

Comportamiento isotópico ($\delta^{18}\text{O}$, δD) y de las descargas gaseosas de pozos del campo geotérmico de Los Azufres (Méjico), 2010-2011: Evidencia de procesos de condensación

Rosa María Barragán R.¹, Víctor Manuel Arellano G.¹, Afonso Aragón A¹, Siomara López B.¹, Emigdio Casimiro² y Lisette Reyes D.²

¹Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, 62260, México, correo: rmb@iie.org.mx. ²Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectricos, Residencia Los Azufres, Campamento Agua Fría, Michoacán, México

Resumen

El monitoreo isotópico de pozos ($\delta^{18}\text{O}$, δD) que se realiza en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., para investigar los efectos de la explotación en el yacimiento, ha permitido identificar la producción de fluidos isotópicamente más ligeros a partir de 2009-2010 los cuales se notaron en principio en la zona norte del campo (pozo AZ-51) y posteriormente se han identificado en el centro del campo así como en el norte y al este en la zona sur. Con el objeto de explicar estos fenómenos se realizó un análisis de datos de gases empleando equilibrio FT-HSH2 (D'Amore, 1998). Este método provee estimaciones de dos parámetros de gran importancia: la fracción de vapor y la temperatura del yacimiento. De acuerdo con los resultados en forma gráfica, en 2010 se observa gran dispersión en ambos parámetros con temperaturas de yacimiento entre $<225^\circ\text{C}$ (AZ-68D) y hasta 310°C (AZ-13, AZ-32) y contenidos de vapor de 0 (AZ-51) y >0.5 (AZ-37). En contraste, desde 2011 los datos principalmente de los pozos de la zona norte muestran menor dispersión en cuanto a su contenido de vapor, aunque aún se nota amplia una variación en sus temperaturas de yacimiento. Este comportamiento puede interpretarse como un proceso de condensación de vapor, mismo que se ha extendido a otras zonas del yacimiento. Por otra parte, la relación molar N_2/Ar ha decrecido a valores menores de 39 en algunos pozos indicando la ebullición de salmueras desgasificadas compatibles con fluidos de reinyección.

Palabras clave: Geoquímica de gases, isotopía, FT-HSH2, procesos de condensación, temperatura del yacimiento.

Isotopic behavior ($\delta^{18}\text{O}$, δD) and gas discharges of wells of the Los Azufres (Mexico) geothermal field, 2010-2011: Evidences of condensation processes

Abstract

Isotope monitoring ($\delta^{18}\text{O}$, δD) of the Los Azufres geothermal field fluids has been useful to identify the main effects of exploitation on the reservoir. Data for 2009-2010 showed that isotopically lighter fluids were produced first in the northern zone (well AZ-51) and subsequently in the center of the field, and also in the north and the east of the southern zone. In order to explain such phenomena, gas data were analyzed by using the FT-HSH2 method (D'Amore, 1998). By means of FT-HSH2 equilibria both the reservoir temperature and the reservoir steam fraction are estimated. Graphical results for 2010 showed a large data scattering in both parameters with temperatures between $<225^\circ\text{C}$ (AZ-68D) and 310°C (AZ-13, AZ-32) and steam fractions between 0 (AZ-51) and >0.5 (AZ-37). In contrast, 2013 data from the north zone wells showed less scattering and smaller steam fractions compared to these obtained in 2010 but still a large variation in reservoir temperatures. This behavior suggests a condensation process

which has also affected other zones of the reservoir. Besides, molar N₂/Ar ratios have decreased to values <39 in some wells indicating boiling of de-gassed brines compatible with reinjection fluids.

Keywords: Gas geochemistry, isotopy, FT-HSH2, condensation processes, reservoir temperature.

1. Introducción

El yacimiento del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, con una capacidad instalada de 191.6 MWe (Flores-Armenta et al., 2014) se ha estudiado de manera sistemática empleando técnicas multidisciplinarias desde el inicio de su desarrollo con el propósito de investigar cuál es el impacto ocasionado en el mismo por la extracción y la reinyección de fluidos y prestar así apoyo en la búsqueda de políticas óptimas de explotación (Arellano et al., 2005; Barragán et al., 2005a). Estas técnicas incluyen el análisis tanto de la información química de fluidos producidos (agua y vapor) como de datos de producción de pozos y de gastos de reinyección. Una de las herramientas que se han utilizado de manera exitosa es el monitoreo isotópico ($\delta^{18}\text{O}$, δD) de los fluidos producidos, el cual ayuda a dilucidar fenómenos de yacimiento tales como mezcla de fluidos, ebullición, etc. (Arellano et al., 2003; 2005, 2012, Barragán et al., 2009; 2010). Además, de 44 pozos productores en la actualidad (Figura 1) 17 producen vapor en el cabezal y 9 producen mezcla con fracciones de vapor >0.80. Esto justifica la importancia de analizar la composición química de las descargas gaseosas de los pozos para obtener información de la dinámica del yacimiento.

En este trabajo se interpretaron datos químicos e isotópicos de fluidos de pozos para investigar fenómenos de yacimiento que aproximadamente a partir de 2010 han diluido los fluidos originales. Los resultados muestran que la dilución puede deberse a procesos de condensación, mientras que la relación N₂/Ar de las descargas de los pozos indica ebullición de fluidos desgasificados que podrían ser de reinyección.

2. Metodología

La metodología empleada en el análisis de la información geoquímica de fluidos de pozos (Barragán et al., 2005a; 2009) consiste en: (a) Calcular valores promedio anuales de cloruros en la descarga total y de los geotermómetros Na/K (Nieva y Nieva, 1987) en los pozos que producen líquido, y FT-HSH2 (Barragán et al., 2005b) en los pozos productores de vapor; (b) Estimar las concentraciones de CO₂ en la descarga total y en la fase líquida del yacimiento utilizando la subrutina SCEXVAP (Nieva et al., 1987); (c) Calcular las saturaciones volumétricas de líquido (D'Amore y Truesdell, 1995) utilizando las estimaciones de temperatura y los excesos de vapor proporcionados por el programa SCEXVAP; (d) Obtener composiciones isotópicas de las descargas totales de los pozos y (e) elaborar mapas de las distribuciones de los parámetros. Los datos geoquímicos se interpretaron junto con las tasas de reinyección para investigar sus efectos en los pozos productores, siguiendo la metodología dada por D'Amore y Truesdell (1995), Truesdell et al. (1995), D'Amore (1998), Arellano et al. (2003; 2005; 2012) y Barragán et al., (2002a; 2005a; 2006; 2010). Como referencia, en la Figura 2 se presentan las historias actualizadas de reinyección hasta 2013 en los pozos AZ-3, 7A, 8, 15, 52 y 61. Los pozos AZ-7A y 8 se localizan en la zona sur y los pozos AZ-3, 15, 52 y 61 se localizan en la zona norte (Figura 1).

3. Resultados

En la Figura 3 se muestra el diagrama FT-HSH2 según datos de composición gaseosa promedio de fluidos de 2010. En la figura se observa una gran dispersión de los datos debido a las características heterogéneas de los fluidos del yacimiento en términos tanto de temperaturas de yacimiento como de fracciones de vapor de la mezcla de alimentación. Los valores de estos parámetros para los pozos AZ-13 y 32 localizados en la porción este de la zona norte denotan alta temperatura ($>310^{\circ}\text{C}$) y mínimas fracciones de vapor (~0.015). En los pozos AZ-18 y 26 de la zona sur también se observan altas temperaturas (~290°C) y mínimas fracciones de vapor (~0.05), lo que indica el ascenso importante de fluidos profundos en ambas zonas.

