

Hidroquímica y geotermometría de las aguas termales del Municipio Benítez del estado Sucre, Venezuela

Benítez José
Vallejo Aníbal
López Mariceli
Mostue Maj
Departamento de Química. Escuela de Ciencias.
Universidad de Oriente -UDO
benitezudo@gmail.com
Venezuela- Cumaná

Fecha de recepción: 19-03-2014 Fecha de aceptación: 09-01-2014

Resumen

Las aguas termales constituyen un recurso que, además de incrementar el turismo, es utilizado para la producción de energía eléctrica. Se evaluaron 20 fuentes de aguas termales del municipio Benítez, para conocer su hidroquímica y estimar la temperatura de los reservorios, mediante el uso de geotermómetros, que emplean la composición química del agua que emerge. En las fuentes seleccionadas, se realizaron mediciones "in situ" y se tomaron muestras de agua en el punto de emergencia para su posterior análisis químico. Las temperaturas de las aguas estu-

vieron comprendidas entre 29,5 y 92,7°C, considerándose que, en la zona se encuentran fuentes con características hipotermales, mesotermales y hipertermales. Los valores de pH oscilaron desde ácido (2,0) hasta la neutralidad (6,8), con valores de conductividad (785 - 14455 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y de sólidos totales disueltos (0,29 - 2,65 g/l), que las identifican como aguas con una apreciable mineralización. Entre los iones mayoritarios predomina la presencia de Na^+ (hasta 866 mg/l) y Cl^- (hasta 1602 mg/l). La secuencia predominante entre los cationes fue $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ y entre los aniones fue $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. Los iones minoritarios,

en su mayoría, están por debajo de 1 mg/l. Por su parte, la presencia de los isótopos estables oxígeno-18 (^{18}O) y deuterio (^2H), muestran que son aguas debidas a evaporación. Las temperaturas estimadas, con diferentes geotermómetros Na/K, oscilaron entre 197 y 937°C. Las aguas estudiadas potencialmente pueden ser usadas como fuentes de energía eléctrica, además de fines recreativos y de esparcimiento que promuevan el desarrollo económico y social de los sectores donde emergen.

Palabras clave: aguas termales; hidroquímica; geotermometría; municipio Benítez

Hydrochemistry and geothermometry of the thermal waters of the Benitez Municipality state Sucre, Venezuela

Abstract

The thermal waters are a resource that, in addition to increasing tourism, is used for the production of electric power. Twenty hot springs of the Benitez municipality were evaluated, to know their hydrochemistry and to estimate the temperature of the reservoirs, through the use of geothermometers, which use the chemical composition of the water that emerges. In the selected sources, "in situ" measurements were taken and water samples were taken at the point of emergence for further chemical analysis. The temperatures of the waters were between 29.5 and

92.7 ° C, considering that, in the area are sources with hypothermal, mesothermal and hyperthermal characteristics. The pH values ranged from acid (2.0) to neutrality (6.8), with conductivity values (785 - 14455 pS / cm) and total dissolved solids (0.29 - 2.65 g / l) , that identify them as waters with an appreciable mineralization. Among the major ions, the presence of Na + (up to 866 mg / l) and Cl- (up to 1602 mg / l) predominates. The predominant sequence among the cations was Na + > K + > Ca2 + > Mg2 + and between the anions was Cl - > SO42 - > HCO3 - . "The minority ions, for the most part,

are below 1 mg / l. The presence of the stable isotopes oxygen-18 (18O) and deuterium (2H), show that they are water due to evaporation. The estimated temperatures, with different Na / K geothermometers, oscillated between 197 and 937 ° C. The studied waters can potentially be used as sources of electrical energy, in addition to recreational and leisure purposes that promote the economic and social development of the sectors where they emerge.

Key words: thermal waters, hydrochemical, geothermometry, municipality Benitez.

