

## Condiciones termodinámicas de los fluidos del yacimiento de Los Azufres (Méjico) y su evolución en respuesta a la explotación (1979-2011)

Víctor Manuel Arellano G.<sup>1</sup>, Miguel Ramírez M.<sup>2</sup>, Rosa María Barragán R.<sup>1</sup>, Adriana Paredes S.<sup>1</sup>, Alfonso Aragón A<sup>1</sup>, Siomara López B.<sup>1</sup> y Emigdio Casimiro E.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Cuernavaca, 62490, México, correo: [vag@iie.org.mx](mailto:vag@iie.org.mx). <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoelectríficos, Morelia, Michoacán, México. <sup>3</sup>Comisión Federal de Electricidad, Residencia Los Azufres, Campamento Agua Fría, Michoacán, México

### Resumen

Con objeto de investigar la respuesta del yacimiento de Los Azufres a la explotación, se procesaron las historias químicas, isotópicas y de producción de 33 pozos del campo (17 de la zona sur y 16 de la zona norte). En primer término, y empleando variables medidas en el cabezal, se obtuvieron las condiciones termodinámicas (presión, temperatura, entalpía, flujo y calidad de la mezcla) de fondo, mediante la simulación de flujo de calor y fluidos en pozos empleando el simulador WELFLO. Además del resultado del simulador, la temperatura en el yacimiento se estimó por medio de un geotermómetro de cationes en pozos de mezcla y uno de gases (FT-HSH2) en pozos de vapor. Posteriormente se estudiaron las velocidades de cambio de las condiciones termodinámicas tanto a nivel de pozos individuales como a nivel de fallas y posteriormente para cada zona del campo, empleando los modelos lineal y armónico. Los principales resultados indican que para la zona sur las velocidades de cambio promedio de la presión, entalpía y temperatura estimadas con el modelo lineal son de -0.39 bar/año, 18.7 (kJ/kg)/año y -0.78 °C/año, respectivamente. Estas velocidades de cambio se consideran bastante moderadas y se deben en buena medida a la recarga natural y artificial de fluidos en esta zona del campo. De 1979 al 2011 la presión de los pozos productores de la zona sur disminuyó aproximadamente 12 bar, la entalpía se incrementó en 598 (kJ/kg) y la temperatura habría disminuido 25°C. La velocidad de cambio promedio de la presión, entalpía y temperatura estimadas con el modelo lineal para la zona norte, son de -0.53 bar/año, 20.3 (kJ/kg)/año y -0.73 °C/año, respectivamente. Estas velocidades de cambio se consideran bastante moderadas. De 1979 al 2011 la presión de los pozos productores de la zona norte disminuyó aproximadamente 17 bar, la entalpía se incrementó en 650 (kJ/kg) y la temperatura habría disminuido 23°C. Estos resultados apoyan a la Comisión Federal de Electricidad en la toma de decisiones relacionadas con la definición de políticas de explotación que permitan extender la vida útil del recurso.

*Palabras clave:* Geoquímica, isotopía, temperatura, presión, producción, evolución de yacimientos, entalpía.

### Thermodynamic conditions of reservoir fluids in Los Azufres (Mexico) and their evolution as response to exploitation (1979-2011)

### Abstract

In order to investigate the response to exploitation of the Los Azufres (Mexico) geothermal reservoir, historical chemical, isotopic and production data were processed. Data included information from 33 wells, 17 from the south zone and 16 from the north zone. The reservoir thermodynamic conditions (pressure, temperature, enthalpy, flow and steam quality) were obtained by using a well simulator

WELFLO and utilizing wellhead monitoring parameters as input. Besides the simulator results, reservoir temperatures were also estimated by using a cationic geothermometer in two-phase wells and a gas geothermometer (FT-HSH2) in dry steam wells. Subsequently, the rates of declining of pressures, mass flow rates and temperatures were estimated for single wells, for wells related to specific faults and for every zone of the field by using the linear and the harmonic models. Main results indicate that in the south zone the average declining rates of pressure and temperature obtained by the linear method were of -0.39 bar/year and -0.78 °C/year, respectively while the rate of enthalpy increase was of 18.7 (kJ/kg)/year. Such rates of change in the parameters were considered to be rather moderate and are attributed to the natural and artificial recharge that seems to be adequate to compensate the fluid extraction. From 1979 to 2011 the pressure of south zone wells decreased about 12 bar, the enthalpy increased 598 (kJ/kg) and temperature decreased 25°C. The average rates of change of pressure, enthalpy and temperature obtained by linear method for the north zone were -0.53 bar/year, 20.3 (kJ/kg)/year and -0.73°C/year, respectively. Such rates of change were also considered to be very moderate. From 1979 to 2011 the pressure of the north zone wells decreased about 17 bar, the enthalpy increased 650 (kJ/kg) and the temperature decreased 23°C. These results provide support to Comisión Federal de Electricidad in delineating optimal exploitation polices tending to extend the resource lifetime.

