04 %, para un total de 5.35 e-02 %. La recarga por líquido resultó órdenes de magnitud mayor que la recarga por vapor.

Palabras clave: Trazadores geotérmicos, trazadores de líquido, trazadores de vapor, Los Azufres.

Study with liquid and steam tracers at the Maritaro – La Cumbre area of the Los Azufres geothermal field

Abstract

We run two simultaneous tracer tests in the Maritaro-La Cumbre area of the Los Azufres, Mexico, geothermal field. The objectives were to determine whether the fluids injected in well Az-15 recharge the production area of six production wells; and to estimate the fraction of injected fluid recovered in them, if any. Because only three of these wells produce water and all of them produce steam, two tracers were used, sulfur hexafluoride (SF₆) for the gas phase and 1,3,6 naphthalene trisulfonate (1,3,6-nts) for the liquid phase. All the observation wells recorded SF₆, and the three water-producing wells recorded 1,3,6-nts, proving that fluids injected in well Az-15 do recharge the area of interest. When sampling was suspended, the three water-producing wells were still producing 1,3,6-nts at significant

rates. The total recoveries of 1,3,6-nts at wells Az-65D, Az-04 and Az-28 at 279 days after injection, when sampling was halted, where, respectively, 6.1%, 0.90% y 0.16%, for a total of 7.61%. We concluded that these quantities constitute lower bounds for the respective recovery factors. When sampling was halted wells Az-65D, Az-66D and Az-30 where still producing some SF₆ at low rates, and the rest of the wells where not recording the gas phase tracer anymore. The total recoveries of SF₆ at wells Az-65D, Az-04, Az-41, Az-30, Az-28 and Az-66D where, respectively, 4.82 e-02%, 1.37 e-03 %, 1.48 e-03 %, 6.38 e-04 %, 1.38 e-03 % y 4.31 e-04 %, for a total of 5.35 e-02 %. The liquid recharge resulted orders of magnitude greater than that by steam.

Keywords: Geothermal tracers, liquid tracers, steam tracers, Los Azufres.

1. Introducción

La Comisión Federal de Electricidad (CFE) inyecta típicamente 120-250 toneladas por hora (t/h) de salmuera de desecho, producidas en diversas zonas del campo geotérmico de Los Azufres, en el pozo Az-15. Al inicio de este estudio el destino de las salmueras inyectadas no se conocía con certeza. Temprano en la vida del campo, la hidrología indicaba que los fluidos inyectados en el pozo Az-15 se desplazarían hacia el Oeste del mismo (Fig. 1). Pero después de dos décadas de producción, se consideró posible que el gradiente de presión actual favorezca la recarga de la zona Norte del campo.

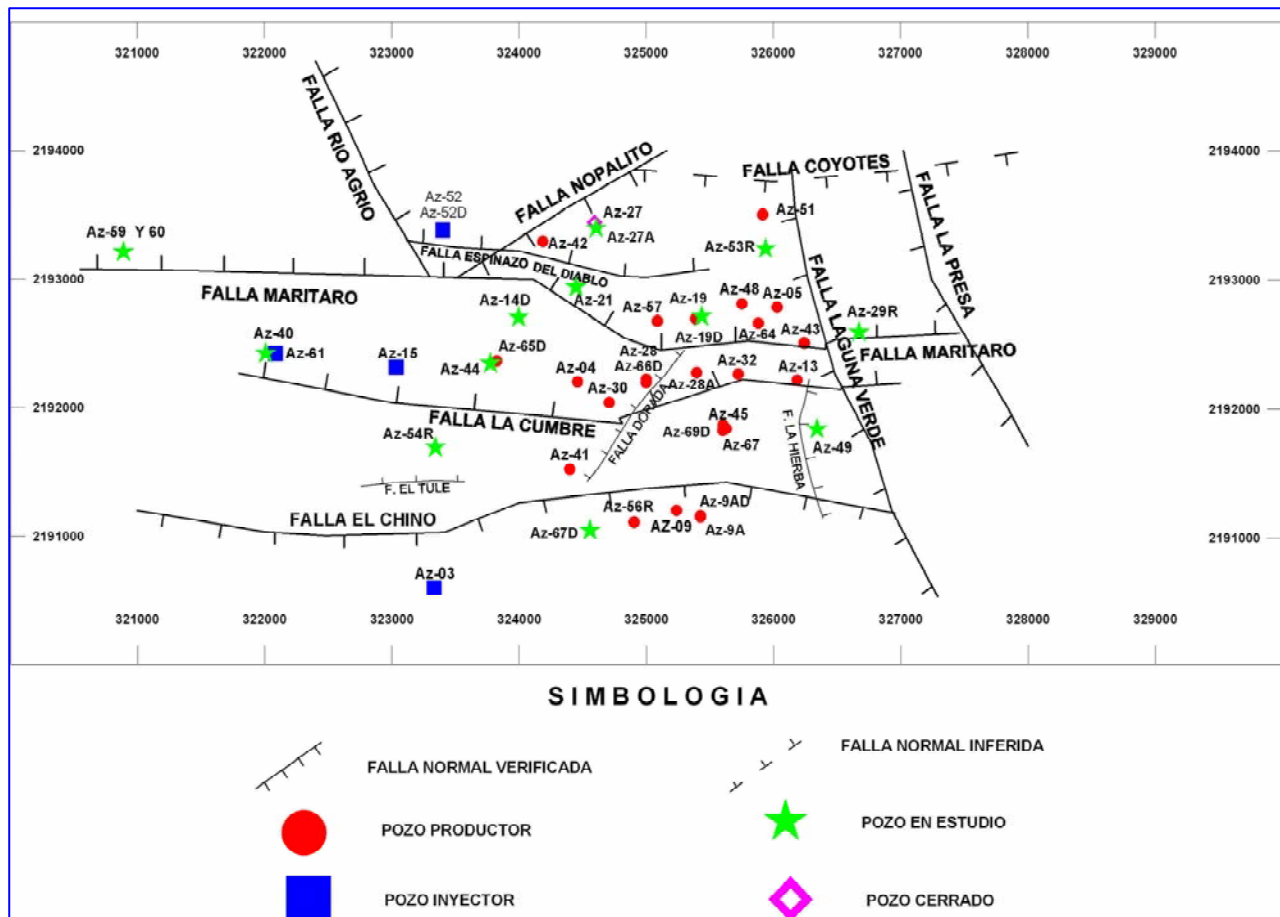


Fig. 1. Área de interés para este estudio en Los Azufres

Antes de este estudio existían indicios de que al menos parte de lo inyectado podría recargar la zona Marítaro-La Cumbre del yacimiento. Arellano *et. al* (2003, 2005) detectaron algunas correlaciones entre los gastos de algunos pozos productores de esta zona y los gastos inyectados en el pozo Az-15. Barragán *et. al* (2005) y Arellano *et. al* (2005) observaron algunas correlaciones entre la composición de isótopos estables de las salmueras producidas y las inyectadas en el Az-15.

Independientemente de los indicios mencionados, es de gran importancia económica averiguar si la zona Marítaro – La Cumbre del campo puede recargarse desde el pozo Az-15, porque sería muy positivo recargar esta zona del yacimiento para mantener su presión y prolongar la vida productiva de la misma. Para investigar posibles efectos de esta inyección sobre el yacimiento (por ejemplo, recarga, mantenimiento de la presión, interferencia térmica, etc.) la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE encargó a la Gerencia de Geotermia (GG) del Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE) el diseño, implementación y análisis de una prueba de trazadores en la zona Norte del campo geotérmico Los Azufres.

2. Método y materiales

Se escogieron seis pozos productores en el área Marítaro – La Cumbre para este estudio. Sus nombres, distancias al pozo Az-15 y producciones respectivas se presentan en la Tabla 1.

Pozo	Distancia al pozo Az-15 (m)	Agua (t/h)	Vapor (t/h)
Az-65D	793.45	70.44	37.70
Az-41	1,577.58	0.00	13.08
Az-04	1,430.59	29.25	38.18
Az-30	1,696.94	0.00	21.25
Az-28	1,965.20	11.75	70.62
Az-66D	1,966.48	0.00	35.08

Tabla 1. Distancias al pozo inyector y producción de los pozos monitoreados

Cinco de estos pozos y el inyector Az-15 se localizan en el graben delimitado por las fallas Marítaro y La Cumbre (Fig. 1), y uno, el Az-41, en el bloque elevado delimitado por las fallas La Cumbre y El Chino.

Los registros de presión, temperatura y flujo demuestran que existe sólo una zona de inyección en el pozo Az-15, localizada a 2049 msnm. Los intervalos ranurados de los pozos productores considerados, exceptuando el Az-41 y el Az-28, se encuentran entre 1900 y 850 msnm, significativamente más profundo que la zona de inyección. Az-41 es un pozo relativamente somero con un intervalo ranurado entre 2561 y 2658 msnm, aproximadamente 500 m por encima de la elevación de inyección. Y el Az-28, un pozo profundo, tiene intervalos ranurados entre 2141 y 1662 msnm y entre 1469 y 1185 msnm, por lo que la parte más somera del intervalo ranurado superior comprende la elevación de inyección.