Introducción

El agua que se escurre por la superficie de la tierra (producto de lluvia, de deshielo, de cursos de agua, entre otros) se infiltra en el terreno y, a través de grietas y fracturas puede alcanzar profundidades de varios cientos o hasta miles de metros. Si este hecho ocurre en una zona donde el gradiente geotérmico es suficientemente anómalo, como para que el agua del acuífero alcance una temperatura adecuadamente alta, estamos en presencia de una manifestación hidrotermal (Mook, 2002). La calidad del agua que emerge de estas manifestaciones se modifica a medida que se mueve por las capas de los suelos y rocas donde fluye. Poco a poco, el agua lixivia o disuelve las formaciones rocosas que atraviesa y adquiere minerales y sustancias químicas que alteran su calidad (Price, 2003). Al mismo tiempo, el agua isotópicamente ligera pasa a la fase vapor de un modo preferencial durante la evaporación. Ello se debe, principalmente, a la menor presión de vapor de aquéllas moléculas más pesadas (Arnórsson, 2000).

En el municipio Benítez, ubicado al sureste del estado Sucre, existen muchas localidades con manifestaciones hidrotermales superficiales con índices variables de temperatura e igualmente, una gran riqueza en sales y minerales disueltos. La mayoría de éstas, se encuentran ubicadas en áreas remotas en la parte noroeste de El Pilar, capital del municipio (Urbani, 1991). Díaz (1971) midió

en dos fuentes de aguas termales de las Minas de Azufre de El Pilar, temperaturas de 93,5 y 34,5°C, respectivamente. Urbani (1985) señaló que en la zona de El Pilar se han medido temperaturas de hasta 100°C. D'Amore *et al.*, (1994) midieron en el área geotérmica de El Pilar-Casanay temperaturas entre 24 y 100°C. Por su parte, Benítez (2007) midió en la zona de Aguas Calientes temperaturas entre 51,5 y 95°C, respectivamente. Algunos de estos sistemas hidrotermales son utilizados desde el punto de vista turístico y terapéutico. No obstante, la estimación de las temperaturas de fondo, constituye una tarea geoquímica fundamental que ayuda a estimar el potencial geoenergético disponible y la factibilidad de explotar sus recursos para la generación de energía eléctrica. Esta estimación de temperaturas se realiza mediante el uso de geotermómetros que emplean la composición química o isotópica de los fluidos que emergen en manantiales hidrotermales de acuerdo a lo descrito por Arnórsson *et al.*, (2006) quienes realizaron dichas estimaciones. Los geotermómetros de Na/K proporcionan temperaturas más confiables y consistentes en estudios de exploración y explotación [Verma *et al.*, (2006)]. De hecho, este comportamiento estable del geotermómetro ha motivado que sus ecuaciones sean, hoy en día, las más usadas en la industria geotérmica mundial [Díaz *et al.*, (2008)].

D'Amore *et al.*, (1994) estimaron la temperatura de reservorio de 13 sistemas hidrotermales en el área

geotérmica de El Pilar-Casanay, utilizando geotermómetros de Na/K, obteniendo valores entre 59 y 364°C.

Por otra parte, la composición química del agua, junto con la abundancia de los isótopos estables del agua, deuterio (²H) y oxígeno-18 (¹⁸O) proporcionan valiosa información sobre el origen y, los procesos hidrológicos y geoquímicos característicos de los sistemas geotérmicos (Plata, 2000).