En la figura 3 los puntos que denotan temperaturas menores ($<250^{\circ}\text{C}$) se relacionan con el ingreso de fluidos de reinyección (AZ-51 en la zona norte y AZ-2A en la zona sur). En los pozos de vapor con altas fracciones de vapor, como AZ-17 y 37, los retornos de reinyección alcanzan las zonas productoras en fase vapor (Barragán et al., 2011). Los resultados de equilibrio gaseoso FT-HSH2 obtenidos en 2011 (Figura 4) en pozos de la zona norte muestran menor dispersión en cuanto a sus contenidos de vapor además de presentar una tendencia de alineación que se interpreta como resultado de una mezcla de fluidos representativos del yacimiento (AZ-43) y fluidos con altos contenidos de retornos de reinyección (AZ-4, 42, 51). A medida que la temperatura disminuye las descargas de los pozos contienen una mayor proporción de retornos de reinyección.

Por otro lado, la dispersión de los datos que se nota en pozos de la zona sur se debe principalmente a los altos contenidos de vapor de los pozos AZ-17, 37 y 46, mientras los demás datos casi se alinean sugiriendo una mezcla entre fluidos calientes (AZ-26) y fluidos ricos en retornos de reinyección (AZ-16). Los cambios que se observan entre los datos de 2010 y 2011 pueden deberse a procesos de condensación en el yacimiento y/o a la entrada de vapor condensado. Los procesos de condensación diluyen la sílice del agua producida y el geotermómetro de sílice proporcionará estimaciones de temperatura menores que los geotermómetros basados en la relación Na/K (Truesdell et al., 1995). Los procesos de condensación pueden deberse a la reinyección en frío en los casos en que el fluido reinyectado no alcanza a calentarse lo suficiente en su trayecto en el subsuelo antes de arribar a las zonas productoras. Este podría ser el caso de pozos que se han estimulado recientemente, en los que se ha logrado un aumento importante de permeabilidad (Flores-Armenta et al., 2006; Flores-Armenta, 2010; Morales, 2013; Flores-Armenta et al., 2014).

En la Figura 5 se muestran las distribuciones de (a) cloruros, (b) temperaturas de yacimiento, (c) CO₂ en el líquido del yacimiento y (d) fracciones de saturaciones volumétricas de líquido en la formación; de acuerdo a datos de 2011. Debido a que los fluidos de reinyección se evaporan al ambiente, normalmente son muy salinos e isotópicamente ($\delta^{18}\text{O}$, δD) enriquecidos. Por lo tanto, en pozos que producen retornos de reinyección en fase líquida, la salinidad se incrementa.

Como se puede ver en la Figura 5(a) los valores más altos de cloruros, ($\geq 3500 \text{ mg/kg}$) se observan en el pozo AZ-2A, debido al efecto de la reinyección, mientras que los cloruros de la descarga del pozo AZ-16, también productor de retornos de reinyección, son poco menores de 2500 mg/kg, y en ambos se ha estimado una alta contribución de fluidos de reinyección a través de los cloruros de sus descargas (Barragán et al., 2002b, 2014). Los cloruros decrecen aproximadamente del suroeste hacia la parte centro norte del campo. En la zona sur los cloruros decrecen hacia el este (pozo AZ-26), donde se localizan valores mínimos. Las isolíneas también muestran mínimos valores en la parte central norte de

la zona norte (pozos AZ-57, AZ-66D, AZ-19 y AZ-28) así como en el AZ-9A, en donde probablemente ingresan fluidos de menor temperatura y salinidad. En contraste, en los pozos AZ-4 y AZ-30 parece que los cloruros relativamente altos, considerando la inflexión de la isolínea de 1000 mg/kg, se deben a una mezcla con fluidos de reinyección.

Con respecto a 2010, los cloruros en los pozos AZ-51 y AZ-68D se han incrementado. En el pozo AZ-68D se interpreta el ingreso de fluidos de menor temperatura (reinyección) por medio del patrón de comportamiento: $T_{\text{SiO}_2} > T_{\text{Na/K}}$; mientras que en el pozo AZ-51 ambas temperaturas coinciden indicando que el pozo produce desde una fase líquida en equilibrio.

De acuerdo con la Figura 5(a) en 2011 la concentración de cloruros para el pozo AZ-9 es de aproximadamente 500 mg/kg mientras que en 2010 su concentración era cercana a 1000 mg/kg (Barragán et al., 2010) lo que indica que los fenómenos de dilución hallados en 2010 en el pozo AZ-9 aún son dominantes (Barragán et al., 2012). En principio la dilución se atribuyó a una disminución en las tasas de reinyección en los pozos AZ-15 durante 2010 y AZ-3 durante parte de 2010 (Figura 2). Sin embargo, se realizaron operaciones de estimulación de pozos (AZ-51, 25 y 68D entre otros) que incrementaron su permeabilidad y eso probablemente favoreció la entrada de fluidos un poco diferentes al yacimiento. La producción de fluidos relativamente más diluidos también se notó en el pozo AZ-25.

La reinyección en Los Azufres se efectúa a $\sim 40^\circ\text{C}$, por tanto, aunque los fluidos se calientan en contacto con la roca en su trayecto a las zonas productoras, es de esperarse que en pozos con presencia de retornos de reinyección las temperaturas estimadas mediante geotermómetros “de respuesta lenta” tienden a decrecer con el tiempo (Truesdell et al., 1995). En la Figura 5(b) se observa que las temperaturas de yacimiento mínimas son de alrededor de 240°C y se localizan en la parte oeste de la zona sur en los pozos AZ-2A y AZ-16. La temperatura en la zona sur se incrementa hacia el oriente hasta valores típicos de 290°C mientras que en el pozo AZ-18 se estimó una temperatura de 300°C . En la zona norte las temperaturas máximas ($\geq 300^\circ\text{C}$) se localizan al este (pozos AZ-5, AZ-13, AZ-32 y AZ-43), mientras que las mínimas ($\sim 260^\circ\text{C}$) se localizan al oeste (pozos AZ-42, AZ-65D), cerca de los pozos de reinyección así como en el pozo AZ-56Rep. Como se mencionó, las distribuciones de cloruros y de temperatura reflejan los efectos de la reinyección en el campo.

Los fluidos de reinyección están agotados en CO_2 en comparación con los fluidos del yacimiento. Por esto, la influencia de la reinyección también se nota en la distribución de CO_2 en la Figura 5(c). Como puede observarse en esta figura, en la parte oeste del campo se ubica la isolínea de cero, indicando la influencia de los fluidos reinyectores que son altamente desgasificados. Las isolíneas muestran incremento hacia el este en ambas zonas del campo. En la zona norte las concentraciones mayores (≥ 6 milimoles/mol) se hallan en los pozos AZ-5 y 43, aunque los valores típicos para una gran parte de la zona norte son de ~ 2 milimoles/mol y la tendencia de incremento es muy notable en la porción oriental.