**Keywords:** Geochemistry, isotopy, temperature, pressure, production, reservoir evolution, enthalpy.

## 1. Introducción

El yacimiento geotérmico de Los Azufres, Michoacán, 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 apoyar la búsqueda de políticas óptimas de explotación (Arellano et al., 2003; 2005; 2012; Barragán et al., 2005). Estas técnicas incluyen el análisis de datos de producción de pozos para hallar las condiciones termodinámicas de los fluidos del yacimiento mediante el uso de simuladores de pozos, así como sus cambios y su tasa de cambio a través del tiempo. Esta información, aunada a mediciones de fondo de pozos, complementa el proceso de caracterización del yacimiento y ayuda a identificar problemáticas a futuro, como podría ser una declinación temprana de la producción que impactaría la productividad del campo. El objetivo de este trabajo es actualizar las estimaciones de presiones, temperaturas y entalpías de fondo de los pozos del campo geotérmico de Los Azufres mediante la simulación del flujo de fluidos y calor de pozos empleando datos de cabezal, así como investigar sus cambios y estimar su declinación a través del tiempo para proporcionar soporte a la Comisión Federal de Electricidad (CFE) en la definición de las políticas óptimas de explotación. El estudio se realizó para pozos individuales así como para cada zona del campo y para el campo en su conjunto.

## 2. Metodología

La presión, entalpía y temperatura a fondo de pozo se estimaron por medio del simulador de pozo WELFLO (Goyal et al., 1980). WELFO es un simulador de pozos geotérmicos en diferencias finitas, que considera flujo multifásico, unidimensional y en estado estacionario, útil en la simulación de pozos verticales de diámetro variable. Este modelo ha sido ampliamente validado contra datos de campo (Goyal et al., 1980). Los datos que se alimentaron a WELFLO son la geometría (longitud, diámetros, etc.), el flujo másico, la presión y la entalpía de cabezal. Adicionalmente, se estimaron las temperaturas

de yacimiento mediante geotermómetros. Para pozos con producción bifásica se utilizó el geotermómetro basado en la relación Na/K (Nieva y Nieva, 1987), y para pozos productores de vapor se empleó el geotermómetro de gases FT-HSH2 (D'Amore, 1998).

Se analizaron los resultados para investigar los cambios en las condiciones termodinámicas de cada pozo a través del tiempo y sus velocidades de cambio. Las velocidades de cambio de las variables de producción y de las condiciones termodinámicas de los fluidos de fondo, se obtuvieron empleando dos modelos: a) el modelo lineal que consiste básicamente en un ajuste de las variables por el método de mínimos cuadrados y b) el modelo de declinación armónica (Sanyal et al., 2000; Waldo, 2004), que suaviza los cambios en la producción por efecto de los cambios en el diámetro del orificio de producción. Una limitación del modelo lineal es que puede no reflejar la declinación real ya que no corrige los cambios en la producción debidos a los cambios en el diámetro del orificio. Este efecto se minimiza en los pozos que cuentan con historias de producción largas, suponiendo que la tendencia general podría absorber los efectos de los citados cambios. Las velocidades de cambio obtenidas permiten identificar procesos físicos del yacimiento como respuesta a la explotación y proporcionan elementos de decisión para establecer políticas de explotación.

La CFE proporcionó datos de producción de 33 pozos (Figura 1), 17 de la zona sur (AZ-2, 2A, 6, 17, 18, 22, 23, 25, 26, 33, 34, 35, 36, 37, 38 46 y 62) y 16 en la zona norte (AZ-4, 5, 9, 13, 19, 28, 28A, 30, 32, 41, 43, 45, 48, 51, 57 y 67).

### 3. Resultados

#### 3.1 Fluidos producidos y reinyectados

La producción de fluidos en el campo geotérmico de Los Azufres ha variado a través del tiempo, dependiendo de la operación de las unidades generadoras. En la Figura 2 (Arellano et al., 2012, 2015) se muestran los datos de producción y reinyección a través del tiempo. Como se observa, la extracción de fluidos inició en 1978 y hasta diciembre de 2011 se habían producido 441,744,661 toneladas de fluidos de los cuales 254,376,326 toneladas (57.6%) se extrajeron de la zona sur y 187,368,335 toneladas (42.4%) de la zona norte. Entre 1982 y 2011 se reinyectaron 132,016,271 toneladas (30%) de los fluidos producidos. La producción se incrementó en la zona sur en 1987 cuando empezó la operación de la planta de 50 MW (Arellano et al., 2005), mientras que en 2003 se incrementó la producción de la zona norte debido a la instalación de 100 MW adicionales de capacidad.

