

## Cambios geoquímicos en fluidos del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, BCS, durante 1997-2007: Identificación de procesos de yacimiento

**Rosa María Barragán<sup>1</sup>, Eduardo Iglesias<sup>1</sup>, Rodolfo J. Torres<sup>1</sup>, Víctor M. Arellano<sup>1</sup>, Neftalí Reyes-Picasso<sup>1</sup>, Miguel Ramírez<sup>2</sup>, Ruth Tapia<sup>3</sup>, Pedro Hernández<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Instituto de Investigaciones Eléctricas, Gerencia de Geotermia, Reforma 113, Col. Palmira, 62490, Cuernavaca, Morelos, México, Correo: [rmb@iie.org.mx](mailto:rmb@iie.org.mx), <sup>2</sup>Comisión Federal de Electricidad, Gerencia de Proyectos Geotermoeléctricos, Alejandro Volta 655, Col. Electricistas, 58290 Morelia, Mich., México, <sup>3</sup>Comisión Federal de Electricidad, Residencia de Las Tres Vírgenes, Baja California Sur, México.

### Resumen

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, localizado en la Península de Baja California, cuenta con una capacidad instalada de 10 MWe. El yacimiento es de tipo líquido dominante con temperaturas en el rango de 250-275° C. En este trabajo se presenta una identificación de los principales procesos de yacimiento con base en los cambios geoquímicos de los fluidos producidos durante 1997-2007. Los resultados indican la ocurrencia de procesos de mezcla típicamente entre dos componentes primarios principales. Uno corresponde al fluido característico del yacimiento (274° C y concentración de Cl de ~6,745 ppm), el cual es producido por el pozo más profundo de campo, el LV-13 (2,414 m de profundidad); mientras que el otro componente presenta menor temperatura y salinidad (171-202° C, concentración de Cl de ~500 ppm) y se asemeja al fluido producido en el pasado por el pozo más somero del campo, el LV-2 (1,270 m de profundidad). De acuerdo con los resultados obtenidos, se propone que los fluidos descargados a lo largo del tiempo por los pozos LV-1, LV-3, LV-4 y LV-11 consisten de mezclas de diversas fracciones de los dos fluidos primarios mencionados. Además, por medio del análisis de diversas estimaciones de entalpía de los pozos a través del tiempo, se evidenciaron múltiples entradas de fluidos en los pozos, por lo que es probable que la mezcla de fluidos ocurra en el pozo, favoreciendo el depósito de minerales y los fenómenos de incrustación que se han observado en este campo.

### 1. Introducción

El campo geotérmico de Las Tres Vírgenes se localiza en el estado de Baja California Sur en la Península de Baja California (Figura 1; todas las figuras al final del texto). Actualmente cuenta con una capacidad instalada 10 MWe (Gutiérrez-Negrín, 2007) y su capacidad se ha estimado de 10 a 20 MWe (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001). Los estudios de exploración en el área iniciaron en 1982 y el primer pozo exploratorio (LV-2) se perforó en 1988 (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001). A la fecha se han perforado al menos nueve en dos zonas separadas: LV-1, LV-2 y LV-5 (actualmente no productores) en la zona norte; LV-3, LV-4, LV-11 y LV-13 en la zona sur y LV-7 y LV-8 localizados hacia el este (Figura 1). Los pozos LV-2, LV-7 y LV-8 se utilizan como reinyectores. Los pozos de la zona sur producen fluidos más salinos y de mayor temperatura con respecto a los pozos de la zona norte (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001). Truesdell (1998) y Portugal *et al.*, (2000) han propuesto modelos geoquímicos para el yacimiento de Las Tres Vírgenes. En este campo se ha observado la formación de incrustaciones en algunos pozos por lo que se utiliza rutinariamente un inhibidor comercial (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001).

En 2007 se realizó un estudio para investigar los principales procesos que ocurren en el yacimiento debido a la explotación (Iglesias *et al.*, 2007). Algunos resultados basados en equilibrio fluido-mineral indicaron múltiples entradas de fluidos a los pozos y mezcla de fluidos, en virtud de que los índices de saturación de minerales característicos mostraron equilibrio a diferentes temperaturas (Barragán *et al.*, 2009). Entonces es posible que la formación de incrustaciones observada en el campo obedezca al menos en parte a la mezcla de fluidos (Arnórsson, 1992; Bethke, 1995). El objetivo de este trabajo es caracterizar los procesos de mezcla y dilución que ocurren en el yacimiento de Las Tres Vírgenes por medio de las características geoquímicas de los fluidos producidos a través del tiempo, con el fin de apoyar estudios relacionados tanto con los fenómenos de incrustación como con el comportamiento hidrológico del yacimiento. Este estudio incluye datos geoquímicos de los pozos LV-1, LV-3, LV-4, LV-5, LV-11 y LV-13 proporcionados por la Comisión Federal de Electricidad.