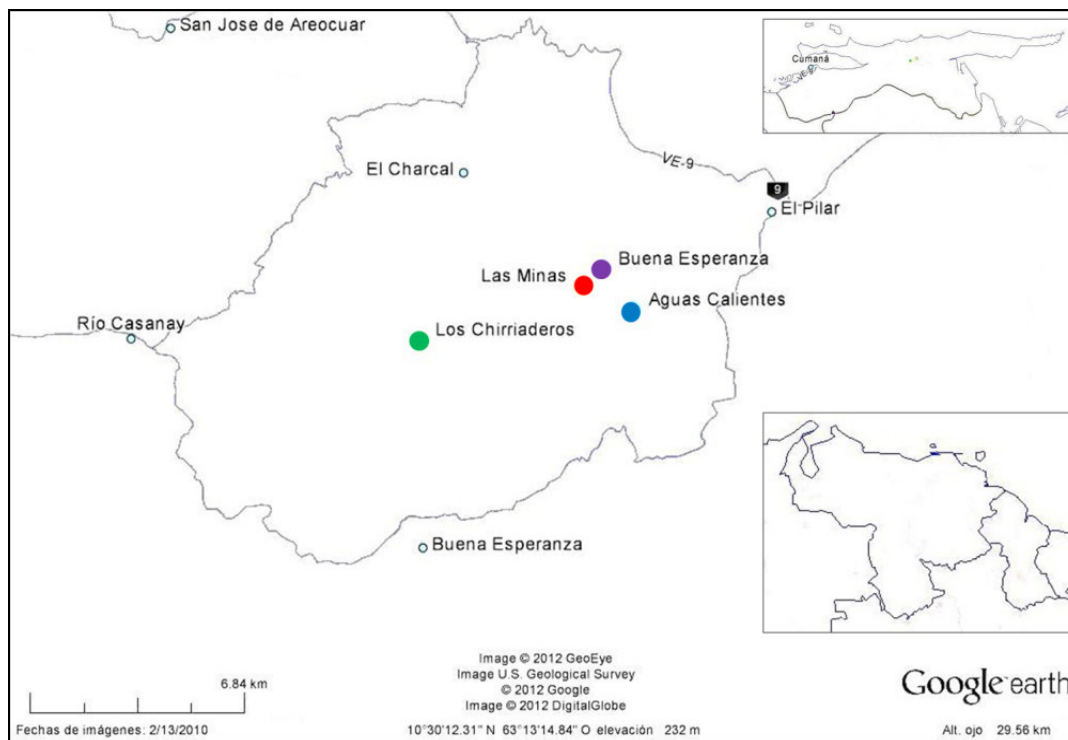
En esta investigación se evaluará la composición química del agua que emerge de 20 manifestaciones hidrotermales, para determinar el tipo de aguas y estimar las temperaturas de los reservorios mediante el uso de geotermómetros químicos de Na/K. Igualmente, para tener una idea del origen de las aguas, se midieron las relaciones isotópicas de los isótopos naturales estables oxígeno-18 y deuterio.

Materiales y Métodos

Área de estudio y posición geográfica

Las zonas en estudio se muestran en la Figura 1 (Aguas Calientes, Buena Esperanza, Las Minas, Los Chirriaderos). Para el registro de la localización geográfica de estas zonas se utilizó un sistema de posicionamiento global (GPS) marca Magellan modelo Explorist 100.

Figura 1. Zonas en estudio



Parámetros fisicoquímicos

Conductividad, Sólidos Totales Disueltos (STD) y Temperatura

Se midieron utilizando un conductímetro digital de campo, marca HACH Sension 5. Este equipo tiene un dispositivo para medir temperatura con una precisión de $\pm 0,1$ °C.

pH

Se midió empleando un multímetro portátil marca WTW modelo Multi350i con una apreciación de $\pm 0,01$ unidades de pH. Posteriormente, se midió en el laboratorio con un pHmetro marca Denver Instrument,

modelo Ultra Basic marca Denver Instrument, con una apreciación de $\pm 0,01$ unidades de pH.

Toma de la muestra

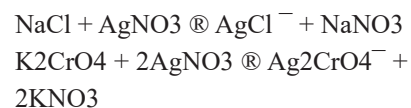
Se realizó en el sitio de emergencia de cada una de las fuentes termales, en envases de polietileno, curados previamente con la misma agua. Luego, se mantuvieron a una temperatura de aproximadamente 4°C, hasta su procesamiento analítico.

Análisis en el laboratorio

Determinación de cloruro (Cl-) mediante el método de Mohr.