#### 3.2 Cambios en las condiciones termodinámicas de los pozos de la zona sur

En las Figuras 3 y 4 se muestra el comportamiento de la presión y la entalpía promedio a fondo de pozo para los pozos estudiados en la zona sur. Como puede verse, la respuesta inicial de esta zona del campo a la extracción de fluidos es una disminución de la presión y un incremento en la entalpía. La presión se estabiliza en el año 2004 en unos 33 bar y la entalpía deja de incrementarse y se mantiene aproximadamente en 2450 kJ/kg. Estos valores no han cambiado significativamente por varios años.

En la Figura 5 se muestra la gráfica semi-logarítmica presión-entalpía cada tres años para los pozos de la zona sur. En promedio en la zona sur la presión de los pozos ha disminuido 0.39 bar/año con un valor promedio de 37 bar; la entalpía de los pozos se ha incrementado en 18 (kJ/kg)/año con un valor promedio de 2412 kJ/kg, mientras que la temperatura ha disminuido en promedio 0.78 °C.

Los pozos que muestran las mayores disminuciones en la presión de fondo son el Az-25, 26 y 34 con 3.1, 0.91 y 0.79 bar/año, respectivamente; los pozos Az-2, 2A y 6 presentan un incremento en la presión, debido principalmente a su conexión con la recarga artificial de fluidos. Los pozos que presentan los mayores incrementos en la entalpía de fondo son el Az-25, 26, 46 y 18 con 81.8, 68.7, 62.2 y 59.7 (kJ/kg)/año, respectivamente. Los pozos Az-35, 17 y 62 prácticamente no muestran cambios y los pozos Az-2, 2A, 23, 38, 36 y 6 muestran disminución en la entalpía. La velocidad de enfriamiento promedio de los pozos más afectados por la inyección (Az-2, 2A, 33, 36 y 46) es de 1.3 °C/año. La velocidad de enfriamiento de los pozos que presentan los incrementos de entalpía más importantes (Az-18, 25, 26 y 46) es de aproximadamente 0.7 °C/año. El pozo Az-22 es el único que muestra un incremento en la temperatura, probablemente indicativo del ascenso de fluidos profundos y calientes.

### 3.3 Cambios en las condiciones termodinámicas de los pozos de la zona norte

En las Figuras 6 y 7 se observa el comportamiento de la presión y la entalpía a fondo de pozo para los pozos estudiados en la zona norte. La presión disminuye a una velocidad de aproximadamente 0.5 bar/año, con un valor mínimo de 38.7 bar en el año 2007. La entalpía se incrementa a una velocidad de aproximadamente 20 kJ/kg, alcanzando un valor máximo de un poco más de 2500 kJ/kg en el año 2007. A partir del año 2007 la presión se incrementa un poco y la entalpía disminuye hasta 2270 kJ/kg en el año 2011. Los pozos que presentan las entalpías más bajas son el Az-4, 28A, 42 y 68D. En la Figura 8 se muestra la gráfica semi-logarítmica presión-entalpía cada tres años para los pozos de la zona norte. La velocidad de disminución promedio de la presión en la zona norte es de aproximadamente 0.5 bar/año, el aumento de la entalpía se encuentra entre 18 y 20 (kJ/kg)/año y la disminución de la temperatura es de 0.74 °C/año, muy similar a la zona sur.

Los pozos con las mayores disminuciones en la presión de fondo son el Az-45, 51 y 48 con -2.70, -2.80 y -1.03 bar/año, respectivamente. Estos pozos tienen una disminución de presión muy superior al promedio de los pozos de la zona. El pozo Az-45 muestra un incremento en sus cloruros lo que podría sugerir que algún fluido de reinyección llega a su zona de alimentación, y presenta también la más alta velocidad de disminución de temperatura de la zona.

Algunos pozos como el Az-57, 28A y 67 muestran incrementos de presión. El Az-57 y el Az-28A muestran disminuciones muy importantes de entalpía y se comportan sobre la línea de pérdida de vapor. El pozo Az-67 muestra un incremento en sus cloruros (lo que podría sugerir la llegada a su zona de alimentación de fluidos de reinyección), pero se tienen pocos datos para poder concluir.