Nótese que solamente tres de los pozos designados producen líquido, mientras que los seis producen vapor. Por ello, se decidió utilizar dos trazadores en este estudio, uno para trazar la fase líquida y otro para trazar la fase vapor.

Para escoger los trazadores apropiados consideramos los requerimientos usuales: concentración despreciable en fluido del yacimiento, estabilidad química y térmica a condiciones de yacimiento, bajo límite de detección, ecológicamente benigno, logística razonablemente simple, disponibilidad comercial y precio accesible. Un elemento importante para la selección de los trazadores fue la temperatura de yacimiento: en el área de interés es de 280-300° C en la zona profunda predominada por líquido, y menor a menores profundidades (R.M. Barragán, 2005, comunicación privada).

En años recientes varios autores (e.g., Adams, 1995; Adams *et al.*, 2000; Rose *et al.*, 2001; Rose *et al.*, 2002; y otros) investigaron trazadores geotérmicos de fase líquida. La mayoría de los trazadores investigados resultaron térmicamente inestables o marginalmente estables a 300° C. Por lo mismo, nuestras opciones se vieron considerablemente reducidas. Conservadoramente escogimos el compuesto ecológicamente benigno 1,3,6-trisulfonato de naftaleno (1,3,6-tsn) como trazador de fase líquida, por su alta estabilidad química y térmica (e.g., Rose *et al.*, 2001, 2002), bajo límite de detección, disponibilidad comercial, costo accesible y simple logística de campo. El límite de detección del 1,3,6-tsn es aproximadamente 0.2 ppb por cromatografía de líquido convencional (e.g., Rose *et al.*, 2001).

Los trazadores geotérmicos de fase vapor fueron investigados por varios autores también en años recientes (e.g., Adams, 1995; Adams *et al.*, 2000; Adams *et al.*, 2001). También en este caso muchos de los candidatos considerados resultaron inestables o marginalmente estables a 300° C. 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.

El 1° de Septiembre de 2005, a las 13:02 horas comenzó la inyección de 94.2 kg de SF₆ en el pozo Az-15. Esta operación duró 12 horas 40 minutos. La concentración media de SF₆ durante la inyección fue de aproximadamente 52 ppm. Ya que la solubilidad del SF₆ a temperatura ambiente es aproximadamente 7 ppm, cerca del 14% de este trazador fue inyectado en solución y el resto como burbujas en el líquido. El 2 de Septiembre de 2005, a las 02:05 horas se inyectaron 200 kg de 1,3,6-tsn disueltos en 1100 litros de agua separada. Esta operación de inyección duró aproximadamente 5 minutos. Por lo que la concentración media de 1,3,6-tsn durante la inyección fue de aproximadamente 15,650 ppm. Durante la inyección de los trazadores el gasto de inyección fue de 39.44 kg/s, y su temperatura aproximadamente 30° C.

Los seis pozos productores fueron muestreados con frecuencia decreciente: dos veces por día durante la primera semana, diariamente durante la segunda semana, tres veces por semana por las siguientes siete semanas, dos veces por semana por las siguientes dos semanas, y una vez por semana posteriormente. El muestreo comenzó aproximadamente 13 horas 30 minutos después de completar las operaciones de inyección de los trazadores. El día 8 de Junio de 2006 se suspendió el muestreo por común acuerdo entre CFE e IIE.

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 vaporducto o del cabezal del pozo, en este caso por medio de un separador transportable. Las muestras de líquido se colectaron en botellas plásticas de 60 ml, en la salida de agua del separador.

3. Resultados y discusión

Al final del texto se presentan las curvas de residencia y de recuperación de cada trazador en los seis pozos productores, durante los 279 días que duró el muestreo. Los pozos se presentan en orden de distancia creciente al pozo inyector.

3.1 Pozo Az-65D

En el pozo Az-65D, el más cercano al pozo inyector, ambos trazadores llegaron rápidamente, el SF₆ en horas y el 1,3,6-tsn en 3.26 días (Fig. 2), que implica una velocidad máxima de este trazador de 10.14 m/h. Ambos trazadores presentan una serie de picos, que reflejan la conocida naturaleza fracturada de la permeabilidad en este yacimiento. Cada pico se interpreta como el resultado de la existencia de una fractura o “canal” que conduce flujo entre ambos pozos. Como puede observarse, la forma general y los picos en ambas curvas de residencia correlacionan muy bien. Estas correlaciones y la llegada prácticamente simultánea de ambos trazadores indican que ambos llegaron al pozo productor, o a sus inmediaciones, disueltos en el líquido.

La recuperación del trazador de fase líquida no se había estabilizado en los 279 días de observaciones disponibles (Fig. 2). La curva de residencia presenta una larga cauda con valores significativos de concentración, a partir de ~65 días (Fig. 2) que sugiere que la salmuera inyectada se dispersa sobre un área considerable del yacimiento. Como al suspenderse el muestreo la recuperación de este trazador crece con un ritmo de $m = 0.0131$ %/día (Fig. 2), la recuperación de 6.1% registrada a los 279 días constituye una cota inferior de la recuperación total que eventualmente se alcanzará en este pozo.

En este pozo la recuperación de SF₆ está prácticamente estabilizada, aunque creciendo muy lentamente, en aproximadamente 0.048% a los 279 días (Fig. 3). Para el mismo tiempo transcurrido, la recuperación de tsn era de aprox. 6.09% (Fig. 5), dos órdenes de magnitud mayor, y creciendo significativamente. En este pozo la recuperación del trazador 1,3,6-tsn es al menos dos órdenes de magnitud mayor que la de SF₆.

Podemos concluir que: la salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-65D; esta recarga se efectúa tanto en fase líquida como en fase vapor; la mayor parte de la recarga se efectúa en forma de líquido, y representa como mínimo 6.09% del gasto inyectado; y la recarga por vapor constituye sólo el 0.048% del gasto inyectado.

3.2 Pozo Az-04

En este pozo, segundo en orden de distancia creciente al pozo inyector (Tabla 1), se registró también el arribo de ambos trazadores. A diferencia de lo observado en Az-65D, en este pozo el tiempo de arribo de ambos trazadores difiere considerablemente. El trazador de fase vapor arribó en horas, mientras que el tiempo de arribo del trazador de fase líquida resultó 45.48 días (Fig. 5), que implica una velocidad máxima de este trazador de 1.31 m/h. Nuevamente se manifiesta la naturaleza fracturada del yacimiento en una serie de picos en las curvas de residencia de cada trazador (Figs. 5-7).

En este caso las correlaciones entre las curvas de residencia de ambos trazadores son mucho menos marcadas que en el pozo Az-65D (Fig. 7). Sin embargo, parece existir correlación entre los tres grandes

picos que presenta la curva de SF_6 y los picos que registra para tiempos similares la curva de 1,3,6-tsn. Estas correlaciones indican probablemente que los grandes picos de SF_6 se generaron por el arribo de grandes baches de agua, con trazador gaseoso disuelto en los mismos, a través de tres fracturas o “canales” que aportan mayormente líquido.

En este pozo tampoco se había estabilizado la recuperación del trazador de fase líquida al suspenderse el muestreo (Fig. 5). Por lo tanto, la recuperación registrada al suspenderse el muestreo, 0.90% (Fig. 5), representa sólo una cota inferior de la recuperación total esperada.

La recuperación de SF_6 parecía haberse estabilizado en $1.37e-03\%$ al suspenderse el muestreo (Fig. 6).

En este caso el porcentaje de trazador líquido recuperado es también mucho mayor que el de trazador de fase vapor, aproximadamente tres órdenes de magnitud.

Concluimos que: la salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-04; esta recarga se efectúa tanto en fase líquida como en fase vapor; la mayor parte de la recarga se efectúa en forma de líquido, y representa como mínimo 0.90 % del gasto inyectado; y la recarga por vapor constituye como mínimo $1.37e-03$ % del gasto inyectado.

3.3 Pozo Az-41

Este pozo, el tercero en orden de distancia creciente al pozo inyector (Tabla 1), sólo produce vapor. En los primeros cinco días después de la inyección se registró un pico de SF_6 con un máximo de $2.4e-11$ gr/gr (Fig. 8). A este le siguió un largo período en el que se continuó registrando muy pequeñas concentraciones de SF_6 . Posteriormente, a los 70 días después de la inyección se registró un segundo pico con un máximo de $7.2e-10$ gr/gr, seguido de otro lapso en que se registraron muy pequeñas cantidades de SF_6 . A los 101 días después de la inyección se registró un tercer pico con un máximo de $2.4e-10$ gr/gr. Este fue seguido a los 130 días por otro pequeño pico con un máximo de $2.0e-12$ gr/gr. Se manifiestan así al menos tres “canales” que comunican ambos pozos, y una comunicación mas difusa asociada con la recepción de las bajas concentraciones de SF_6 durante los largos períodos entre los picos.