La muestra, a un pH neutro o ligeramente alcalino, se tituló con

nitrito de plata (AgNO_3), usando como indicador cromato de potasio (K_2CrO_4). Este método se fundamenta en las Ecuaciones 1 y 2.



Determinación de carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) por titulación

Se determinó por titulación de la muestra con una solución valorada de HCl, mediante dos puntos sucesivos de equivalencia, indicados por medio del cambio de color de dos indicadores adecuados, según las Ecuaciones 3 y 4.

$H^+ + CO_3^{2-} \rightarrow HCO_3^-$ (Fenolftaleína)

$H^+ + HCO_3^- \rightarrow H_2CO_3$ (Naranja de metilo)

Determinación de sulfato (SO₄²⁻) por turbidimetría

El ión sulfato se precipitó en medio ácido con cloruro de bario (Ecuación 5) de modo que se formaron cristales de Sulfato de Bario (BaSO₄) de tamaño uniforme. Se midió la absorbancia luminosa de la suspensión de BaSO₄ con un espectrofotocolorímetro a 420 nm, y se determinó la concentración de

SO₄²⁻ por comparación de la lectura con una curva de calibración.

$SO_4^{2-} + Ba^{2+} \rightleftharpoons BaSO_4$

Determinación de metales por espectrofotometría

Para realizar el análisis de metales se utilizó un espectrofotómetro de absorción atómica, marca Perkin Elmer, modelo 3100 y un fotómetro de llama, marca Eppendorf. Se elaboraron patrones a distintas concentraciones de cada uno de los metales a analizar, con los cuales se trazaron curvas de calibración a las longitudes de onda correspondientes.

Determinación de los isótopos estables deuterio (2H) y oxígeno-18 (18O)

Se utilizó un espectrómetro laser modelo DLT-100. El espectrómetro láser, se calibra automáticamente con los estándares del V-SMOW, proporcionados por la Organización Internacional de Energía Atómica (OIEA).

Cálculo de los geotermómetros químicos de Na y K

El cálculo se realizó empleando las ecuaciones mostradas a continuación:

$$T (^{\circ}C) = \frac{856}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 0,857} - 273,15 \quad T (^{\circ}C) = \frac{833}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 0,780}$$

(I) (Truesdell, 1976)

$$T (^{\circ}C) = \frac{1217}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 1,438} - 273,15$$

(II) (Tonani, 1980)

$$T (^{\circ}C) = \frac{933}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 0,993} - 273,15$$

(III) (Fournier, 1981)

$$T (^{\circ}C) = \frac{1319}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 1,699} - 273,15$$

(IV) (Arnorsson, 1983)
(25-250°C)

$$T (^{\circ}C) = \frac{1178}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 1,470} - 273,15$$

(V) (Arnorsson, 1983) (250-350°C)

$$T (^{\circ}C) = \frac{1390}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 1,750} - 273,15$$

(VI) (Nieva y Nieva, 1987)

$$T (^{\circ}C) = \frac{883}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 0,908} - 273,15$$

(VII) (Giggenbach, 1988)

$$T (^{\circ}C) = 1273,2 \left[\tanh \left(-0,4144 \log\left(\frac{Na}{K}\right) - 0,5642 \right) \right] + 11$$

(VIII) (Díaz, 2008a)

$$T (^{\circ}C) = \frac{883}{\log\left(\frac{Na}{K}\right) + 0,894} - 273,15$$

(IX) (Díaz, 2008b)

(X) (Díaz, 2008c)