Los pozos que presentan el mayor incremento en la entalpía de fondo de pozo son el Az-51, 5 y 43 con 59.2, 50.6 y 46.6 (kJ/kg)/año, respectivamente. El pozo Az-51 se estimuló a finales del año 2010 después de lo cual muestra un comportamiento más estable y una entalpía más baja.

### 3.4 Cambios a nivel del campo

En la Figura 9 se muestra el comportamiento anual promedio de la presión contra la entalpía del campo en su conjunto. Aunque la respuesta del yacimiento a la explotación no es homogénea en todo el campo y se han identificado las zonas donde ocurren los principales ascensos de fluidos profundos, así como las áreas afectadas por la producción de retornos de reinyección o las dominadas por procesos de

ebullición, la tendencia global de los datos hasta el año 2003 es una disminución gradual de presión y un incremento en la entalpía, lo cual indica la ocurrencia de ebullición como proceso dominante.

Como se comentó, a partir de 2003 aumentó la explotación de la zona norte del campo debido a la instalación de 100 MW adicionales. Entre 2003 y 2005 los datos de la Figura 9 muestran incremento en la entalpía mientras la presión permanece aproximadamente constante. Esto indica el ingreso de fluidos de alta entalpía (vapor) al yacimiento. En contraste, la tendencia de los datos de 2005 a 2009 muestra una disminución de entalpía a presión aproximadamente constante, y entre 2009 y 2011 no se notan cambios en las condiciones termodinámicas de los fluidos.

#### 4. Conclusiones

Se obtuvieron las condiciones termodinámicas de fondo de 33 pozos del campo de Los Azufres mediante simulación numérica, y se estimaron los cambios y las velocidades de cambio de la presión, entalpía y de la temperatura de fondo. Esto permitió identificar aquellos pozos, fallas y zonas del yacimiento que presentan menores y mayores velocidades de cambio.

Tanto en la zona sur como en la norte, las velocidades de cambio de presión, entalpía y temperatura se consideran bastante moderadas y debidas en buena medida a la recarga natural y artificial del yacimiento. En la zona sur, de 1979 a 2011 la presión de los pozos productores disminuyó aproximadamente 12 bar, la entalpía se incrementó en 598 (kJ/kg) y la temperatura habría disminuido 25°C. En la zona norte, la velocidad de cambio promedio de la presión, entalpía y temperatura estimadas con el modelo lineal es de -0.53 bar/año, 20.3 (kJ/kg)/año y -0.73 °C/año, respectivamente. De 1979 a 2011 la presión de los pozos productores disminuyó aproximadamente 17 bar, la entalpía se incrementó en 650 (kJ/kg) y la temperatura habría disminuido 23°C.

En promedio, a nivel campo los datos de presión-entalpía indican que la ebullición fue el proceso dominante hasta 2003, debido a la caída de presión y el aumento en la entalpía. A partir de 2003 la presión se ha mantenido constante siguiendo dos tendencias: entre 2003 y 2005 la entalpía se incrementó, lo que se interpreta como el ingreso de fluidos de alta entalpía al yacimiento, y de 2005 hasta 2011 la entalpía ha disminuido, hasta el valor que tenía en 2003.

#### 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 (Méjico) 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., and Sandoval, F., 2005. Isotopic ( $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta\text{D}$ ) patterns in Los Azufres (Mexico) geothermal fluids related to reservoir exploitation. *Geothermics*, **34** (4), 527-547.
- 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.
- Goyal, K.P., Miller, C.W., and Lippmann, M. J., 1980. Effect of Measured Wellhead Parameters and Well Scaling on the Computed Downhole Conditions in Cerro Prieto Wells. 6th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, SGP-TR-50, pp. 130-138.
- 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.
- Sanyal, S.K., Butler, S.J., Brown, P.J., Goyal, K. and Box, T., 2000. An investigation of productivity and pressure decline trends in geothermal steam reservoirs, *Proceedings World Geothermal Congress 2000*, Kyushu, Tohoku, Japón, pp. 873-877.
- Waldo Z., R., 2004. Propuesta de aplicación en campos geotérmicos de México de un nuevo método de análisis de curvas de declinación. Reporte interno CFE, 23 p. Inédito.