En la zona sur la distribución de CO_2 muestra una tendencia de incremento desde cero en el oeste hacia el este, alcanzando los valores máximos en el pozo AZ-18 (>20 milimoles/mol). En esta zona se observa un gradiente homogéneo e importante en el que los pozos AZ-22, 35 y 62 se caracterizan por un contenido de ~ 4 milimoles/mol y los del área hacia el centro del campo (AZ-1A, 23 y 25) presentan concentraciones bajas, típicas de pozos de la zona norte. Como anteriormente se ha expuesto, los fluidos de reinyección se encuentran agotados en CO_2 por lo que mínimos contenidos indicarían mayor aporte de fluidos reinyectores. Por el contrario, altas concentraciones de CO_2 son representativas de

zonas con ascenso importante de fluidos profundos (pozos AZ-18, 26, 5, 13).

La distribución de saturación volumétrica de líquido en la formación correspondiente a 2011 se presenta en la Figura 5(d). Como puede verse, fracciones mínimas de saturación (≤ 0.1) se hallan en la zona sur, en la parte suroeste del campo (pozos AZ-2A, 37, 46 y 17), con un incremento radial y fracciones de hasta 0.6 en los pozos AZ-22 y 1A; mientras que en el pozo AZ-62 se encontró una saturación de 0.7. En el pozo AZ-25 se estimó una alta fracción de saturación, de 0.9. En la zona norte las saturaciones de líquido son bastante heterogéneas: desde bajas (< 0.02) en el pozo AZ-56Rep, hasta valores máximos en la parte central con $\geq 0.8\%$. Estos se localizan en los pozos AZ-5, 32, 43, 45, 28, 48 y 51. Fracciones de saturación por encima de 0.9 se hallaron en los pozos AZ-4, 19, 28A y 57, entre otros. Algunos de estos pozos fueron estimulados, por lo que las altas saturaciones de líquido se pueden correlacionar con el incremento en la permeabilidad.

Debido a que el fluido de reinyección está isotópicamente enriquecido, la influencia de la reinyección se nota por el enriquecimiento isotópico de las descargas de pozos. Como se ve en la Figura 6(a), los fluidos más enriquecidos en $\delta^{18}\text{O}$ ($\geq -2.5\text{\textperthousand}$) son los de los pozos AZ-2A y 16 en la parte suroeste del campo, donde se ubican los pozos de reinyección AZ-7A y 8, por lo que se correlacionan con efectos de mezcla con retornos de reinyección. Los gastos inyectados en 2011 en el pozo AZ-7A tuvieron un ligero incremento en comparación con 2010 (Figura 2), mientras que en el pozo AZ-8 la tendencia de incremento es más notable (Figura 2).

El $\delta^{18}\text{O}$ decrece de forma drástica a $-4.5\text{\textperthousand}$ hacia el centro de la zona sur (pozos AZ-17 y AZ-37), para enseguida incrementarse hacia el este con máximos en los pozos AZ-18, 22 y 62. Los valores decrecen hacia el pozo AZ-35 a $\sim -5\text{\textperthousand}$. En la zona sur, los pozos de la parte central (AZ-1A, 23 y 25) muestran valores mínimos de $\delta^{18}\text{O}$ ($\leq -5\text{\textperthousand}$). En la zona norte los valores más enriquecidos de $\delta^{18}\text{O}$ ($\geq -3.5\text{\textperthousand}$) se localizan en dos áreas, una al oeste (pozos AZ-4, AZ-42 y AZ-65D), lo que probablemente se deba a efectos de reinyección dada la ubicación de los pozos reinyectores, y la otra hacia el este donde se encuentran los pozos AZ-13, 69D y 32.

En la parte central norte, los valores de $\delta^{18}\text{O}$ son pobres, ($< -4.5\text{\textperthousand}$), por lo que es evidente la ocurrencia de fenómenos de dilución que pueden trazarse por las isolíneas de $\delta^{18}\text{O}$ de $\sim -5\text{\textperthousand}$ en el campo. Estas indican claramente el ingreso de fluidos menos salinos (vapor condensado), o bien la ocurrencia de fenómenos de condensación en el yacimiento. Los gastos de inyección en 2011 muestran un incremento importante en el pozo AZ-15 (Figura 2) con respecto a los datos de 2010, mientras que los gastos inyectados en el pozo AZ-3 decrecieron. El incremento en gastos de inyección en el pozo AZ-15 puede notarse en forma cualitativa en la distribución de $\delta^{18}\text{O}$ por la pequeña inflexión de la isolínea de $-3.5\text{\textperthousand}$ en el pozo AZ-4. De la misma forma, el efecto de la reinyección en el pozo AZ-52 sobre el pozo AZ-42 se nota en la ligera inflexión de la isolínea de $-3\text{\textperthousand}$. Las tasas de inyección en los pozos AZ-52 y 61 (Figura 2) parecen ser más constantes.

La distribución de δD en la Figura 6(b) muestra que los valores más enriquecidos se localizan en la parte suroeste del campo en los pozos AZ-2 A y 16, cercanos a los pozos de reinyección AZ-7A y 8. Las distribuciones también muestran tendencia de decrecimiento desde el suroeste hacia la parte central del campo (pozos AZ-1A, 23 y 25), tendiendo hacia valores $< -64\text{\textperthousand}$. Los valores típicos de δD de pozos de la zona sur en 2011 fueron de -62 y $-64\text{\textperthousand}$. En la zona norte los valores más enriquecidos de δD ($> -62\text{\textperthousand}$) se observan en el oeste (pozos AZ-42 y 65D) por efectos de reinyección. Se observa una

tendencia de decrecimiento a valores menores de -64‰ hacia la parte central de la zona norte, formándose una área de composición isotópica homogénea. Esta área incluye a los pozos AZ-57, 28, 30, 45, 66D, 48 y 51. Subsecuentemente, el δD se incrementa hacia el este, con máximo en el pozo AZ-13 y dejando al resto de pozos de la zona norte con composiciones de δD de entre -62 y -64‰.

Con el propósito de investigar la naturaleza de los fluidos relativamente diluidos producidos por algunos pozos, se estudió el comportamiento de la relación N_2/Ar de las descargas. En la Figura 7 se muestran las distribuciones de valores N_2/Ar hallados en (a) 2006 y (b) 2011. La presencia de vapor magmático entrando al yacimiento se nota por valores muy altos de esta relación, por ejemplo en el pozo AZ-18 de la zona sur. Los valores correspondientes a vapores magmáticos o gases andesíticos asociados con placas convergentes son entre 400 y >2000 (Giggenbach, 1980; 1991; Truesdell et al., 2003). En contraste, relaciones N_2/Ar menores que la relación propia de agua en equilibrio con aire (38 en mol) provienen de salmueras desgasificadas, ya que el N_2 es más volátil que el Ar a 300°C (Truesdell et al., 2003).

De acuerdo a la Figura 7(a), en 2006 la relación N_2/Ar se incrementa de oeste (<40) a este (>200), siendo esta distribución representativa de los efectos de la reinyección, dado que los valores más bajos (al oeste) concuerdan con la presencia de salmueras desgasificadas de reinyección al oeste del campo. Sin embargo, desde 2007 la tendencia usual se revirtió mostrando una tendencia de incremento hacia el oeste con mínimos valores al este del campo. Los datos de 2011 en la Figura 7(b) (Arellano et al., 2012; 2015) revelan la producción de fluidos que se originan de la ebullición de salmueras desgasificadas compatibles con fluidos de reinyección en gran parte del campo. Los fluidos desgasificados (agua de reinyección) se evaporan y eventualmente se condensan antes de alcanzar los estratos productores. Este proceso fue identificado por Arellano et al. (2012, 2015) y puede explicar los fenómenos de dilución hallados en el yacimiento de Los Azufres.