Es interesante notar que este pozo, a diferencia del resto de los pozos en los que se registró el arribo de los trazadores, se localiza en el bloque elevado bordeado por las fallas La Cumbre y El Chino (Fig. 1). Antes de este estudio se especulaba que la falla La Cumbre podría actuar como una barrera, impidiendo la recarga del pozo Az-41 desde el inyector Az-15. Los resultados que se presentan en la Fig. 8 prueban concluyentemente que ambos pozos están conectados. Aún si la falla La Cumbre actuara como barrera, la conexión podría ser vía esta falla y después por la falla Dorada (Fig. 1).

Otra particularidad interesante es que el intervalo ranurado de este pozo está entre 2,561 y 2,658 m.s.n.m, aproximadamente 500 m por encima del intervalo de inyección en Az-15, que se encuentra a 2,049 msnm. Los resultados de este estudio comprueban que la salmuera fría inyectada en Az-15, que por tener mayor densidad que el fluido en el yacimiento tiende a fluir hacia estratos más profundos, ebulle a profundidad y el vapor generado fluye hacia regiones mas someras, hasta que eventualmente parte del mismo alimenta al pozo Az-41.

El porcentaje de SF₆ recuperado hasta 279 días después de la inyección parece haberse estabilizado en $1.48e-03\%$.

Concluimos que: la salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-41; esta recarga se efectúa sólo en fase vapor, que fluye desde profundidades significativamente mayores que la zona de alimentación de este pozo; y la recarga por vapor constituye como mínimo $1.48e-03\%$ del gasto inyectado.

3.4 Pozo Az-30

Este pozo, el cuarto en orden de distancia creciente al pozo inyector (Tabla 1), sólo produce vapor. En los primeros dos días después de la inyección se registró un estrecho pico de SF₆ con un máximo de $1.6e-09$ gr/gr (Fig. 9). Esta concentración de SF₆ es la máxima registrada en los seis pozos durante este estudio. Sobrepasa en 19.4 % la concentración máxima detectada en el pozo Az-65D, el más cercano al inyector. Después del pico inicial continuó detectándose SF₆, aunque en muy bajas concentraciones, hasta cumplirse 279 días. Los resultados de la Fig. 9 establecen que la inyección en el pozo Az-15 recarga al pozo Az-30.

Hasta los 279 días después de la inyección la recuperación de SF₆ en este pozo parecía haberse estabilizado, con mínimo crecimiento, en $6.3e-04\%$.

Concluimos que: la salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-30; esta recarga se efectúa sólo en fase vapor; y la recarga por vapor constituye como mínimo $6.3e-04\%$ del gasto inyectado.

3.5 Pozo Az-28

Este, el quinto pozo en orden de distancia al inyector (Tabla 1), produce mezcla agua-vapor. Ambos trazadores fueron detectados en este pozo. Como en el pozo Az-04, en este pozo el tiempo de arribo de ambos trazadores difiere considerablemente. El trazador de fase vapor arribó en horas, mientras que el tiempo de arribo del trazador de fase líquida resultó 186.91 días (Figs. 10-12), que implica una velocidad máxima de este trazador de 0.44 m/h. Nuevamente se manifiesta la naturaleza fracturada del yacimiento en una serie de picos en las curvas de residencia de cada trazador (Figs. 10-12).

Antes del arribo del trazador de fase líquida se registraron tres picos de SF₆ (Fig. 12), uno horas después de la inyección, el segundo aproximadamente entre 90 y 100 días y el tercero aproximadamente entre 125 y 155 días. Esto sugiere que los mismos arribaron por “canales” predominados por vapor. Las velocidades de arribo de estos picos de SF₆ son significativamente mayores que la velocidad de arribo del trazador de fase líquida, confirmando las observaciones previas de que las velocidades del flujo en “canales” que conducen mayoritariamente vapor son mayores que las del flujo en de los “canales” que conducen líquido.

En este pozo tampoco se había estabilizado la recuperación del trazador de fase líquida al suspenderse el muestreo (Fig. 10). En ese momento la curva de recuperación crecía rápidamente, lo que indica que la recuperación continúa siendo significativa después de los 279 días. Por lo tanto, la recuperación registrada al suspenderse el muestreo, 0.16% (Fig. 13), representa sólo una cota inferior de la recuperación total esperada.

La recuperación del trazador de fase vapor parecería haberse estabilizado al suspenderse el muestreo (Fig. 11). De cualquier manera, en este pozo se ha recuperado como mínimo 1.38×10^{-3} % (Fig. 14) del SF₆ inyectado.

En este caso el porcentaje de trazador líquido recuperado parece ser también mucho mayor que el de trazador de fase vapor, aproximadamente dos órdenes de magnitud.

Concluimos que: la salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-28; esta recarga se efectúa tanto en fase líquida como en fase vapor; la mayor parte de la recarga se efectúa en forma de líquido, y representa como mínimo 0.16 % del gasto inyectado; y la recarga por vapor constituye como mínimo 1.368×10^{-3} % del gasto inyectado.

3.6 Pozo Az-66D

<Insertar> Fig. 13. Curvas de residencia y recuperación de SF₆ en el pozo Az-66D

Este pozo, el sexto en orden de distancia al pozo inyector, produce sólo vapor. A pocas horas después de la inyección comenzó a recibirse un pico muy agudo que continuó con una larga cauda de aproximadamente 60 días de duración (Fig. 13). Posteriormente se registraron tres picos mas de diversas intensidades, atestiguando también en este caso la naturaleza fracturada del yacimiento. Los resultados de la Fig. 13 establecen que la inyección en el pozo Az-15 recarga al pozo Az-66D.

A los 279 días después de la inyección la recuperación de SF₆ en este pozo había alcanzado 4.31×10^{-4} %. La recuperación, aunque lentamente, continuaba creciendo (Fig. 13).

Concluimos que: la salmuera inyectada en el pozo Az-15 recarga el pozo Az-66D; esta recarga se efectúa sólo en fase vapor; y la recarga por vapor constituye como mínimo 4.31×10^{-4} % del gasto inyectado.

3.7 Recuperación de 1,3,6-trn

En la Tabla 2 se resumen algunos parámetros relacionados con los porcentajes de recuperación del trazador de fase líquida en los tres pozos en los que se detectó. Los tiempos de arribo del trazador se incrementan rápidamente con la distancia al pozo inyector. Correspondientemente, las velocidades de arribo disminuyen rápidamente con la distancia al mismo.

Pozo	Distancia (m)	Residencia (días)	Arribo (días)	Velocidad de arribo (m/h)	Porcentaje Recuperado (%)
Az-65D	793.45	278.91	3.26	10.14	6.10
Az-04	1,430.54	275.91	45.48	1.31	0.90
Az-28	1,965.20	278.91	186.91	0.44	0.16
TOTAL					7.16

Tabla 2. Trazador de fase líquida 1,3,6-trn

Los porcentajes de trazador recuperado en cada pozo que se presentan en la tabla corresponden a los tiempos de residencia enlistados en la misma. Como hemos visto, en ninguno de los tres casos se ha completado la recuperación del trazador (continuaban llegando cantidades significativas de trazador a

cada uno de los tres pozos), lo que dificulta la comparación entre estos resultados. Esto se debe a que en cada pozo el porcentaje de trazador recuperado, que es una función del tiempo desde la inyección, está en una etapa distinta de su eventual recuperación total, en razón de las diferentes características de la estructura de la permeabilidad entre el inyector y el mismo (distancia, número de “canales”, volumen, etc. de cada “canal”). Con los datos disponibles es imposible estimar cual va a ser la recuperación máxima que se alcanzará en cada pozo, que reflejará la contribución de lo que se inyecta en el pozo Az-15 a la producción de cada pozo.

Mas allá de esta incertidumbre inevitable, el porcentaje total de 1,3,6-tsn recuperado en los tres pozos hasta la suspensión del muestreo es 7.16%, como se muestra en la tabla. Como se discutió previamente, este porcentaje sólo es una cota inferior del porcentaje total de recarga esperado de estos tres pozos por la inyección en el pozo Az-15. En otras palabras, todo indica que estos tres pozos continuarán recibiendo cantidades significativas de 1,3,6-tsn y que los porcentajes de recuperación del trazador en cada pozo crecerán significativamente, con lo que el porcentaje total de recuperación también lo hará.

3.8 Recuperación de SF₆

En la Tabla 3 se resumen algunos parámetros relacionados con los porcentajes de recuperación del trazador de fase vapor en los seis pozos en los que se detectó.