## 2. Metodología

Los indicadores geoquímicos usados fueron las concentraciones de iones, las estimaciones de la temperatura de yacimiento por medio de diversos geotermómetros  $T_{\text{SiO}_2}$  (Fournier y Potter II, 1982),  $T_{\text{Na-K-Ca}}$  (Fournier y Truesdell, 1973) y  $T_{\text{Na/K}}$  (Nieve y Nieve, 1987); entalpías de las descargas totales, y  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta\text{D}$  en los fluidos. Para investigar procesos de yacimiento se utilizó el método basado en la comparación de diversas estimaciones de entalpía (entalpía de la descarga total y entalpías interpoladas de las tablas de vapor correspondientes a las temperaturas Na/K, Na-K-Ca y sílice) de un pozo específico contra el tiempo (Truesdell *et al.*, 1995). Para investigar relaciones de mezcla se obtuvieron correlaciones lineales entre especies químicas conservativas e isotópicas y para estimar las características de los fluidos primarios participantes de la mezcla se utilizó el modelo de mezcla entalpía-cloruros (Truesdell y Fournier, 1975).

## 3. Resultados

### 3.1 Condiciones pre-explotación

Se consideraron datos geoquímicos tempranos de fluidos de pozos de Las Tres Vírgenes para investigar las distribuciones de cloruros (Figura 2) y temperaturas estimadas de yacimiento (Figura 3) en sus condiciones iniciales. Como se aprecia en la Figura 2 los máximos cloruros (9,000 ppm) se localizan en la zona sur con tendencia a decrecer tanto hacia el norte hasta valores muy bajos en el pozo LV-2 como hacia el este del campo con valores menores a 5,000 ppm en el pozo LV-7. La distribución de temperatura (Figura 3) muestra valores máximos ( $> 260^\circ\text{C}$ ) en el pozo LV-13 de la zona sur mientras que temperaturas de  $\sim 260^\circ\text{C}$  se localizan tanto hacia el norte como hacia el sur decayendo en el pozo LV-2. Las temperaturas decrecen hacia el este del campo a valores menores de  $160^\circ\text{C}$  en el pozo LV-7. Las distribuciones de cloruros y de temperatura indican que el ascenso principal de fluidos se localiza en la zona sur y que la dirección del flujo es hacia el norte (Flores-Armenta y Jaimes-Maldonado, 2001).

### 3.2 Evidencias de mezcla

Tomando en cuenta que los elementos B, Li y Cl son especies conservativas (Giggenbach, 1992), éstos se utilizaron para investigar si los fluidos producidos provienen de una fuente única o si existe más de una fuente en el sistema. En la Figura 4 se muestran los promedios anuales de B vs Cl para todos los pozos y se observa una tendencia lineal que sugiere mezcla de fluidos. La línea de ajuste tiene un

coeficiente de correlación de 0.87. Como se aprecia en la Figura 4, los componentes primarios de la mezcla (extremos de la línea) son los fluidos del pozo LV-13 (el más profundo, 2,414 m), que constituyen el componente más caliente y más salino, y los del pozo LV-2 (el más somero, 1,270 m), que denotan el componente menos salino y de menor temperatura. La composición de los fluidos producidos por los pozos LV-1, LV-3, LV-4, LV-5 y LV-11 se alinea en la tendencia indicando que consisten de diferentes proporciones de los dos componentes primarios. En la Figura 5 se graficaron datos de promedios anuales de Li vs Cl y de nuevo se observa una tendencia de mezcla, con un coeficiente de correlación de 0.88, con los mismos componentes primarios mencionados.

La evidencia de mezcla se observa también en la Figura 6 donde se graficaron los valores de  $\delta D$  vs  $\delta^{18} O$  de los fluidos producidos. Aunque se cuenta con datos isotópicos relativamente escasos y no existen datos para el pozo LV-2, se nota una tendencia lineal con pendiente positiva y con un coeficiente de correlación de 0.69. La pendiente positiva indica mezcla de fluidos y los componentes primarios se identifican como las composiciones de los pozos LV-1 y LV-13 representando los fluidos del yacimiento y las de los pozos LV-4 (muestra de 2007) y LV-5 como representativos del componente más diluido. Es importante notar el agotamiento isotópico de más de 5‰ en  $\delta D$  en los pozos LV-4 y LV-11 obtenidos en 2007, con respecto a sus composiciones obtenidas en 2003. Las variaciones en la composición isotópica a través del tiempo indican dilución, ya que las muestras tomadas en 2007 muestran agotamiento isotópico con respecto a datos previos, como sigue. En el pozo LV-4 la disminución en  $\delta^{18} O$  fue de ~0.7‰ y en  $\delta D$  fue de más de 5‰ con respecto a 1997; mientras que en el pozo LV-11 las disminuciones fueron de ~0.6‰ en  $\delta^{18} O$  y ~7‰ en  $\delta D$  con respecto a 2003.

### 3.3 Comportamiento de indicadores geoquímicos a través del tiempo

El comportamiento de los cloruros en los pozos a través del tiempo se observa en la Figura 7. Como puede verse, en todos los pozos las variaciones de cloruros muestran tendencia a decrecer. Por ejemplo, en el pozo LV-4 entre 1996 y 2005 los cloruros disminuyeron ~2000 ppm mientras que en el pozo LV-11 de 2001 a 2005 decrecieron levemente pero durante 2005-2006 se notan fluctuaciones importantes de cloruros. En la Figura 8 se observa que la temperatura de yacimiento disminuyó ~10°C en el pozo LV-1 de 2000 a 2003 mientras que en la Figura 9 en el pozo LV-4 se observan variaciones de temperatura en intervalos cortos de tiempo durante 1999-2005. Posteriormente el pozo se cerró de forma temporal y reinició operación en 2006 con una recuperación importante de temperatura (de ~20°C) hasta 2007. Las variaciones de cloruros y de temperatura en los pozos de Las Tres Vírgenes a través del tiempo confirman la ocurrencia de procesos de mezcla y dilución sugeridos por el comportamiento de especies químicas e isotópicas.