4. Conclusiones

Los datos de monitoreo químico e isotópico de fluidos son útiles para investigar procesos complejos que ocurren en los yacimientos en explotación. El análisis de datos geoquímicos de fluidos del campo geotérmico de Los Azufres ha evidenciado cambios en las condiciones bifásicas de los fluidos que alimentan los pozos por la posible ocurrencia de fenómenos de condensación que podrían explicar cierta dilución de los fluidos producidos. Los resultados sugieren la ebullición de salmueras desgasificadas por lo que es posible que los fluidos de reinyección sean evaporados y después condensados antes de alcanzar los estratos productores de los pozos. Esto implica la ocurrencia de fenómenos más complejos en los cuales los efectos de la reinyección podrían identificarse a través de la producción de fluidos más diluidos en lugar del incremento en la salinidad.

Las condiciones actuales del yacimiento pueden deberse al aumento en la permeabilidad ocurrido gracias a la estimulación de pozos. Esto pudo provocar una disminución del tiempo de recorrido de los fluidos antes de alcanzar las zonas productoras con el riesgo de no haberse calentado lo suficiente al contacto con la roca, antes de alcanzar las zonas productoras.

Agradecimientos

Los autores agradecen a las autoridades de la Comisión Federal de Electricidad (CFE) por proveer

datos y autorizar la publicación de los mismos. Los resultados son parte del proyecto “Monitoreo isotópico de fluidos de pozos productores y de reinyección del campo geotérmico de Los Azufres” desarrollado por la CFE y el Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Referencias

- Arellano, V.M., Torres, M.A., Barragán, R.M., Sandoval, F., and Lozada, R., 2003. Chemical isotopic and production well data analysis for the Los Azufres (Mexico) geothermal field. *Geothermal Resources Council Trans.*, **27**, 275-279.
- Arellano, V.M., Torres, M.A., and Barragán, R.M., 2005. Thermodynamic evolution of the Los Azufres (Mexico) geothermal reservoir from 1982 to 2002. *Geothermics*, **34** (5), 592-616.
- Arellano, V.M., Barragán, R.M., Paredes, A., López, S., y Aragón, A., 2012. Respuesta del yacimiento de Los Azufres a la explotación 2003-2011. Informe Final IIE/11/14283/I 01F para la Comisión Federal de Electricidad, 303 p. Inédito.
- Arellano, V.M., Barragán, R.M., Ramírez, M., López, S., Paredes, A., Aragón, A., Casimiro, E., and Reyes, L., 2015. The Los Azufres (México) Geothermal Reservoir: Main Processes Related to Exploitation (2003-2011). *Proceedings World Geothermal Congress 2015*, Australia (en prensa).
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Portugal, E., García, A., and Tovar, R., 2002a. Gas geochemistry in modeling geothermal reservoirs. *Geofísica Internacional*, **41** (3), 243-254.
- Barragán, R.M., E. Portugal M., V.M. Arellano G., A. Aragón A., y F. Sandoval M., 2002b. Evolución isotópica de fluidos de pozos del campo geotérmico de Los Azufres, Michoacán, México. *Ingeniería Hidráulica en México*, **XVII** (4), octubre-diciembre de 2002, 99-113.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Portugal, E., and Sandoval, F., 2005a. Isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, δD) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, **34** (4), 527-547.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Portugal, E., Sandoval, F., and Segovia, N., 2005b. Gas geochemistry for the Los Azufres (Michoacán) geothermal reservoir, México. *Annals of Geophysics*, **48** (1), 157-145.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Portugal, E., Sandoval, F., and Segovia, N., 2006. Changes in gas composition of the Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to exploitation. *Geothermal Resources Council Transactions*, **30**, 9-13.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Martínez, I., Aragón, A., Reyes, L., y González, R., 2009. Patrones de comportamiento de especies químicas e isotópicas (2006-2007) en el campo geotérmico de Los Azufres, Mich., en respuesta a la reinyección. *Geotermia*, **22** (2), 19-27.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Aragón, A., Martínez, J.I., Mendoza, A., and Reyes, L., 2010. Geochemical data analysis (2009) of Los Azufres geothermal fluids (Mexico). In: *Water Rock*

- Interaction*, Birkle & Torres-Alvarado (Eds.), Taylor & Francis Group, London, 2010, 137-140.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Mendoza, A., and Reyes, L., 2011. Effects of reinjection on the chemical and isotopic ($\delta^{18}\text{O}$, δD) behavior of Los Azufres (Mexico) geothermal fluids, as indicated by 2010 data. *Geothermal Resources Council Transactions*, **35**, 603-608.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Aragón, A., Martínez, I., Mendoza, A., y Reyes, L., 2012. Variación isotópica ($\delta^{18}\text{O}$, δD) de fluidos de pozos del campo geotérmico de Los Azufres (1987-2010): Identificación de procesos de yacimiento. *Geotermia*, **25** (2), 28-34.
- Barragán, R.M., Arellano, V.M., Hernández, A., Aragón, A., Mendoza, A., y Reyes, L., 2014. Evaluación preliminar del proceso de reinyección en la zona sur del campo geotérmico Los Azufres, Mich. (1989-2011) con base en la concentraciones de Cl de los fluidos producidos y de inyección. *Geotermia*, **27** (1), 12-23.
- D'Amore, F., and Truesdell, A.H., 1995. Correlation between liquid saturation and physical phenomena in vapor dominated geothermal reservoirs. *Proceedings 1995 World Geothermal Congress*, Florencia, Italia, 1917-1931.
- D'Amore, F., 1998. Time evolution of chemical and physical parameters of the reservoir fluid in Ahuachapan geothermal field (El Salvador). Report for the IAEA, 210 p.
- Flores-Armenta, M., Medina-Barajas, E., and Torres, M., 2006. Productivity analysis and acid treatment of well Az-9AD at Los Azufres geothermal field, Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 30, 777-782.
- Flores-Armenta, M., 2010. Evaluation of acid treatments in Mexican geothermal fields. *Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia*, 25-29 April 2010, 1-5.
- Flores-Armenta, M., Ramírez-Montes, M., and Morales-Alcalá, L., 2014. Geothermal activity and development in México – Keeping the production going. *Short Course VI on Utilization of Low- and Medium-Enthalpy Geothermal Resources and Financial Aspects of Utilization*, organized by UNU-GTP and LaGeo, en Santa Tecla, El Salvador, Marzo 23-29, 2014.
- Giggenbach, W.F., 1980. Geothermal gas equilibria. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **44**, 2021-2032.
- Giggenbach, W.F., 1991. Chemical techniques in geothermal exploration. In: F. D'Amore (Editor), *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. UNITAR/UNDP, Roma, Italia, 119-144.
- Morales, L., 2013. Acid stimulation of geothermal wells in Mexico, El Salvador and The Philippines. *Geotermia*, **26** (2), 17-32.
- Nieva, D., Verma, M., Santoyo, E., Barragán, R.M., Portugal, E., Ortiz, J., and Quijano, L., 1987. Chemical and isotopic evidence of steam upflow and partial condensation in Los Azufres reservoir. *Proceedings 12th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford University, 253-259.