Pozo	Distancia (m)	Residencia (días)	Porcentaje Recuperado (%)	Agua (t/h)	Vapor (t/h)
Az-65D	793.45	279	4.82E-02	70.44	37.70
Az-04	1,430.54	279	1.37E-03	29.25	38.18
Az-41	1,577.58	279	1.48E-03	0.00	13.08
Az-30	1,696.94	279	6.38E-04	0.00	21.25
Az-28	1,965.20	279	1.38E-03	11.75	70.62
Az-66D	1,966.48	279	4.31E-04	0.00	35.08
TOTAL			5.35E-02		

Tabla 3. Trazador de fase vapor SF₆

En general, los pozos que producen agua y vapor recuperaron, hasta los 279 días después de la inyección, significativamente más SF₆ que los pozos que producen sólo vapor, como se destaca en color en la tabla. La excepción es el pozo Az-41 en el que se recuperaron cantidades similares a las correspondientes a los pozos Az-04 y Az-28.

En los pozos Az-65D y Az-04, se observaron correlaciones entre el arribo de picos de 1,3,6-tsn y el de picos de SF₆ (Figs. 4 y 7) que sugieren que fracciones importantes de SF₆ son transportadas por líquido hasta estos pozos o sus inmediaciones. Este no parece haber sido el caso en el pozo Az-28 (Fig. 12).

El total de SF₆ recuperado hasta 279 días es 5.35 e-02 %. Para el mismo tiempo transcurrido desde la inyección del trazador el total de 1,3,6-tsn recuperado en los tres pozos que producen agua (ver Figs. 2, 5 y 10) era igual a 7.16%. Evidentemente, las observaciones hasta el momento revelan que la recuperación porcentual del trazador de fase líquida es aproximadamente dos órdenes de magnitud mayor que la del trazador de fase vapor.

4. Sumario y conclusiones

La comisión Federal de Electricidad (CFE) inyecta salmuera residual en la zona norte del campo geotérmico de Los Azufres, en el pozo Az-15. Para investigar los posibles efectos de esta inyección sobre el yacimiento (recarga, mantenimiento de la presión, interferencia térmica, etc.) la Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos (GPG) de la CFE encargó a la Gerencia de Geotermia (GG) del Instituto de Investigaciones Eléctricas, el diseño, implementación, análisis e interpretación de un estudio con trazadores en el campo geotérmico de Los Azufres.

En dicha prueba se inyectaron dos trazadores en el pozo Az-15, uno para rastrear la fase líquida (1,3,6-trisulfonato de naftaleno) y el otro para trazar la fase vapor (hexafluoruro de azufre). La prueba se realizó con éxito, detectándose el arribo del trazador de fase líquida en los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28, mientras que el trazador de fase gaseosa se detectó en los pozos Az-65D, Az-04, Az-41, Az-28, Az-66D y Az-30.

Desde el día de la inyección de los trazadores se tomaron muestras de agua y vapor de los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28 (pozos productores de mezcla) y muestras de vapor de los pozos Az-41, Az-30 y Az-66D (pozos productores de vapor). A partir del 10 de Octubre de 2005 se tomaron también muestras del líquido inyectado en el pozo Az-15, para monitorear la posible recirculación del trazador. El muestreo continuó hasta el 8 de Junio de 2006, por lo que duró 279 días.

Podemos concluir que la detección del trazador de fase líquida 1,3,6-tsn en los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28, que producen mezcla agua-vapor, y del de fase vapor SF_6 en los mismos y en los pozos Az-41, Az-30 y Az-66D, que sólo producen vapor, ha demostrado fehacientemente que la inyección de salmuera de desecho en el pozo Az-15 recarga la zona de producción de dichos pozos.

En los tres pozos en los que se detectó el trazador de fase líquida continuaba recuperándose cantidades significativas de 1,3,6-tsn al suspenderse el muestreo. Los totales recuperados en los pozos Az-65D, Az-04 y Az-28 hasta 279 días después de la inyección fueron respectivamente 6.1%, 0.90% y 0.16%, para un total recuperado de 7.61%. Se concluye que estas cantidades representan cotas inferiores para las magnitudes de recuperación esperadas en cada uno de los pozos y para el total recuperado.

En los seis pozos en los que se detectó el trazador de fase vapor continuaba recuperándose, a bajo ritmo, SF_6 hasta los 279 días después de la inyección. Los totales recuperado en los pozos Az-65D, Az-04, Az-41, Az-30, Az-28 y Az-66D fueron respectivamente 4.82 $e-02\%$, 1.37 $e-03\%$, 1.48 $e-03\%$, 6.38 $e-04\%$, 1.38 $e-03\%$ y 4.31 $e-04\%$, para un total de 5.35 $e-02\%$. Se concluye que estas cantidades probablemente representan cotas inferiores para las magnitudes de recuperación esperadas en cada uno de los pozos y para el total recuperado.

Los pozos que producen agua y vapor recuperaron generalmente más SF_6 que los pozos que producen sólo vapor. La excepción es el pozo Az-41 en el que se recuperaron cantidades similares a las correspondientes a los pozos Az-04 y Az-28. El total de SF_6 recuperado hasta 279 días, igual a 5.35 $e-02\%$, es dos órdenes de magnitud menor que el total de 1,3,6-tsn recuperado al mismo tiempo, que ascendió a 7.61%. Estas observaciones sugieren que la recarga por líquido es mas importante que la recarga por vapor en los pozos estudiados.

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.

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, p. 1875-1880.
- Adams, M.C., Y. Yamada, M. Yagi, T. Kondo, 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, p. 3015-3019.
- Adams, M.C., J.J. Beall, S.L. Eneedy, P.N. Hirtz, P.M. Kilbourn, B.A. Koenig, R. Kunzman, J.L.B. Smith, 2001. Hydrofluorocarbons as geothermal vapor-phase tracers. *Geothermics*, v. 30, p. 747-775.
- Arellano, V. M., M. A. Torres, R.M. Barragán, F. Sandoval, R. Lozada, 2003. Chemical isotopic and production well data analysis for the Los Azufres (Mexico) geothermal field. *Geothermal Resources Council Trans.*, v. 27, p. 275-279.
- Arellano, V.M., M.A. Torres, R.M. Barragán, 2005. Thermodynamic evolution (1982-2002) of the Los Azufres (Mexico) geothermal reservoir fluids. *Geothermics*, v. 34, p. 592-616.
- Barragán, R.M., V.M. Arellano, E. Portugal, F. Sandoval, 2005. Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, δD) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, v. 34, 527-547.
- Rose, P.E., W.R. Benoit, P.M. Kilbourn, 2001. The application of polyaromatic sulfonates as tracers in geothermal reservoirs. *Geothermics*, v. 30, p. 617-640.
- Rose, P.E., V. Capuano, A. Peh, P.M. Kilbourn, C. Kasteler, 2002. The use of naphthalene sulfonates as tracers in high temperature geothermal systems. *Proceedings of the 23rd Annual PNOC-EDC Geothermal Conference*, p. 53-58.

(Figuras 2 a 13 en las páginas siguientes.)