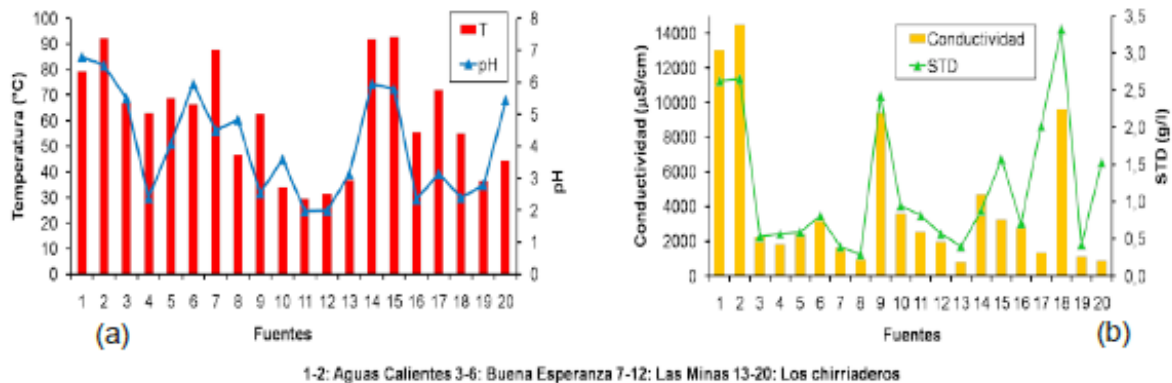
Resultados y Discusión

En la Figura 2a se observa que las temperaturas de las aguas estuvieron comprendidas entre 29,5 (Fuente 11) y 92,7°C (Fuente 15), considerándose que, en la zona se encuentran fuentes con características hipotermales (<35°C), mesotermales (35-37°C) e hipotermales (>37°C).

Además, los valores de pH oscilaron desde ácido (2,0) hasta la neutralidad (6,8). Las altas temperaturas de las aguas hacen presumir que tienen una vía rápida para ascender a la superficie. Sin embargo, en el ascenso la temperatura puede disminuir por interacciones con acuíferos subterráneos cercanos a la superficie, o que la geología del terreno obligue al agua

subterránea a hacer recorridos muy prolongados desde el acuífero antes de emerger. Por otro lado, la Figura 2b muestra que los valores de conductividad (785-14455 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y de sólidos totales disueltos (0,29-2,65 g/l), las identifican como aguas con una apreciable mineralización y un alto contenidos de sales disueltas.

Figura 2. Parámetros fisicoquímicos de las fuentes de aguas termales. 1-2: Aguas Calientes 3-6: Buena Esperanza 7-12: Las Minas 13-20: Los chirriaderos



En la Figura 3a se observa que entre los cationes mayoritarios predomina la presencia de Na^+ (hasta 866 mg/l, Fuente 11), seguido por K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} . Por otra parte, en la Figura 3b se observa que entre los aniones mayoritarios predomi-

na la presencia de Cl^- (hasta 1602 mg/l, Fuente 2), seguido por SO_4^{2-} y HCO_3^- . La secuencia predominante entre los cationes fue $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$ y entre los aniones fue $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$. El alto contenido de estas especies mayoritarias,

puede ser debido a que las aguas que emergen desde su origen, con temperaturas muy altas, multiplican su poder de disolución y disociación de sales y minerales.