Nieva, D., and Nieva, R., 1987. Developments in geothermal energy in Mexico - Part Twelve. A cationic geothermometer for prospecting of geothermal resources. *Heat Recovery Systems & CHP*, **7**, 243-258.

Truesdell, A.H., Lippmann, M.J., Quijano, J.L., and D'Amore, F., 1995. Chemical and physical indicators of reservoir processes in exploited high-temperature liquid-dominated geothermal fields. *Proceedings World Geothermal Congress 1995*, Florencia, Italia, 1933-1938.

Truesdell, A.H., Lippmann, M.J., Rodríguez, M.H., and Pérez, A., 2003. Influence of reservoir processes on gas in Cerro Prieto steam. *Geothermal Resources Council Transactions*, **27**, 335-340.

(Figuras en páginas siguientes)

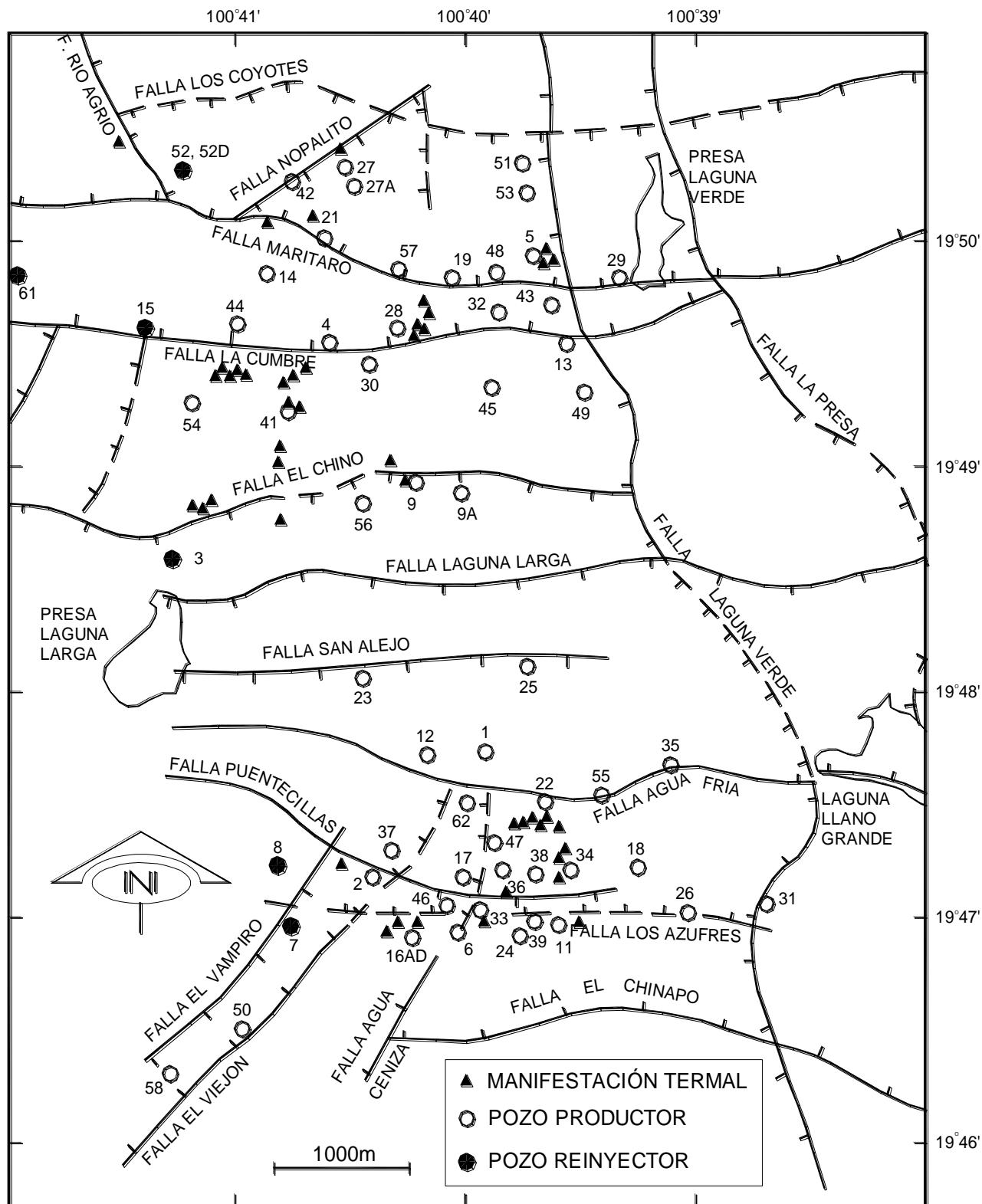


Figura 1. Localización de pozos en el campo geotérmico de Los Azufres.