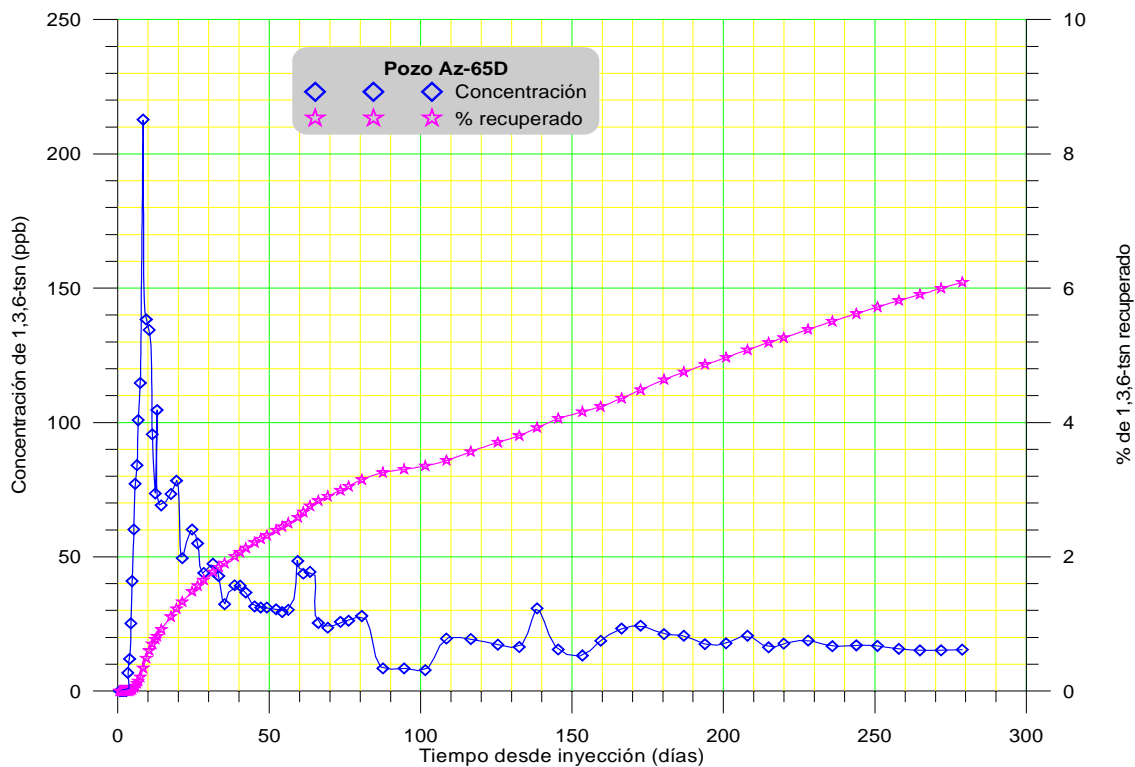


Fig. 2. Curvas de residencia y recuperación de 1,3,6-tsn en el pozo Az-65D

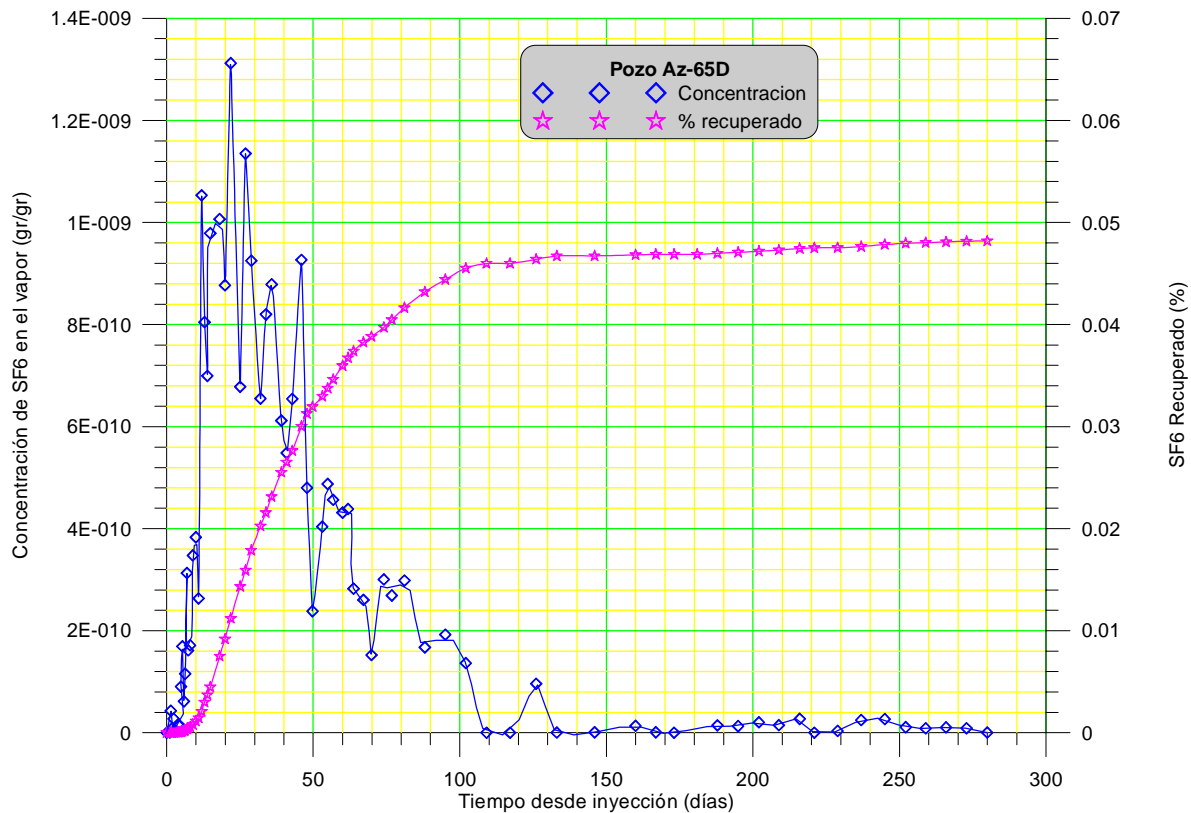


Fig. 3. Curvas de residencia y recuperación de SF_6 en el pozo Az-65D

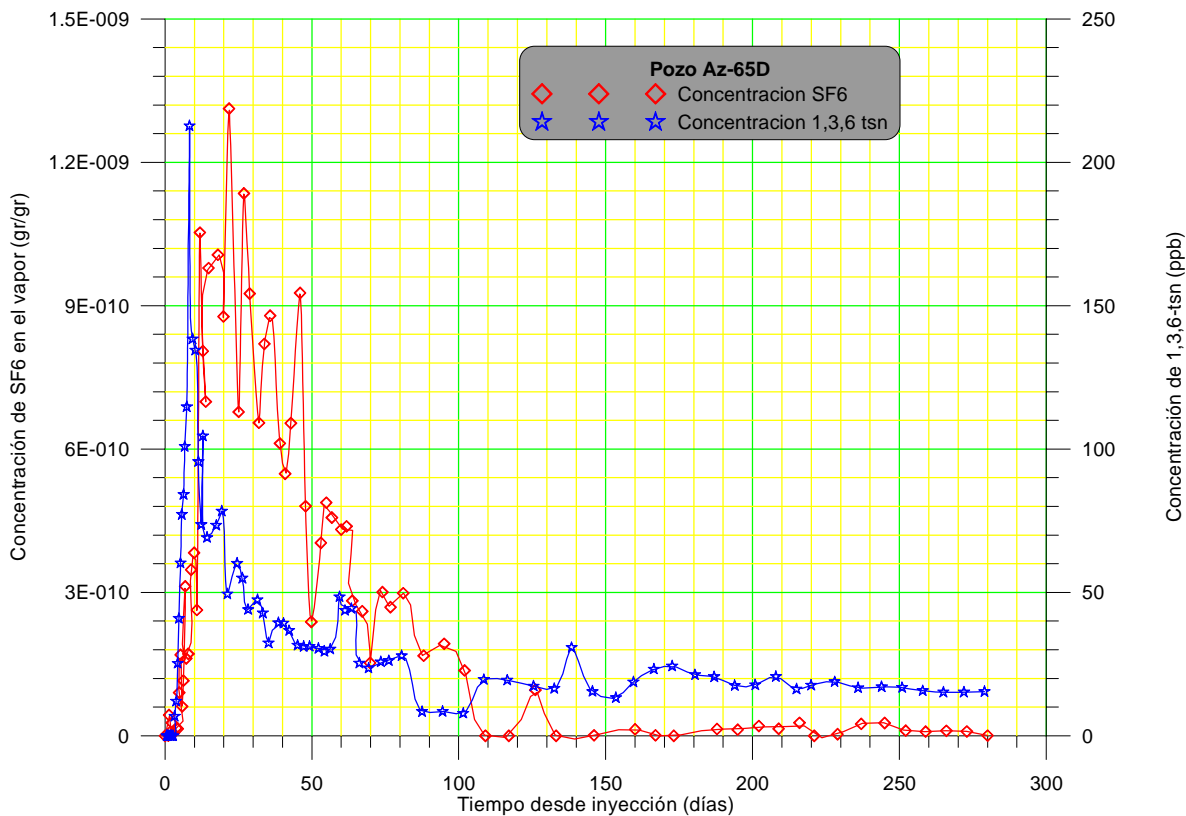


Fig. 4. Comparación de curvas de residencia de SF6 y 1,3,6-trsn en el pozo Az-65D.