Con el propósito de investigar los principales procesos de yacimiento y para definir los períodos de tiempo de ocurrencia de los mismos, se utilizó el método de comparación de diversas entalpías de acuerdo al método propuesto por Truesdell *et al.* (1995). En la Figura 10 se muestran las historias de entalpía de la descarga total y de las entalpías estimadas por medio de los geotermómetros de sílice y Na/K para el pozo LV-4. El comportamiento de la entalpía de descarga total de 2001 a 2004 indica más de una entrada de fluidos y ebullición “cercana al pozo” del fluido en su trayecto hacia el pozo causada por la disminución de la presión de fondo. Como resultado de la ebullición cercana al pozo, la entalpía de la descarga total se incrementa. Al mismo tiempo, el ingreso de fluidos de menor temperatura se identifica por el patrón  $H_{SiO_2} > H_{Na/K}$  debido a que el geotermómetro Na/K es de “respuesta lenta” si se compara con el geotermómetro de sílice, por lo que indica una temperatura previa del fluido. En 2004 el patrón de entalpías:  $H_{descarga\ total} \cong H_{Na/K} \cong H_{SiO_2}$  indica que el pozo produce desde una fase líquida en

equilibrio. Debido a la relativamente baja entalpía de la descarga total, se infiere que el proceso de ebullición cercana al pozo ha cesado. Durante 2005 el patrón de entalpías observado es  $H_{SiO_2} > H_{Na/K} = H_{descarga\ total}$  que indica el ingreso agua de menor temperatura con re-equilibrio de la entalpía Na/K. Este patrón poco usual pudo haber sido inducido por la reducción en el orificio de producción debido a que el pozo estaba en proceso de cierre. Durante 2006 el pozo produjo desde un líquido en equilibrio. En 2007 el patrón de entalpías:  $H_{descarga\ total} = H_{Na/K} > H_{SiO_2}$  muestra la mezcla de agua de menor temperatura cerca del pozo, con líquido equilibrado. Las entalpías de sílice resultan ser más bajas por la dilución de la sílice sin re-equilibrio posterior. En el pozo LV-11 (Figura 11) durante 2006 el patrón de entalpías:  $H_{Na/K} > H_{SiO_2} > H_{descarga\ total}$  indica claramente la mezcla en el pozo de agua de menor temperatura con líquido equilibrado mientras que durante 2007 el patrón:  $H_{Na/K} > H_{SiO_2} = H_{descarga\ total}$  resulta de la mezcla con aguas de menor temperatura que ocurre cerca del pozo, con re-equilibrio de la sílice pero no de la entalpía Na/K.

Las historias de las entalpías del pozo LV-13 se muestran en la Figura 12. El patrón general observado  $H_{descarga\ total} > H_{SiO_2} > H_{Na/K}$  indica ebullición cercana al pozo por períodos cortos de tiempo, que corresponden a los incrementos en la entalpía de la descarga total y por el patrón observado hasta 2006:  $H_{SiO_2} > H_{Na/K}$ . También se infiere el fenómeno de mezcla con agua de menor temperatura, cerca del pozo.

Los resultados de la investigación de procesos muestran que además de los fenómenos de ebullición en intervalos cortos de tiempo hallados en los pozos LV-4 y LV-11, los procesos más importantes en los pozos estudiados fueron la entrada de agua de menor temperatura y las múltiples entradas de agua a los pozos por períodos de tiempo relativamente largos. Sin embargo, tales procesos no fueron muy severos en el pozo LV-11, el cual, durante 2003-2004 mostró un comportamiento estable.

### 3.4 Diagrama Entalpía-Cloruros

Con el propósito de estimar la concentración de cloruros y la temperatura de los componentes primarios de la mezcla de fluidos inferida para los fluidos producidos en Las Tres Vírgenes, se utilizó el diagrama entalpía-cloruros (Truesdell y Fournier, 1975). En la Figura 13 se muestran las entalpías estimadas con el geotermómetro Na/K vs las concentraciones de cloruros en la descarga total (promedios anuales en ambos casos), y como se observa los datos presentan una tendencia lineal entre ambos parámetros. Esta tendencia se debe a la mezcla de fluidos y a partir de ella se puede estimar una entalpía (Na/K) promedio para el fluido del yacimiento de 1203 kJ/kg (274°C) y una concentración de cloruros de 6745 ppm; mientras que para el agua de menor temperatura y salinidad se estima una entalpía (Na/K) de 798 kJ/kg (187°C). La salinidad del agua de dilución parecería ser la del pozo más somero LV-2 ~500 ppm. La temperatura de yacimiento estimada para el pozo LV-2 se estimó entre 171-202°C. A partir de este resultado se podría establecer que el acuífero somero que alimentó al pozo LV-2 en el pasado se extiende hacia la zona sur, o que un acuífero somero similar está localizado en la zona sur.