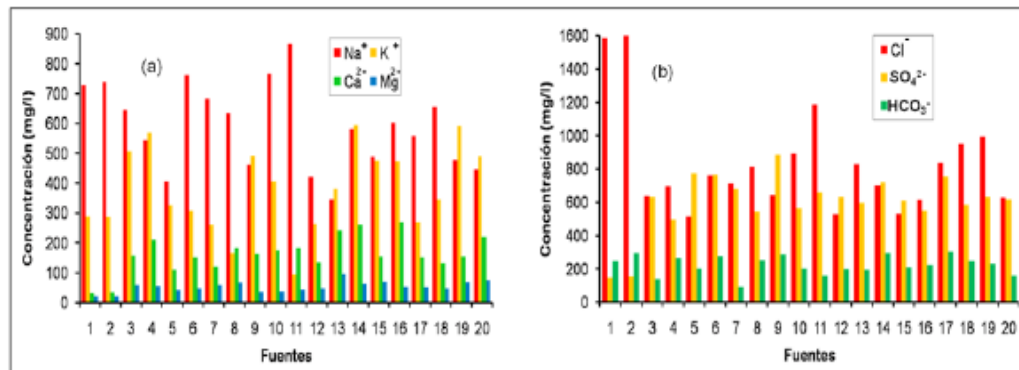
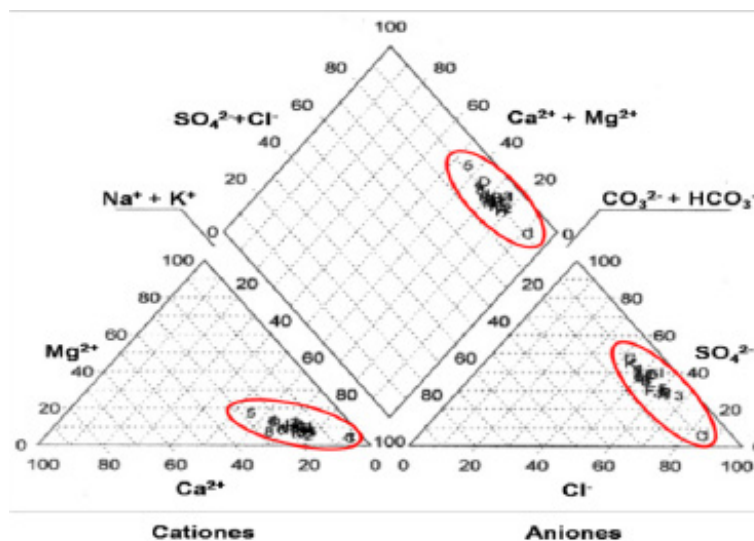


Figura 4. Diagrama de Piper



Mediante el diagrama de Piper (Figura 4) se determinaron las familias de las aguas que predominan en el área de estudio, de acuerdo con el contenido iónico de los iones mayoritarios. Por consiguiente, la clasi-

ficación predominante de las aguas termales estudiadas es clorurada -sódica, por lo tanto, corresponden a un régimen profundo muy cercano a la fuente de calor.

En la Figura 5 se observa que la concentración de iones minoritarios y trazas, en su mayoría, están por debajo de 1 mg/l, lo que puede estar indicando el origen natural de estas especies.

Figura 5. Concentración de iones minoritarios y trazas en las fuentes de aguas termales. 1-2: Aguas Calientes 3-6: Buena Esperanza 7-12: Las Minas 13-20: Los chirriaderos

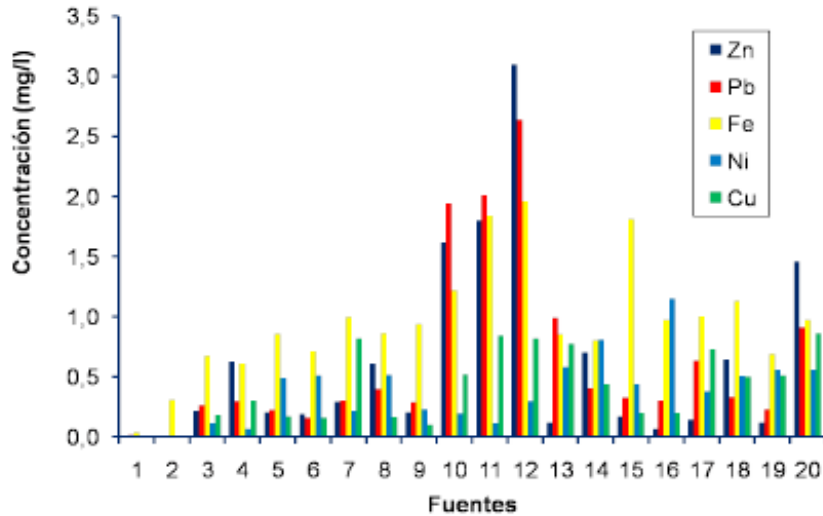
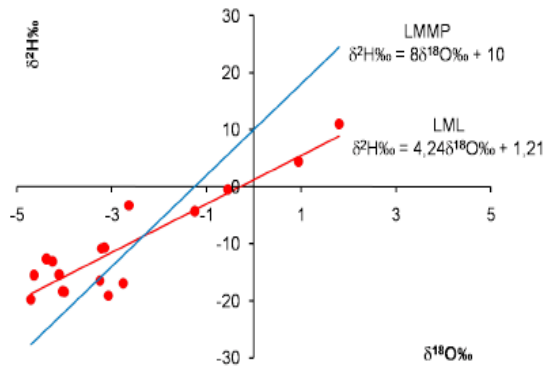