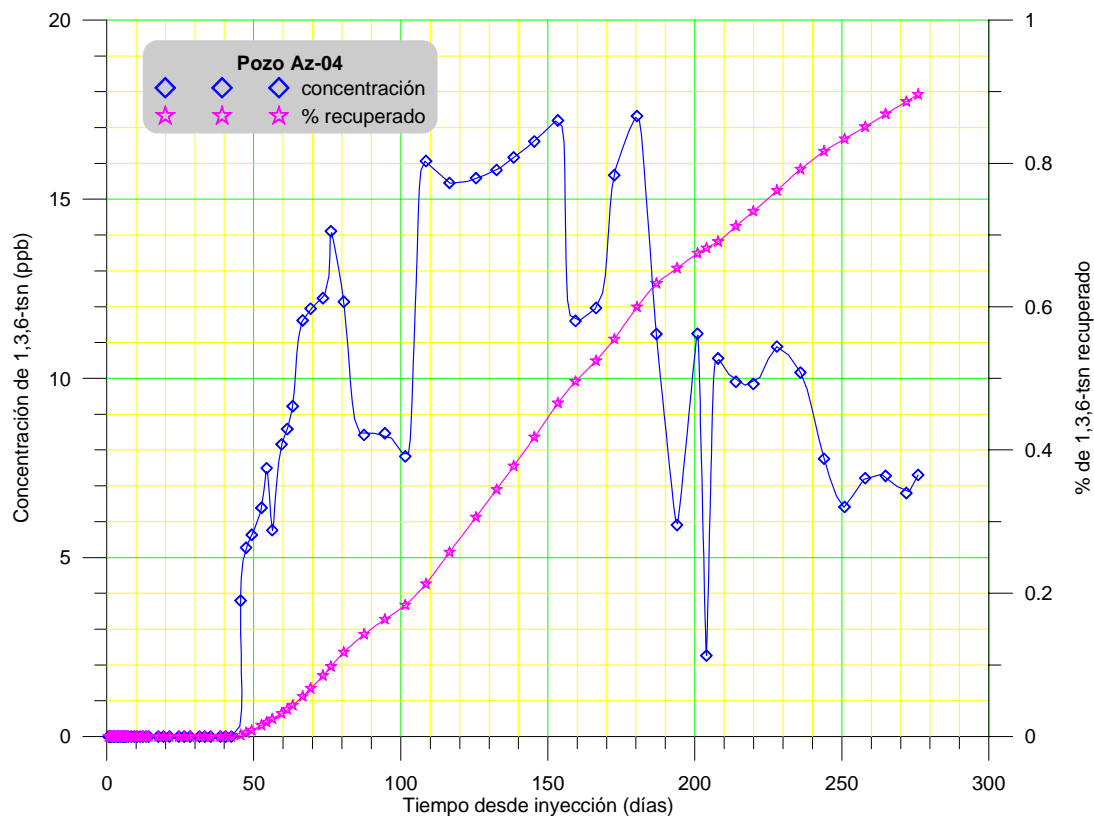


Fig. 5. Curvas de residencia y recuperación de 1,3,6-trsn en el pozo Az-04

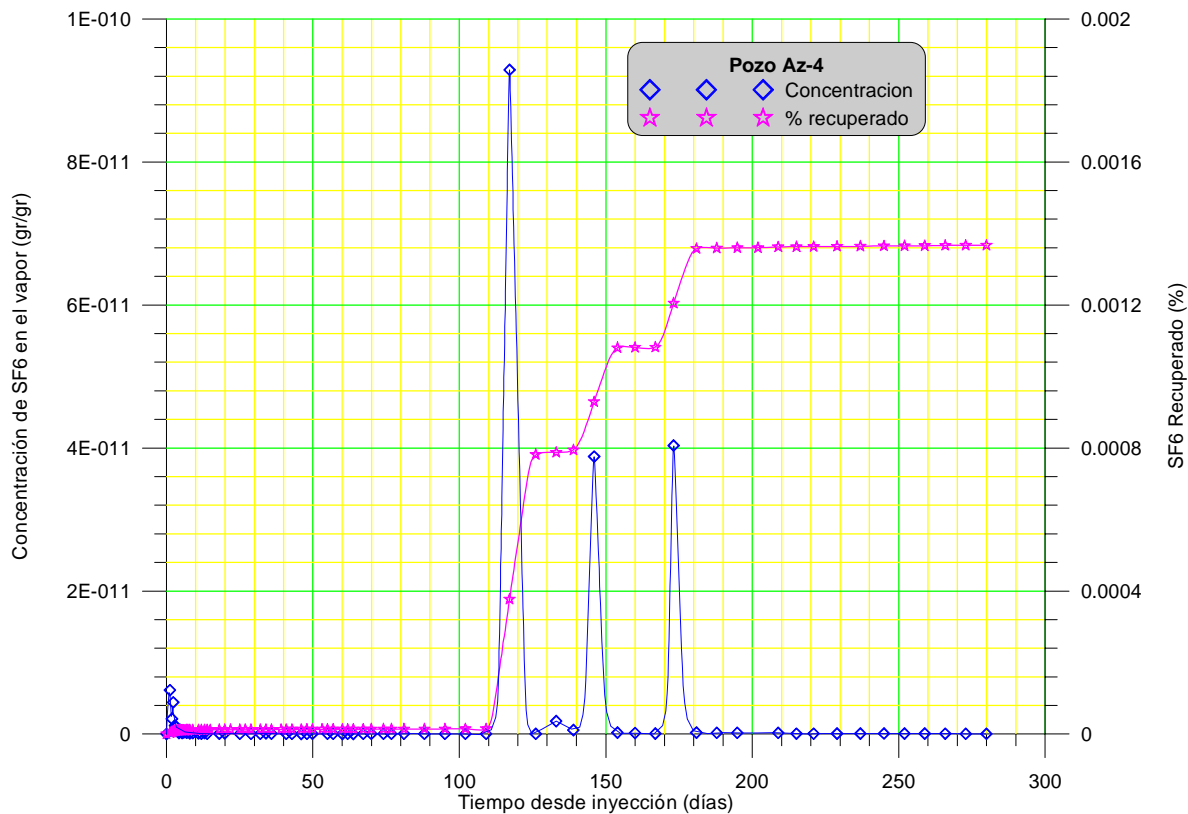


Fig. 6. Curvas de residencia y recuperación de SF6 en el pozo Az-04

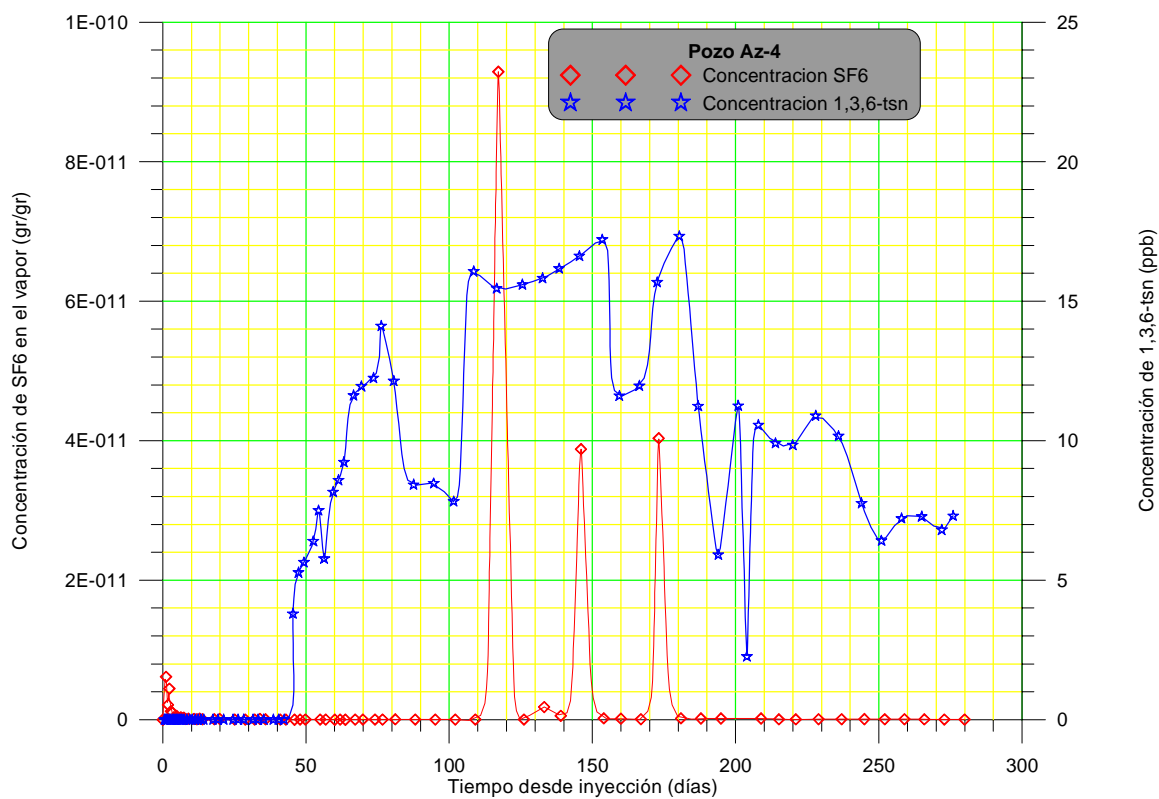


Fig. 7. Comparación de curvas de residencia de SF6 y 1,3,6-trsn en el pozo Az-04