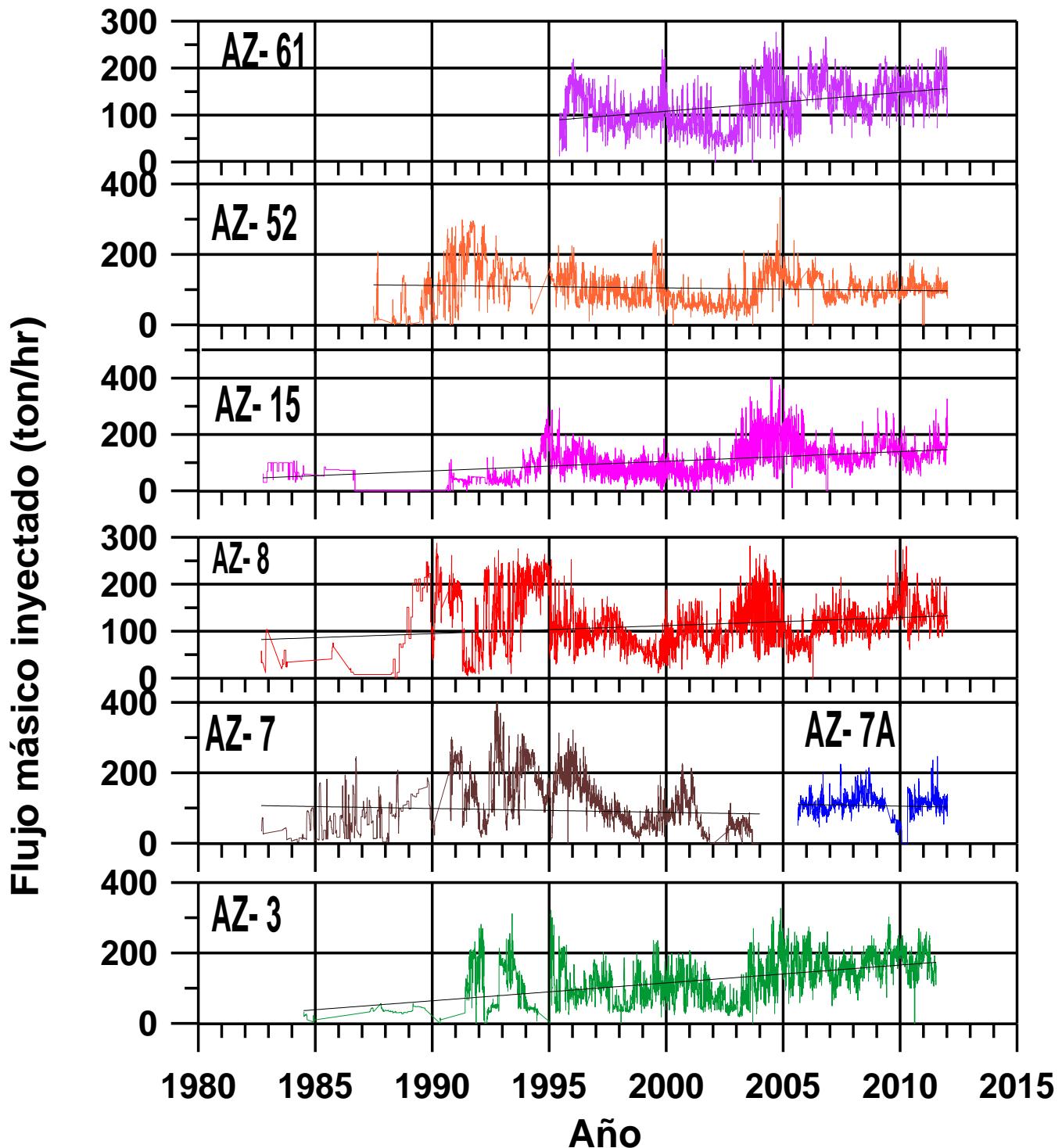


Figura 2. Flujos másicos reinyectados en los pozos AZ-3, AZ-7A, AZ-8, AZ-15, AZ-52 y AZ-61 desde 2005 hasta junio de 2011.

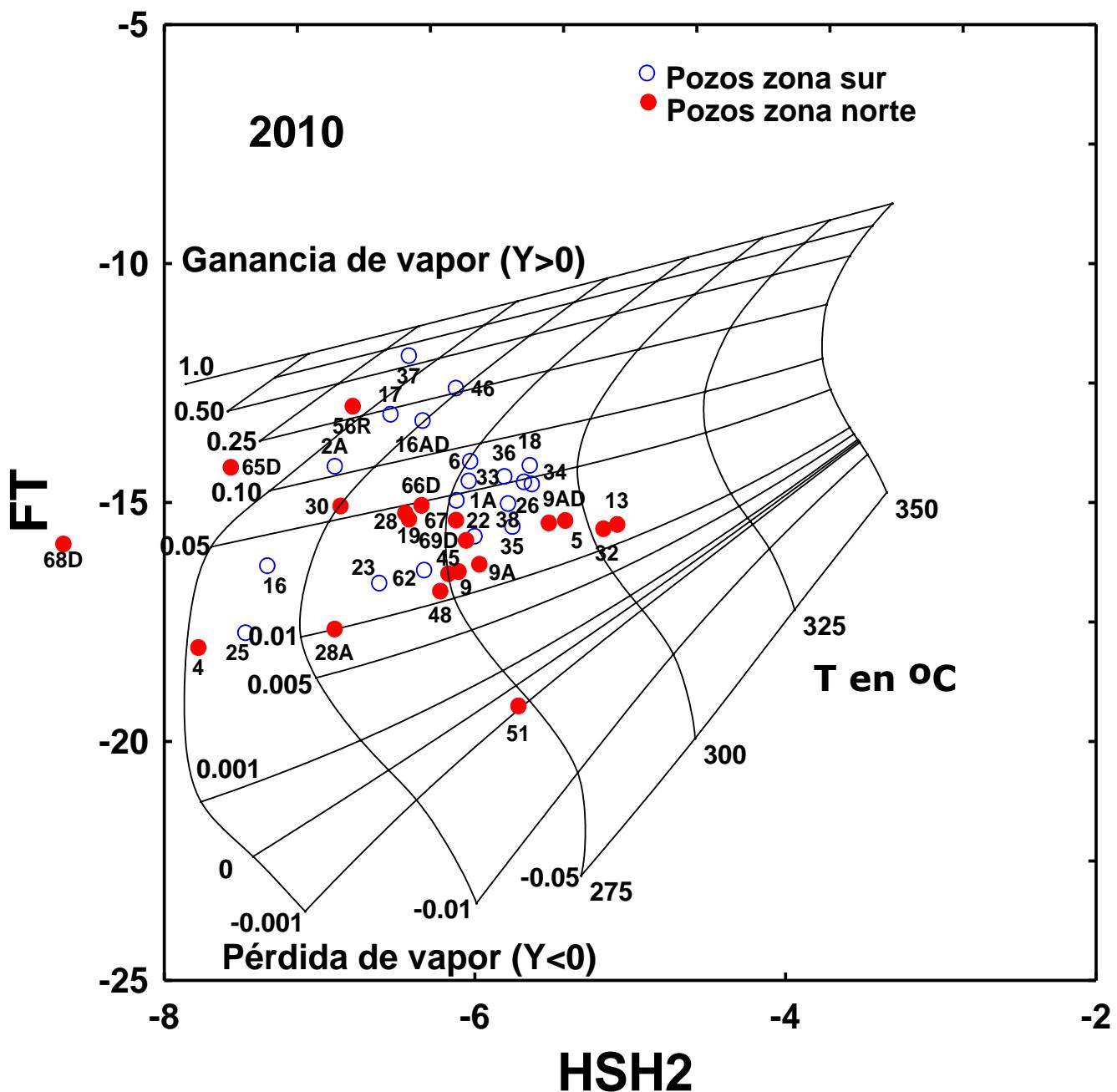


Figura 3. Diagrama de equilibrio gaseoso FT-HSH2 de pozos del campo geotérmico de Los Azufres según datos de 2010.