(Figuras en páginas siguientes)

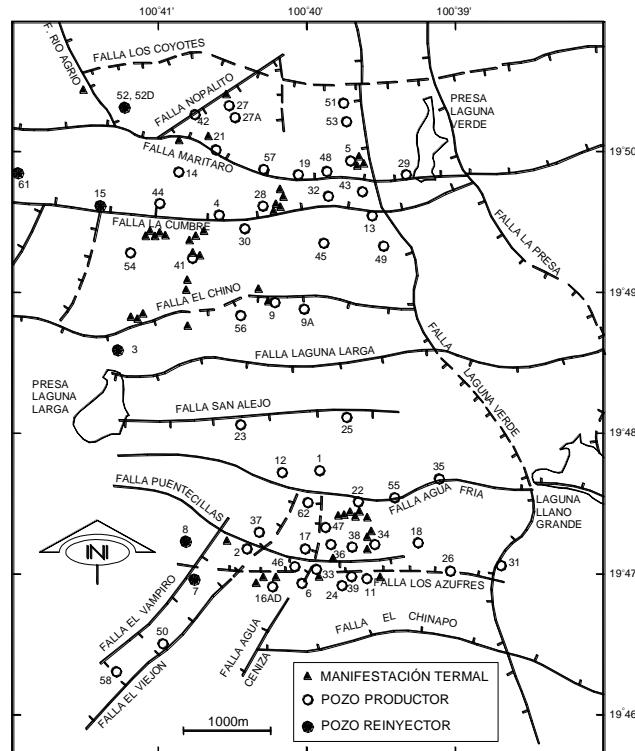


Figura 1. Localización de pozos en el campo geotérmico Los Azufres

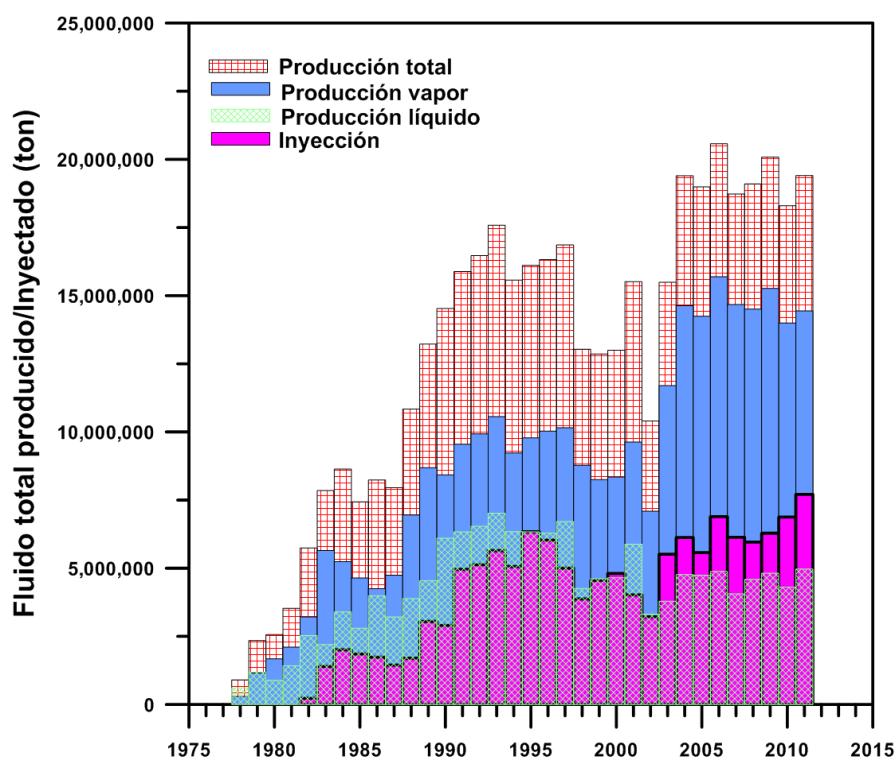


Figura 2. Producción de líquido, vapor y mezcla, así como los fluidos inyectados al yacimiento.