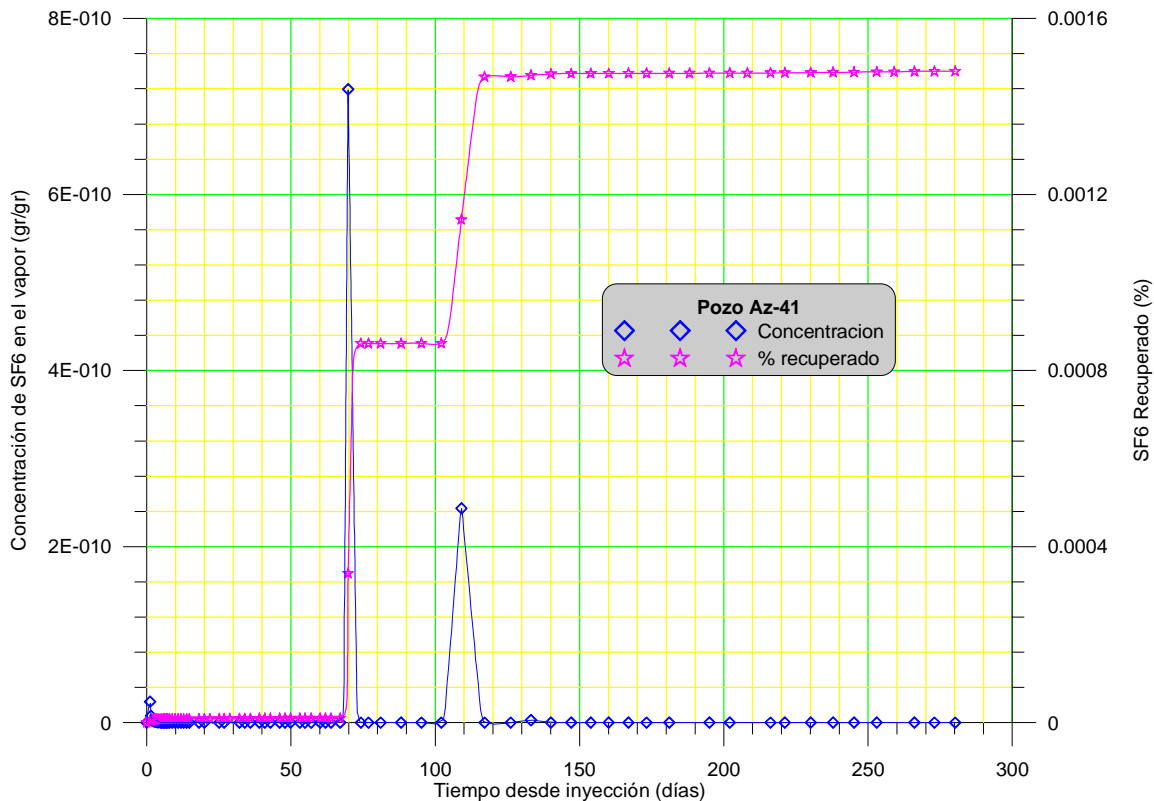


Fig. 8. Curvas de residencia y recuperación de SF6 en el pozo Az-41

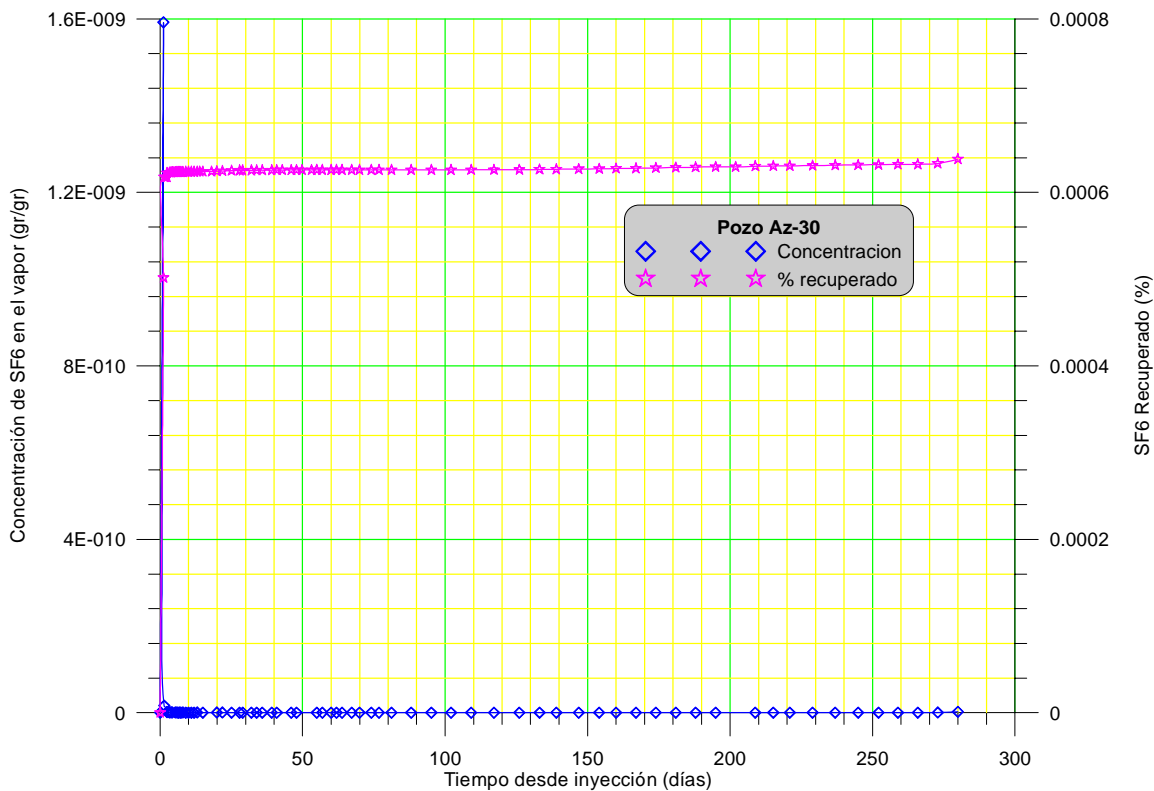


Fig. 9. Curvas de residencia y recuperación de SF6 en el pozo Az-30

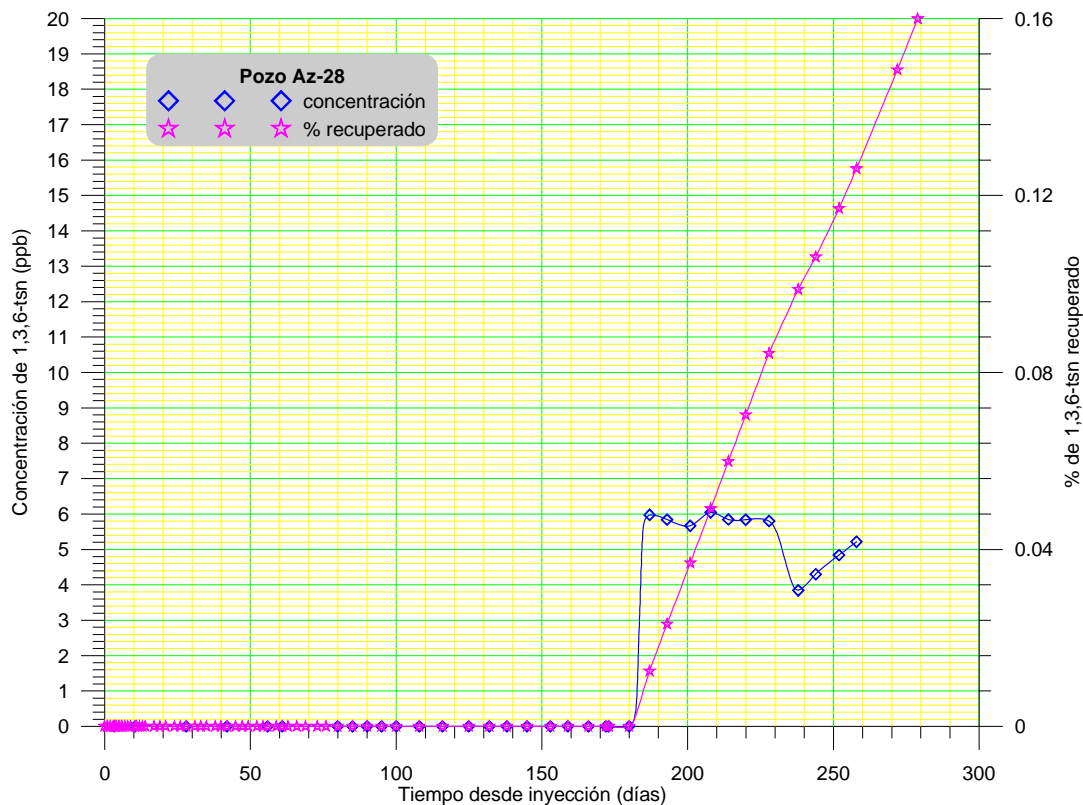


Fig. 10. Curvas de residencia y recuperación de 1,3,6-tsn en el pozo Az-28