## 4. Conclusiones

El análisis de datos geoquímicos de fluidos de pozos de Las Tres Vírgenes sugiere que los fluidos producidos resultan de una mezcla de fluidos constituida por diferentes proporciones de dos componentes primarios. Los resultados también sugieren que los fluidos de menor salinidad y temperatura arriban a los pozos en intervalos de tiempo relativamente largos, lo que apoya la hipótesis

de mezcla y dilución. El fluido característico del yacimiento parece similar al producido por el pozo LV-13 (el más profundo) mientras que el fluido de menor temperatura y salinidad se asemeja al que produjo el pozo LV-2 (el más somero). Debido a que no se identificaron otros componentes en la mezcla y a que las composiciones de los pozos se alinearon en una misma tendencia, independientemente de su localización (norte o sur), se puede plantear que el acuífero somero que alimentó al pozo LV-2 se extiende a la zona sur o que un acuífero similar ocurre en la zona sur. Los resultados de este estudio explican en parte la ocurrencia de incrustaciones en el campo, dado que la mezcla de fluidos favorece el depósito de minerales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen a la Comisión Federal de Electricidad por proporcionar datos y autorizar esta publicación. Los resultados son parte del proyecto “La respuesta a la explotación del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes” realizado en 2007 por CFE-IIE.

## Referencias

- Arnórsson S., 1992. Geochemistry and geothermal resources in Iceland, En: *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. F. D'Amore (Coordinador) UNITAR/UNDP, pp. 145-196.
- Barragán, R.M., E. Iglesias, R.J. Torres, V.M. Arellano, R. Tapia, P. Hernández, and M. Ramírez, 2010. Chemical modeling of fluids from the Las Tres Vírgenes B.C.S. (Méjico) geothermal field. Sometido al *World Geothermal Congress 2010*.
- Bethke, C.M., 1996. *Geochemical reaction modeling. Concepts and applications*. Oxford University Press, 397 p.
- Flores-Armenta, M., and G. Jaimes-Maldonado, 2001. The Las Tres Vírgenes Mexico geothermal reservoir. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 25, pp. 525-534.
- Fournier, R.O., and A.H. Truesdell, 1973. An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 37, pp. 515-525.
- Fournier, R.O., and R.W. Potter II, 1982. A revised and expanded silica (Quartz) geothermometer. *Geothermal Resources Council Bulletin*, Nov. 1982, pp. 3-12.
- Giggenbach, W.F., 1992. Chemical techniques in geothermal exploration. In: *Applications of geochemistry in geothermal reservoir development*. F. D'Amore (Coordinador) UNITAR/UNDP, pp. 119-144.
- Gutiérrez-Negrín, L.C.A., 2007. 1997-2006: A decade of geothermal power generation in Mexico. *Geothermal Resources Council Transactions*, Vol. 31, pp. 167-172.

Iglesias, E.R., R.M. Barragán, R.J. Torres y N. Reyes, 2007. Estudio de la respuesta a la explotación del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, B. C. S. Informe IIE/11/13361/I 02F, Instituto de Investigaciones Eléctricas, Cuernavaca, México, para la Comisión Federal de Electricidad, 143 p.

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

Portugal E., P. Birkle, R.M. Barragán, V.M. Arellano, E. Tello, and M. Tello, 2000. Hydrochemical-isotopical and hydrogeological conceptual model of the Las Tres Vírgenes geothermal field, Baja California Sur, México. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 101, pp. 223-244.

Truesdell, A.H., and R.O. Fournier, 1975. Calculation of deep reservoir temperatures from chemistry of boiling hot springs of mixed origin. *2<sup>nd</sup> United Nations Symposium on the Development and use of geothermal resources*, San Francisco, Abstract, Vol. III-25.

Truesdell, A.H., M.J. Lippmann, J.L. Quijano, F. D'Amore, 1995. Chemical and physical indicators of reservoir processes in exploited high-temperature, liquid-dominated geothermal fields. *Proc. World Geothermal Congress 1995*, Eds. E. Barbier, G. Frye, E. Iglesias and G. Palmasson, pp. 1933-1938, International Geothermal Association, New Zealand.

Truesdell, A.H., 1998. Report on a geochemical conceptual model for Las Tres Virgenes geothermal field. *Informe para Comisión Federal de Electricidad*, 16 p.