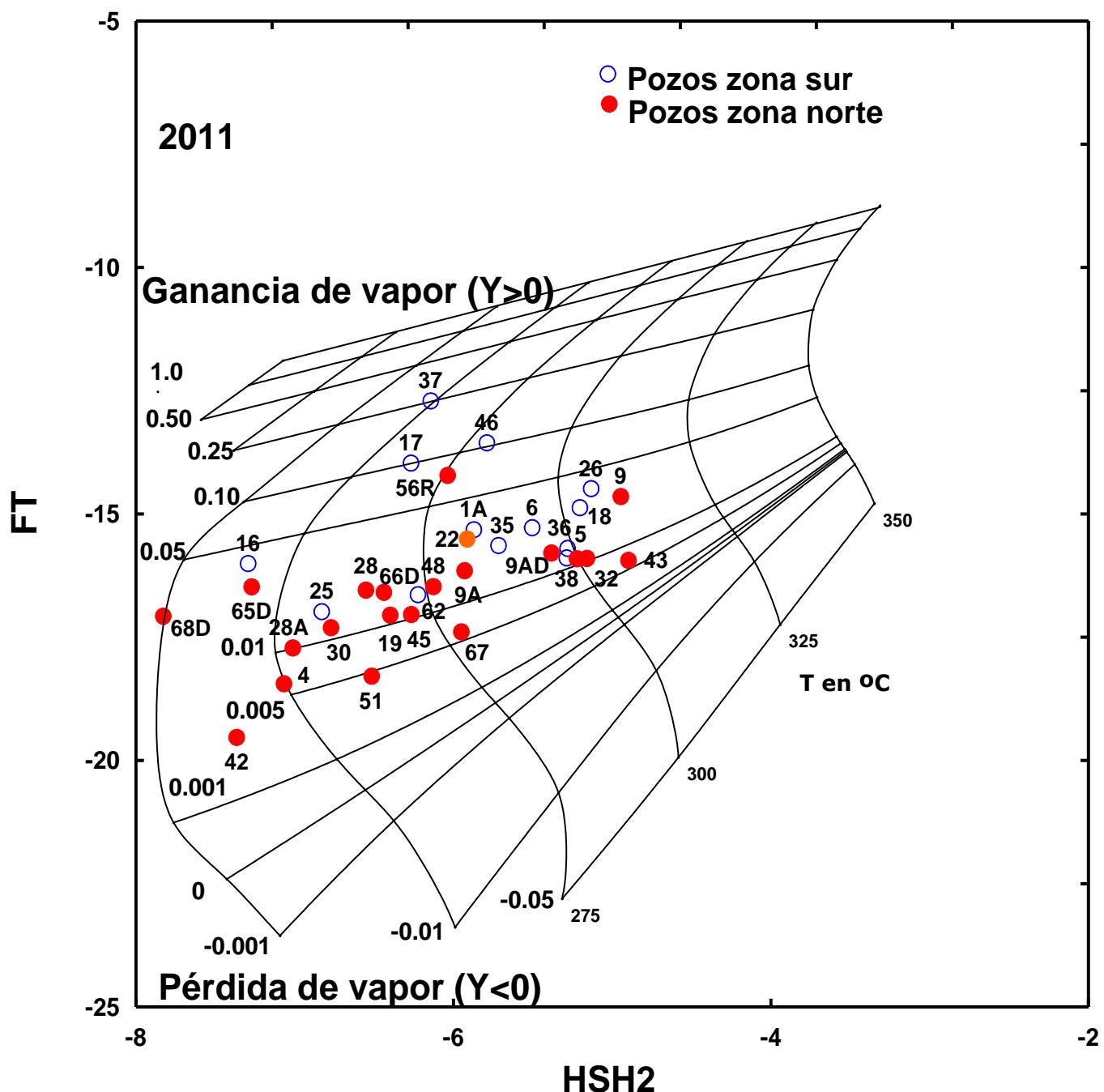


Figura 4. Diagrama de equilibrio gaseoso FT-HSH2 de pozos del campo geotérmico de Los Azufres según datos de 2011.

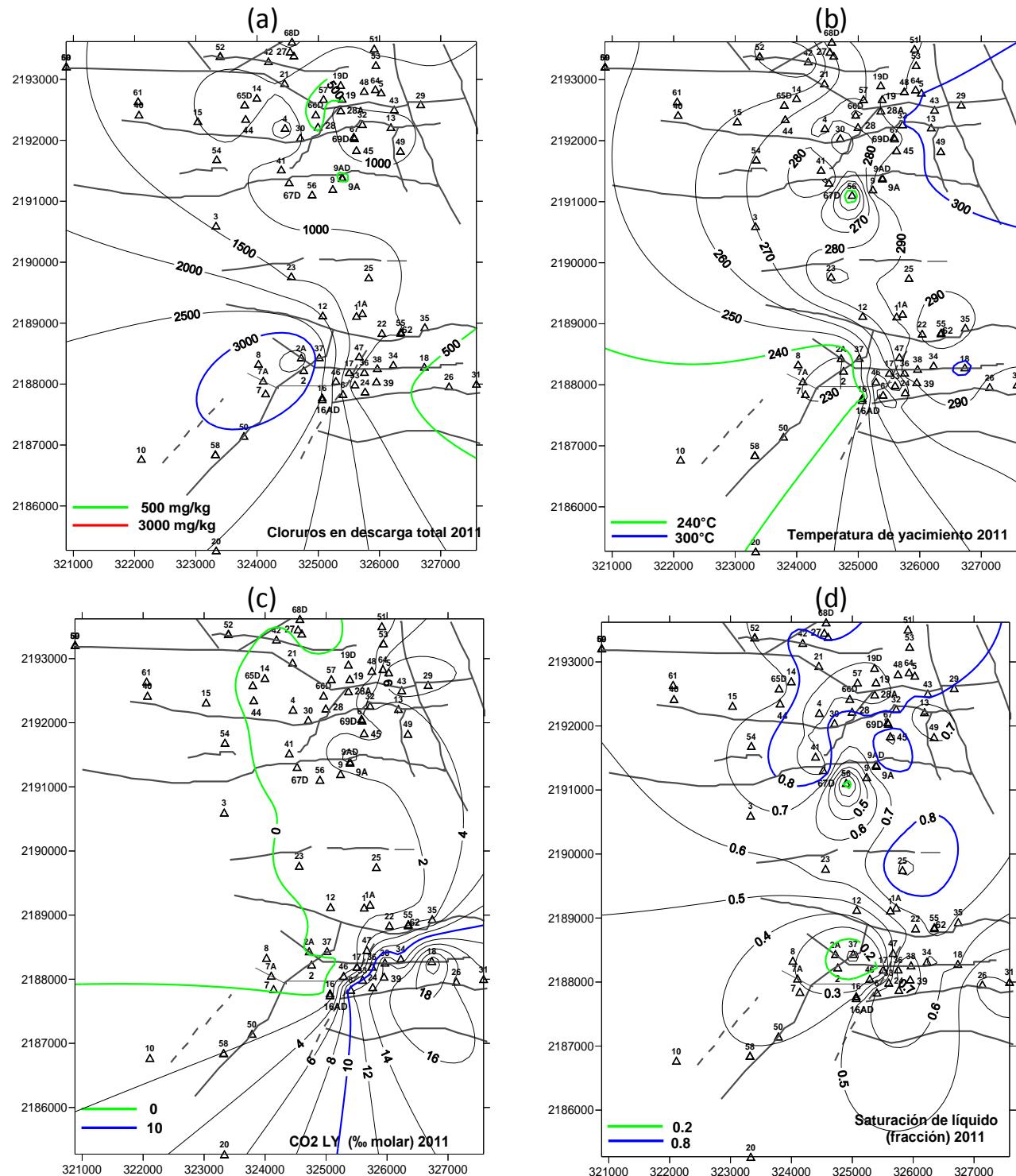
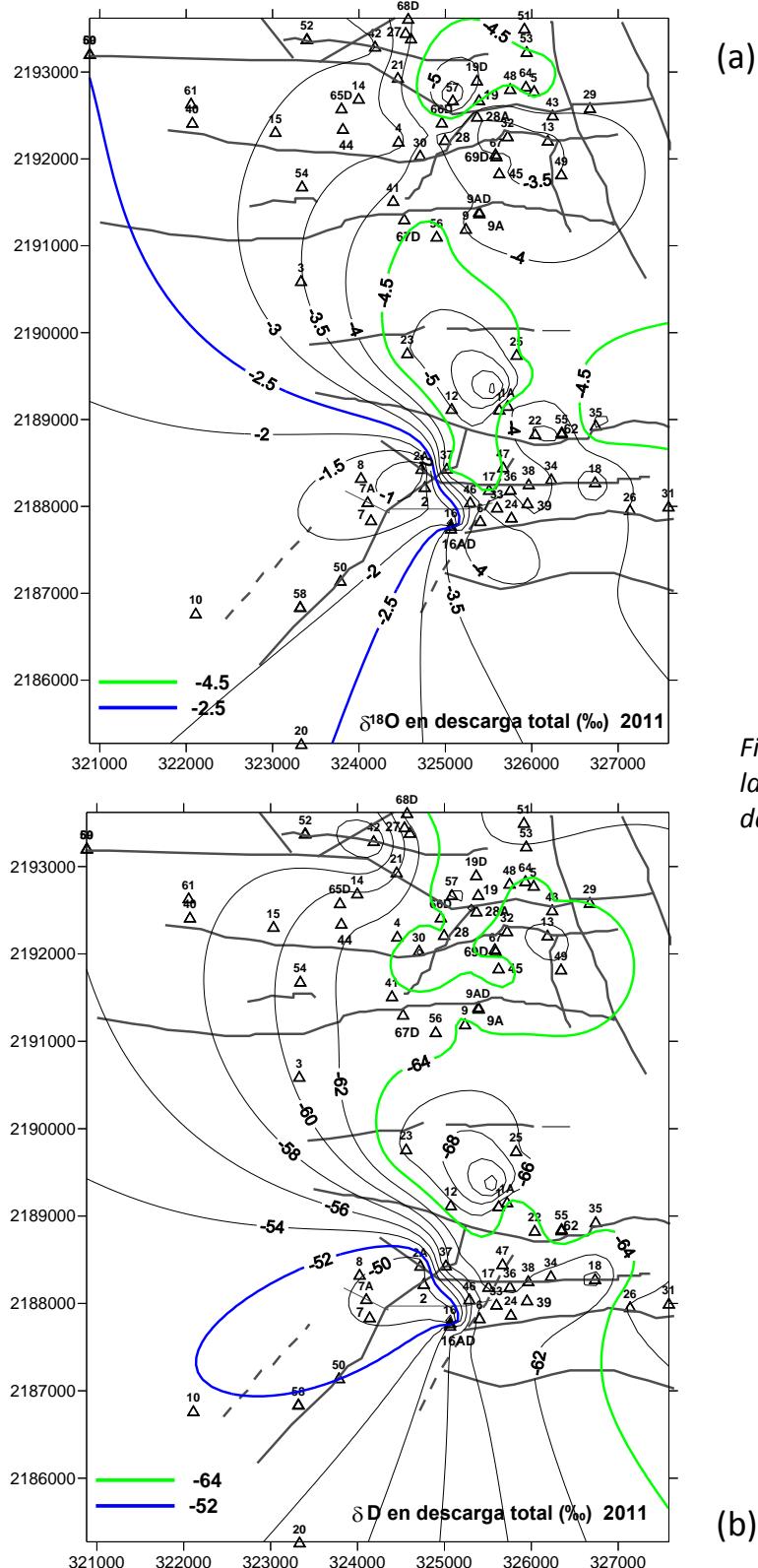