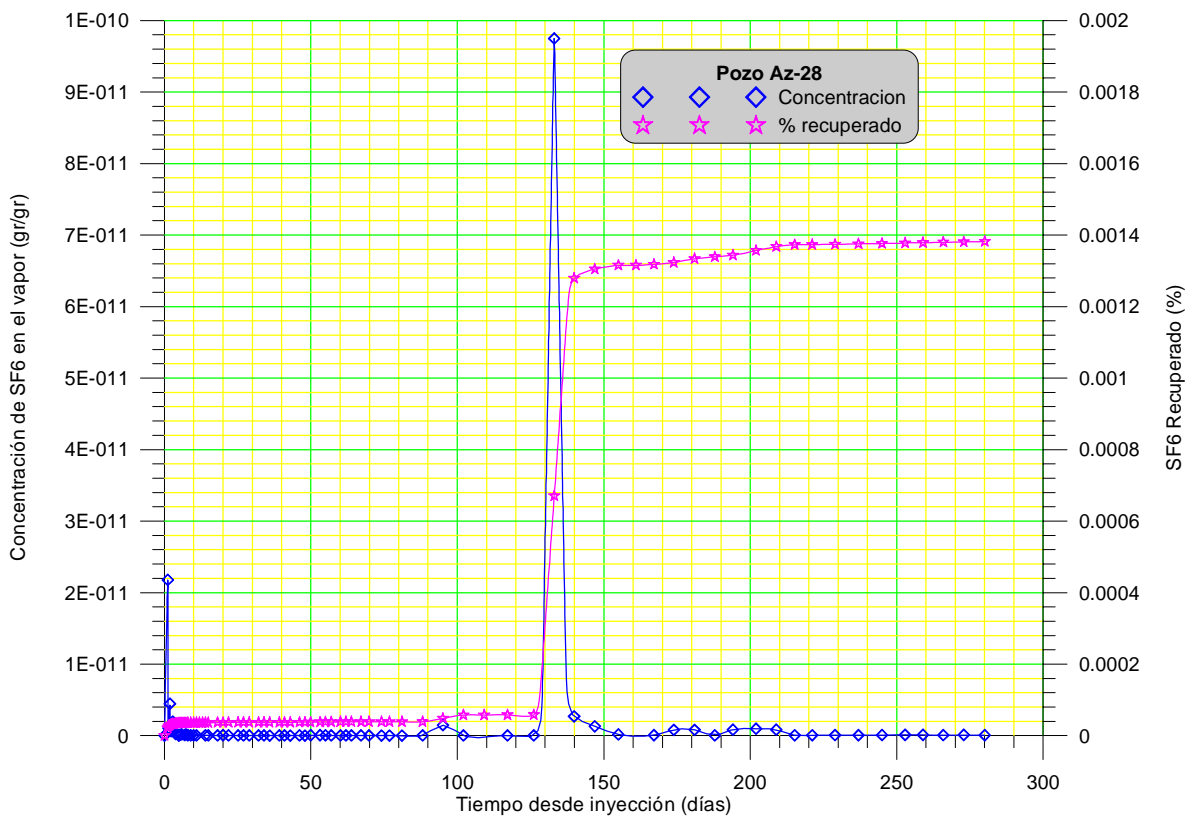


Fig. 11. Curvas de residencia y recuperación de SF6 en el pozo Az-28

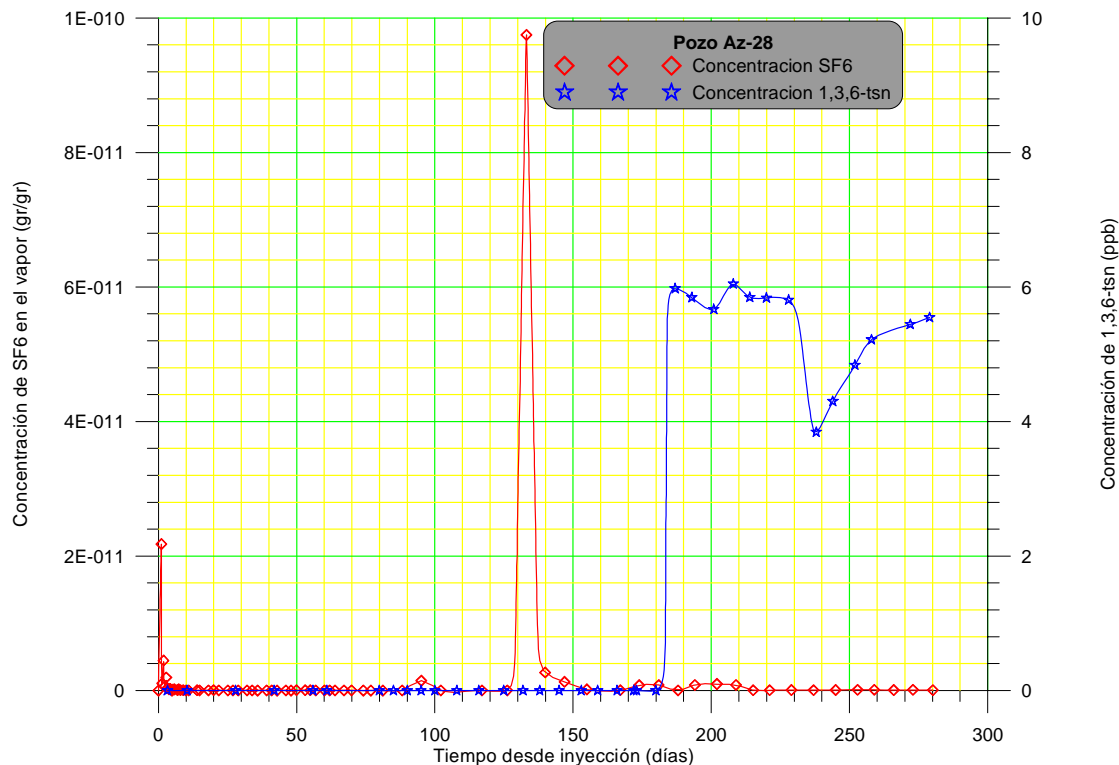


Fig. 12. Comparación de curvas de residencia de SF6 y 1,3,6-tris en el pozo Az-28

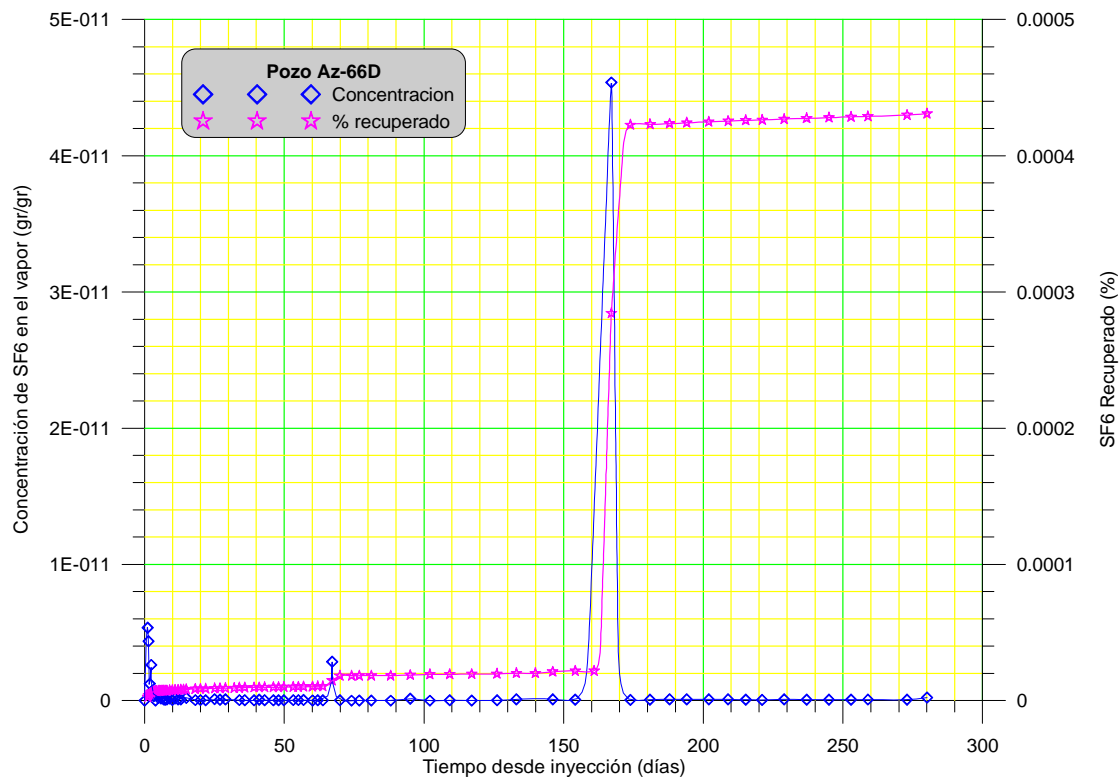


Fig. 13. Curvas de residencia y recuperación de SF6 en el pozo Az-66D