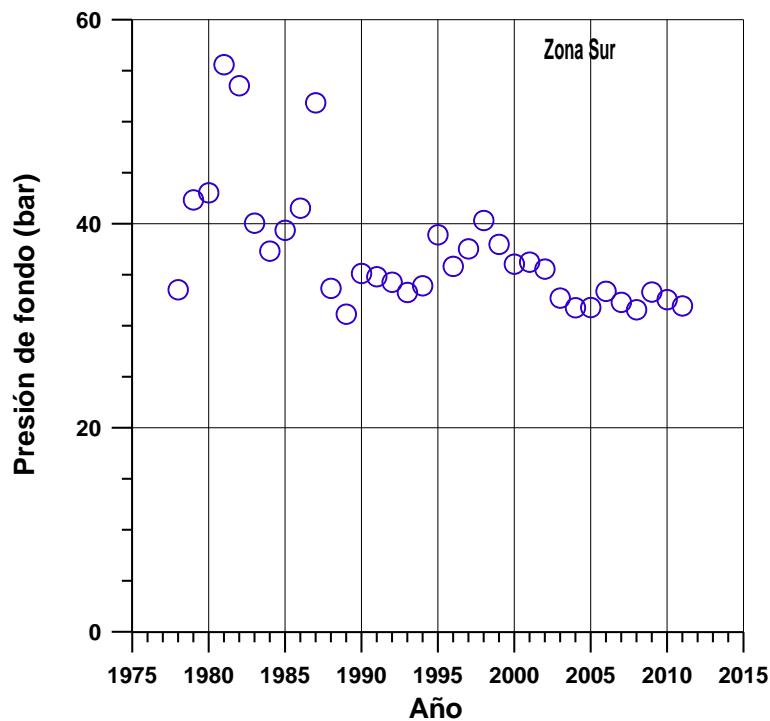


Figura 3. Comportamiento de la presión promedio a fondo de pozo de los pozos estudiados en la zona sur.

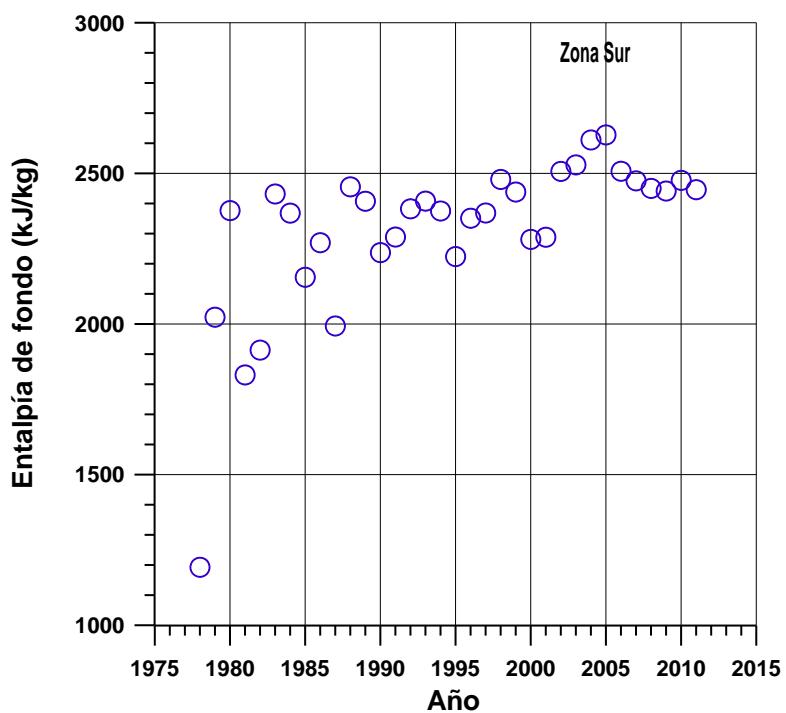


Figura 4. Comportamiento de la entalpía promedio a fondo de pozo de los pozos estudiados en la zona sur.

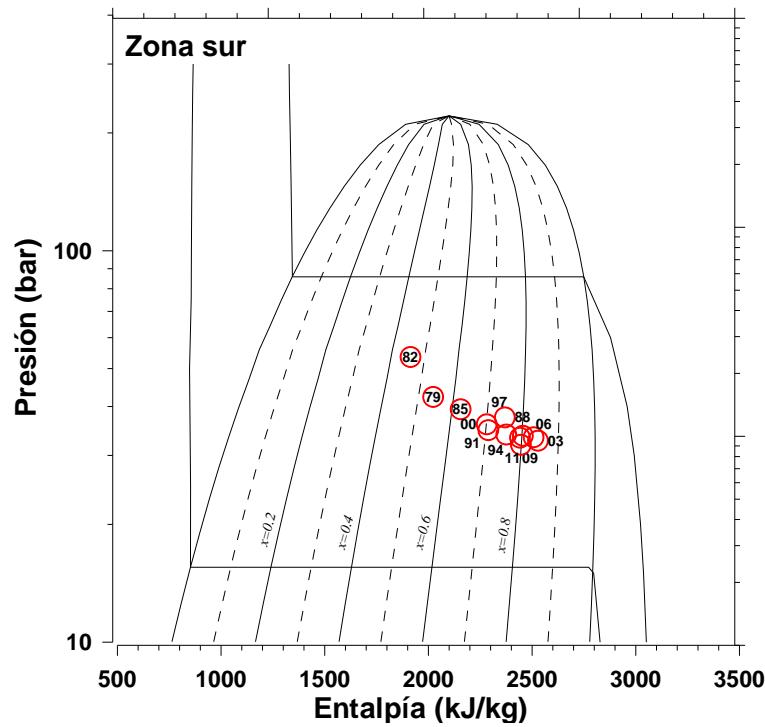


Figura 5. Comportamiento trianual de la presión-entalpía promedio a fondo de pozo de los pozos estudiados en la zona sur.