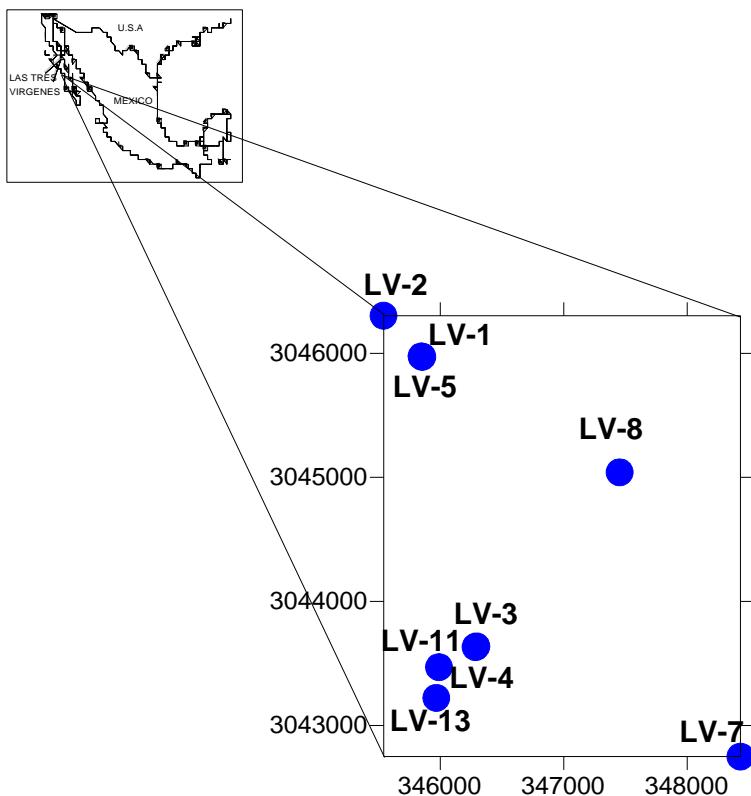


Fig. 1. Localización del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes. Se muestra también la localización de los pozos.

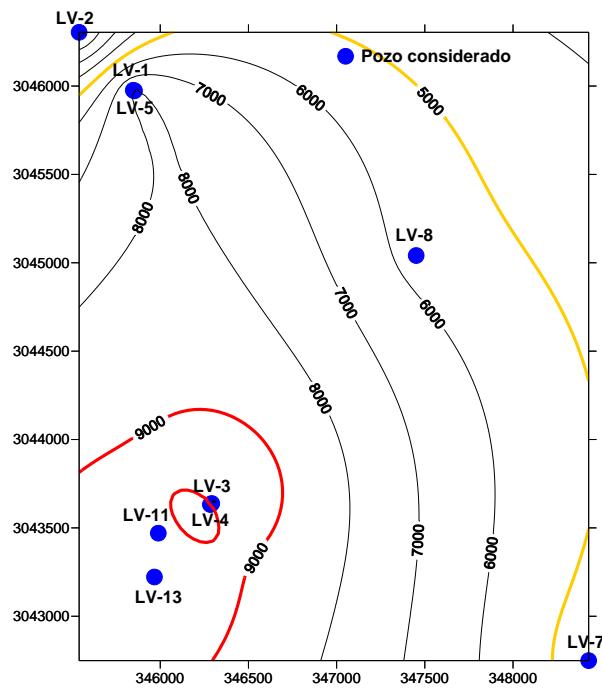


Fig. 2. Distribución de cloruros en agua separada del campo geotérmico de Las Tres Vírgenes, de acuerdo con datos tempranos.

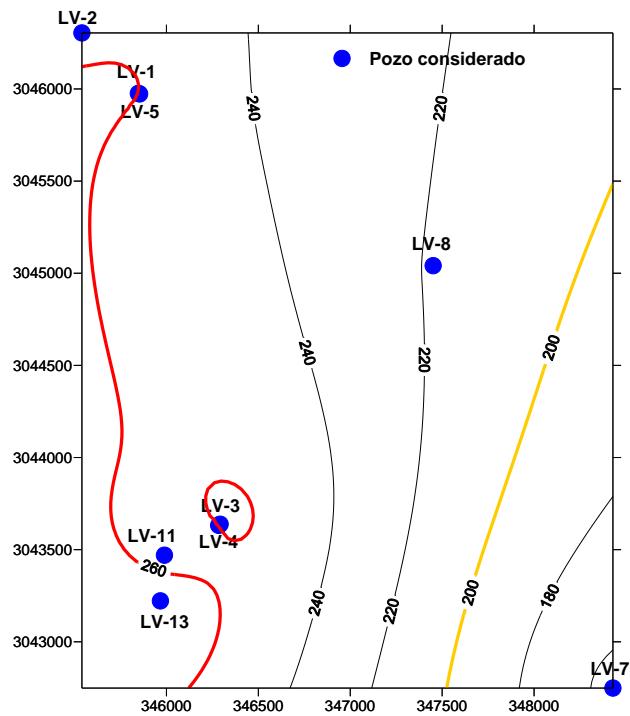


Fig. 3. Distribución de estimaciones de temperatura de yacimiento (Na/K), de acuerdo con datos tempranos.

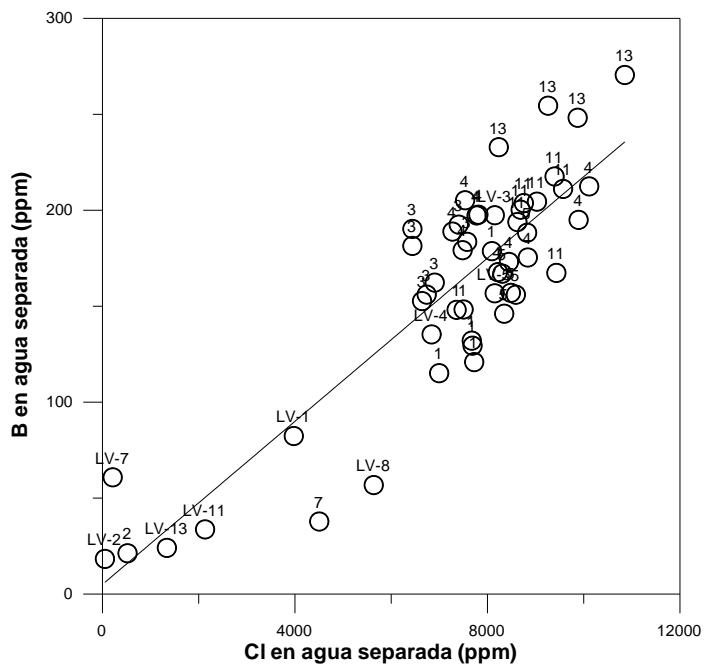


Fig. 4. *B* vs *Cl* en agua separada de pozos de *Las Tres Vírgenes*.