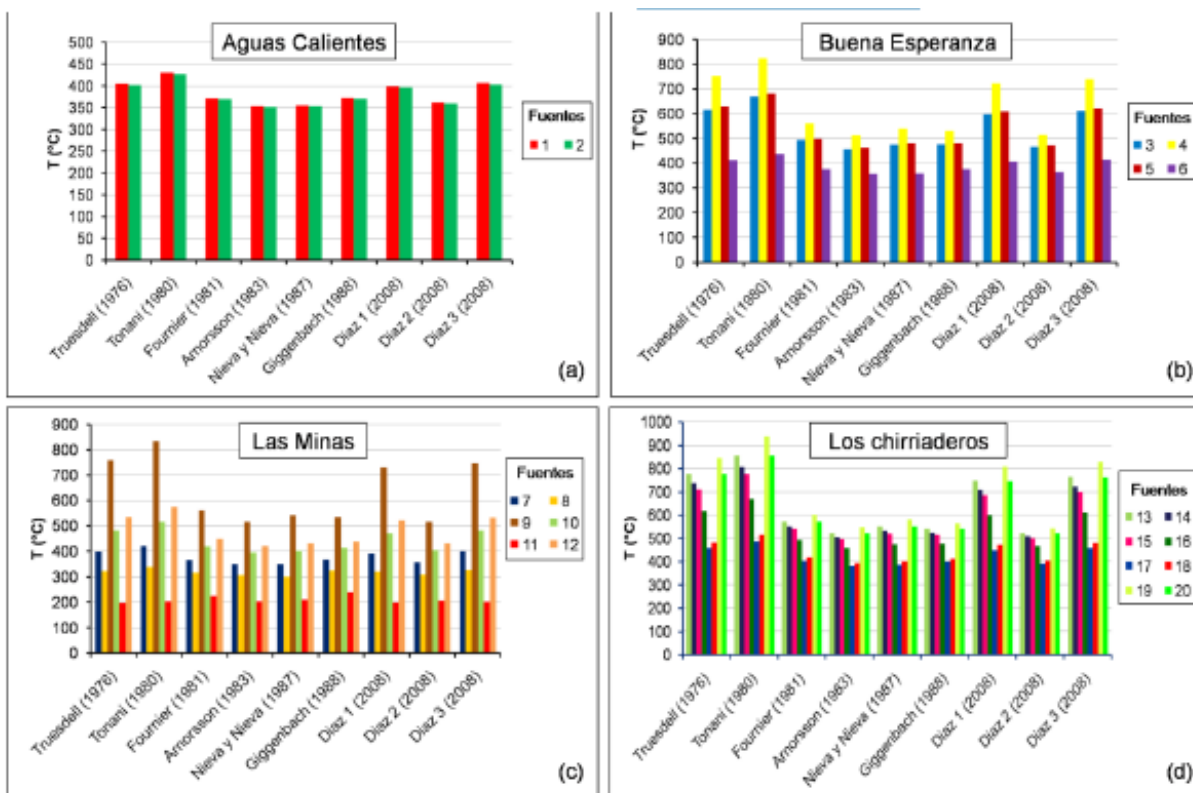
Figura 6. Relación isotópica 18O y 2H



En la Figura 6 se observa que la Línea Meteorica Local (LML) presenta una pendiente menor con respecto a la Línea Meteorica Mundial de las Precipitaciones (LMMP),

y esto hace que la variación de las aguas se incline hacia variaciones debidas al proceso de evaporación. La evaporación favorece la presencia de isotopos pesados, que prevalecen

en el acuífero y pueden provenir de lluvias recientes o de cualquier fenómeno atmosférico natural.