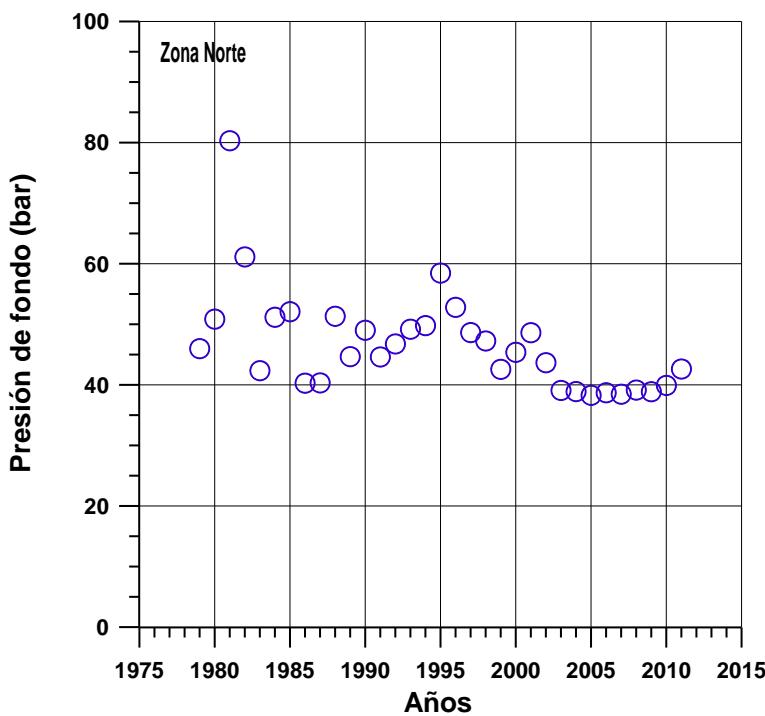


Figura 6. Comportamiento de la presión promedio a fondo de pozo de los pozos estudiados en la zona norte.

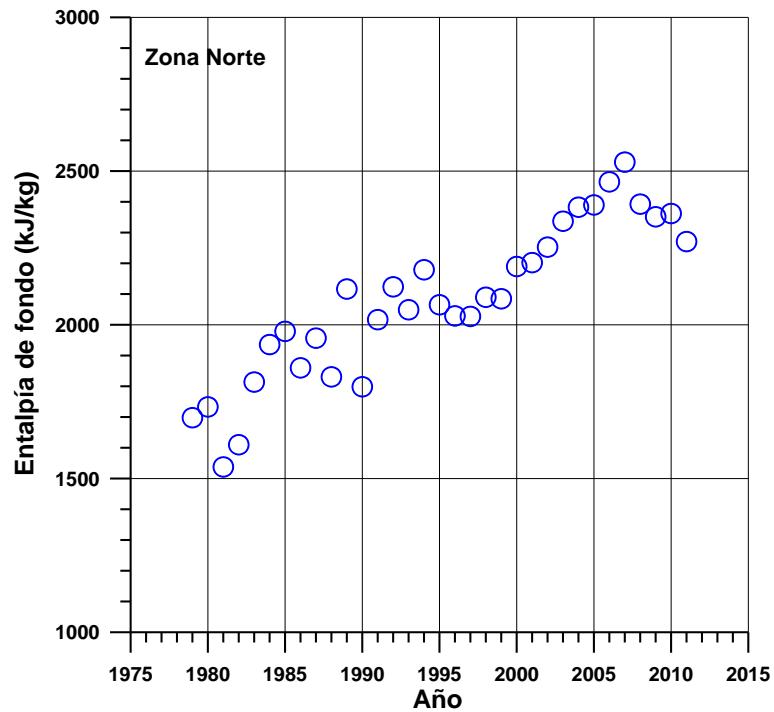


Figura 7. Comportamiento de la entalpía promedio a fondo de pozo de los pozos estudiados en la zona norte.