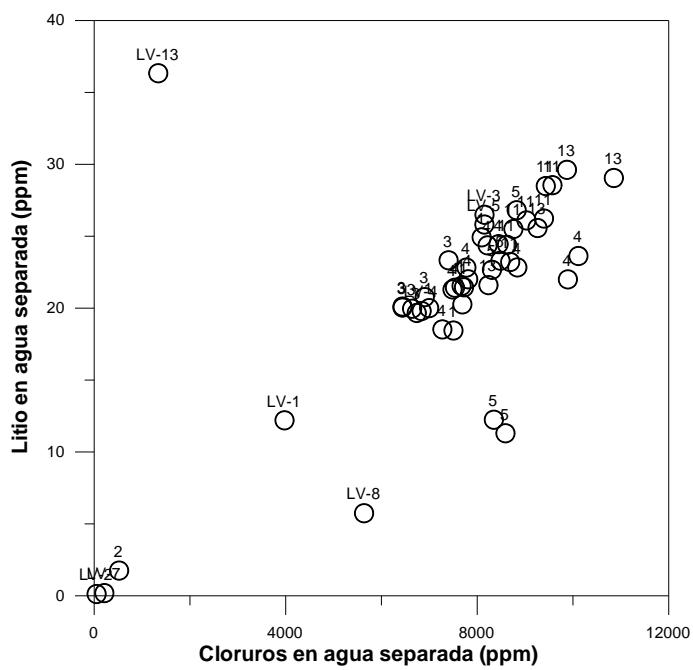


Fig. 5. *Li* vs *Cl* en agua separada de pozos de *Las Tres Vírgenes*.

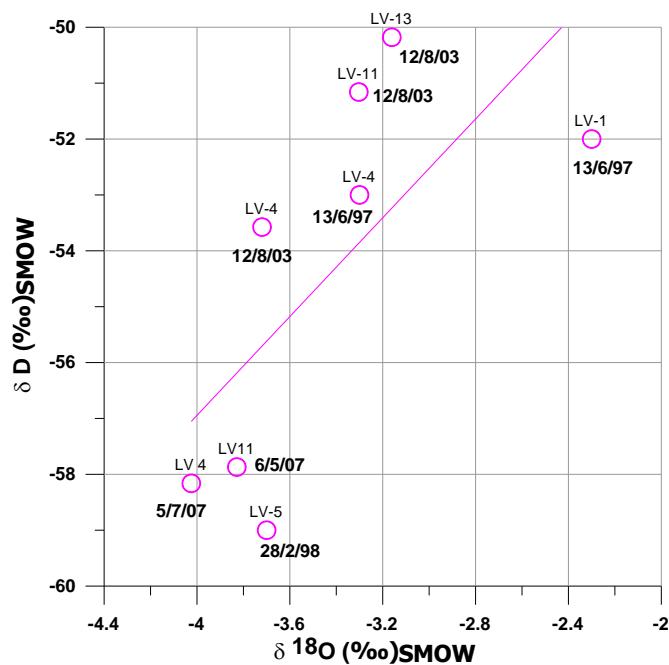


Figure 6.  $\delta D$  vs  $\delta^{18}\text{O}$  en la descarga total de pozos de Las Tres Virgenes.

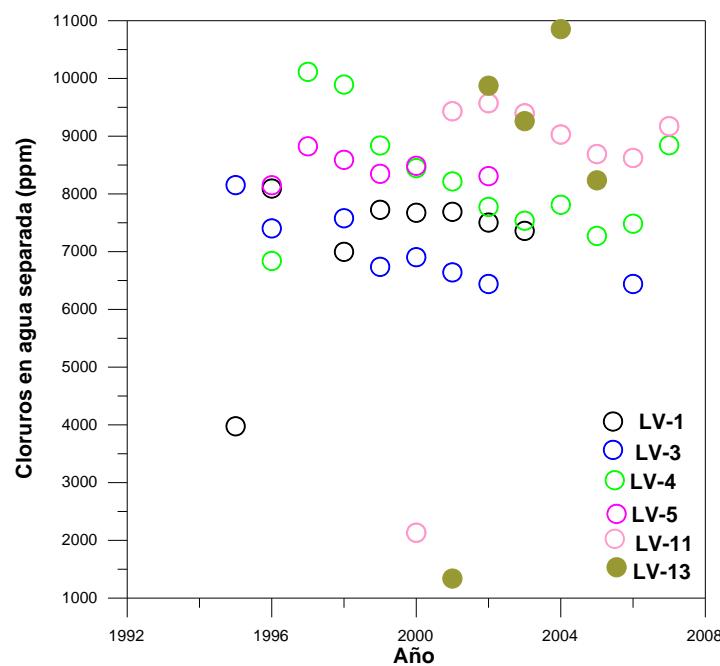


Fig. 7. Concentración de cloruros en agua separada de pozos de Las Tres Virgenes vs tiempo.