Figura 5. Distribuciones de (a) cloruros en las descargas totales de pozos, (b) temperaturas de yacimiento, (c) CO₂ en el líquido del yacimiento de pozos y (d) saturaciones de líquido de acuerdo con datos de 2011.



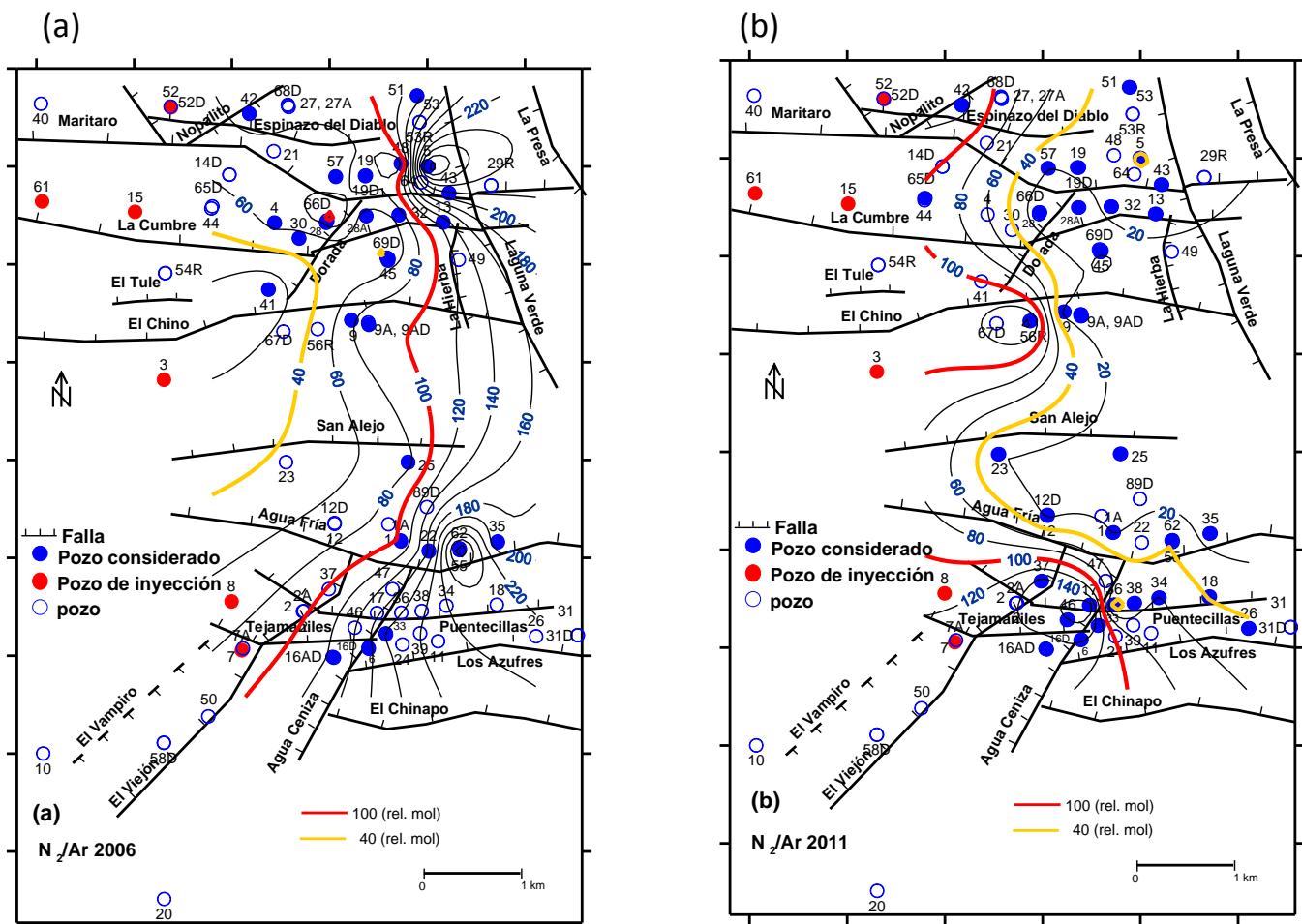


Figura 7. Distribuciones de la relación N_2/Ar en descargas de pozos según datos de (a) 2006 y (b) 2011, (Arellano et al., 2012).