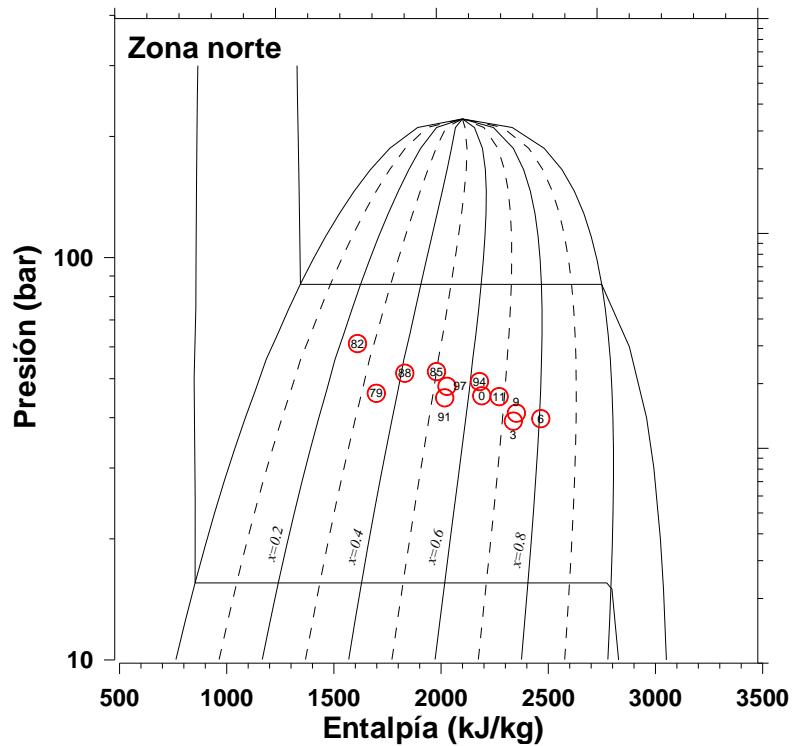


Figura 8. Comportamiento triannual de la presión-entalpía promedio a fondo de pozo de los pozos estudiados en la zona norte.

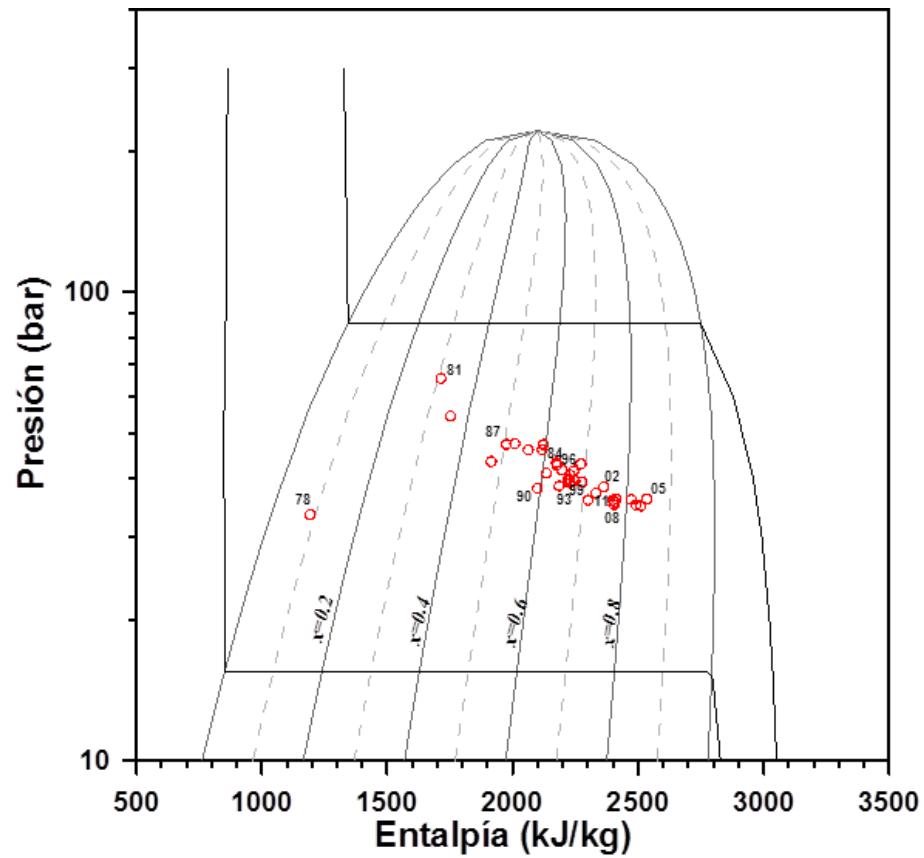


Figura 9. Comportamiento presión-entalpía promedio del campo.