Figura 7. Temperaturas estimadas de los reservorios empleando geotermómetros Na/K


En la Figura 7 se observa que las temperaturas estimadas con diferentes geotermómetros de Na/K (proveen temperaturas más confiables y consistentes), oscilaron entre 197°C (Fuente 11) y 937°C (Fuente 19). Además, en la gran mayoría de las fuentes se estiman temperaturas por encima de los 300°C. Esto indica, que el área de estudio puede ser prometedora para la recuperación de los recursos geotérmicos, para la producción de electricidad, para procesos de secado en actividades agrícolas, fines turísticos y medicinales, entre otras actividades donde se necesite una fuente de calor.

Conclusiones

El municipio Benítez presenta un gran número de fuentes de aguas termales superficiales con un índice variable de temperatura e igualmente una gran riqueza en sales y minerales disueltos. Son clasificadas como cloruradas sódicas. La presencia de los isótopos estables oxígeno-18 (18O) y deuterio (2H), muestran que son aguas debidas a evaporación. Las aguas estudiadas potencialmente pueden ser usadas como fuentes de energía eléctrica, además de fines recreativos y de esparcimiento que promuevan el desarrollo económico

y social de los sectores donde emergen.

Agradecimiento

Al Departamento de Química de la Universidad de Oriente–Núcleo de Sucre y al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).

Referencias Bibliográficas

Arnórsson, S. (2000). Isotopic and chemical techniques in geothermal exploration, development and use. IAEA.

- Arnórsson, S.; Bjarnason, J.Ö.; Giroud, N.; Gunnarsson, I.; Stefánsson, A. (2006). Sampling and analysis of geothermal fluids: *Geofluids*. 6(3): 203- 216.
- Benítez, J. (2007). Análisis fisicoquímico de algunas fuentes de aguas termales de las zonas de El Pilar y Tunapuy del estado Sucre Trabajo para ascender a la categoría de Profesor Asistente. Departamento de Química. Universidad de Oriente, Cumaná.
- D'Amore, F.; Gianelli, G.; Corazza, E. (1994). The geothermal area of El Pilar-Casanay, state Sucre, Venezuela. *Geochemical exploration and model. Geothermics*. 23(3): 283-304.
- Díaz, O. (1971). Análisis químico y físico de las aguas termales del estado Sucre. Trabajo de Ascenso, Departamento de Química, Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela. 100 p.
- Díaz-González, L.; Santoyo, E.; Reyes-Reyes, J. (2008). Tres nuevos geotermómetros mejorados de Na/K usando herramientas computacionales y geoquimométricas: aplicación a la predicción de temperaturas de sistemas geotérmicos. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 25(3): 465-482.
- Mook, W. (2002). Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico, principios y aplicaciones. Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Guías y manuales Nº 1. Madrid, España. 558 pp.
- Plata, A. (2000). Hidrología isotópica e hidroquímica del acuífero cuaternario de la Vega de Granada. Ingeniería Civil. CEDEX. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Nº 120.
- Price, M. (2003). Agua subterránea. Editorial Limusa. Primera Edición. México. 330 p.
- Urbani, F. (1985). Evaluación preliminar de los recursos geotérmicos del estado Sucre. Memorias VI Congreso Geológico Venezolano. Tomo VII. Departamento de Geología, Universidad Central de Venezuela. Caracas. Ediciones del C.D.I.G.N. 4319-4359.
- Urbani, F. (1991). Geotermia en Venezuela. Ed. GEOS. UCV, Caracas. 31: 1-347.
- Verma, S. P.; Pandarinath, K.; Santoyo, E.; González-Partida, E.; Torres-Alvarado, I.S.; Tello-Hinojosa, E.; (2006). Fluid chemistry and temperature prior to exploitation at the Las Tres Vírgenes geothermal field, Mexico. *Geothermics*. 35(2):156-180.