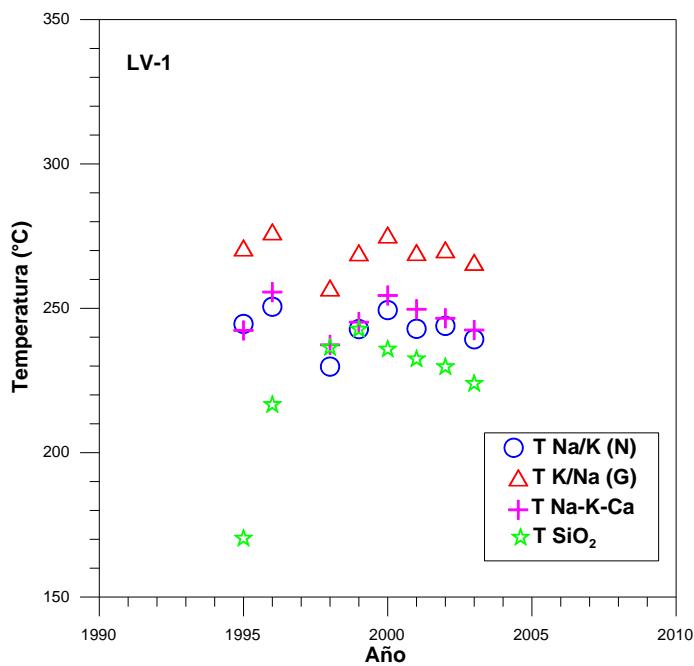


Fig. 8. Estimaciones de temperatura de yacimiento para el pozo LV-1 vs tiempo.

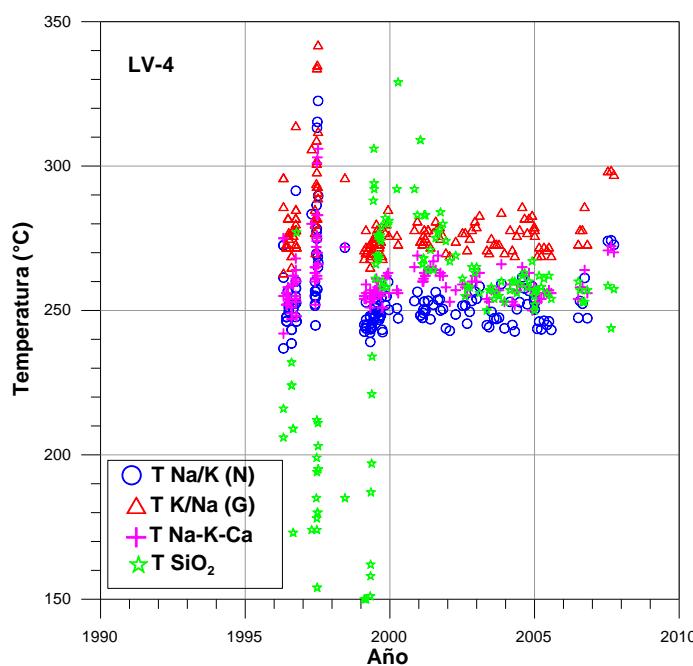


Fig. 9. Estimaciones de temperatura de yacimiento para el pozo LV-4 vs tiempo.

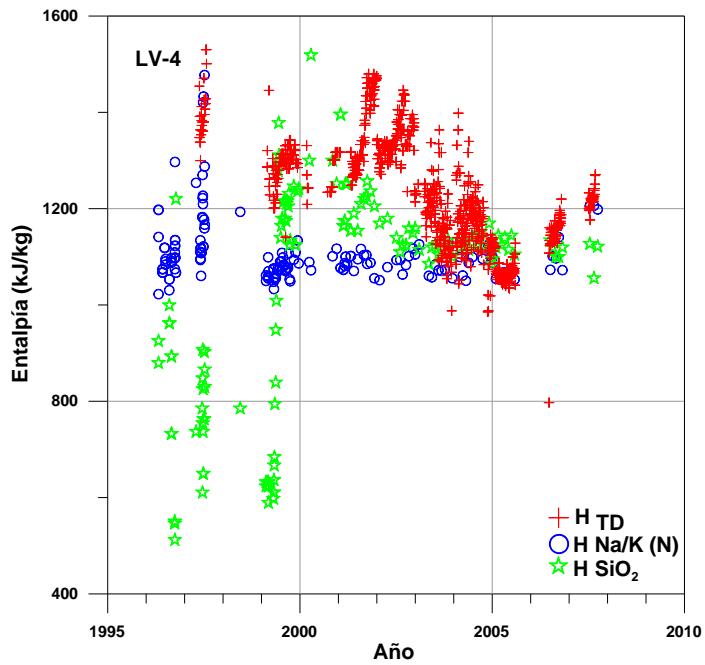


Fig. 10. Enthalpía de la descarga total y entalpías Na/K y  $SiO_2$  para el pozo LV-4 vs tiempo.

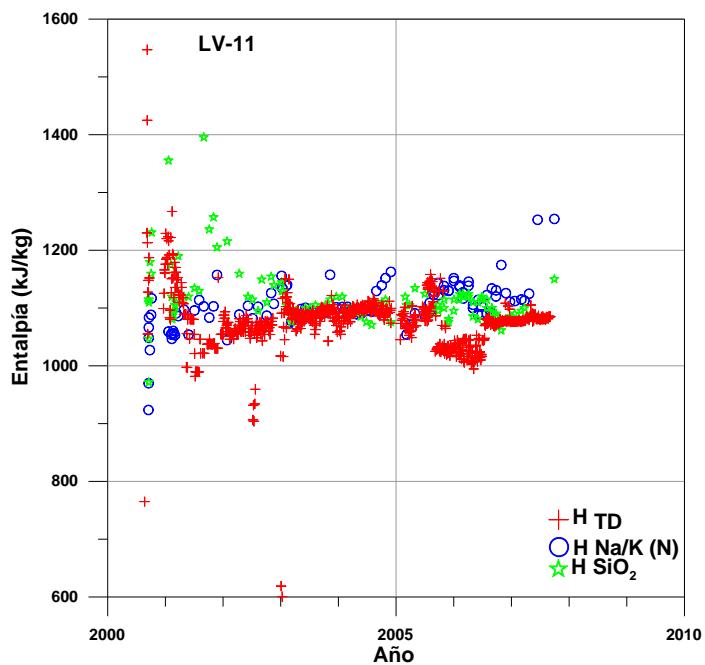


Fig. 11. Enthalpía de la descarga total y entalpías Na/K y  $SiO_2$  para el pozo LV-11 vs tiempo.

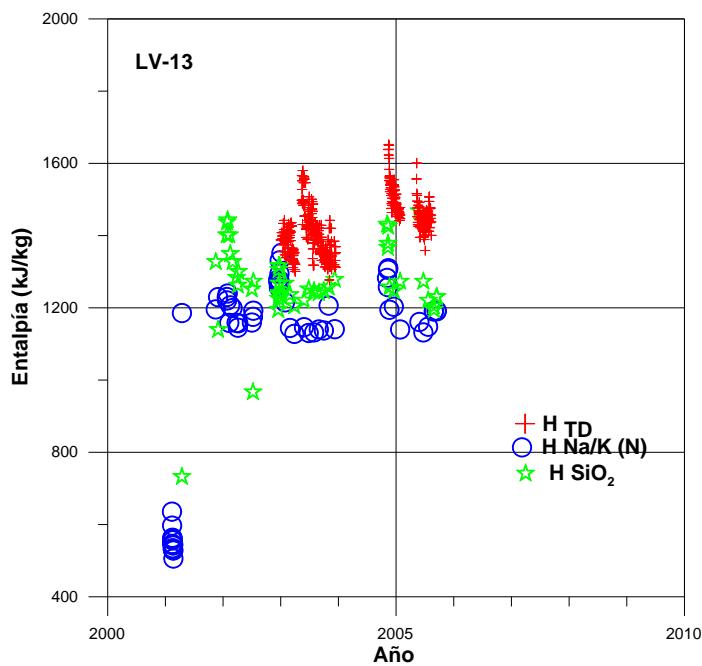


Fig. 12. Enthalpía de la descarga total y entalpías Na/K y SiO<sub>2</sub> para el pozo LV-13 vs tiempo.

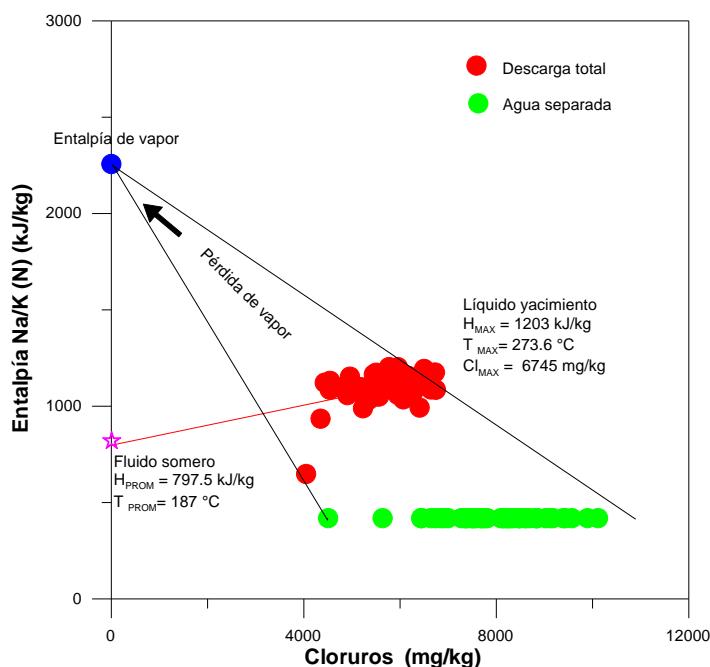


Fig. 13. Modelo de mezcla entalpía-cloruros (Truesdell and Fournier, 1975).