

ESTUDIO FISICOQUÍMICO E ISOTÓPICO DE AGUAS TERMALES DEL MUNICIPIO LIBERTADOR DEL ESTADO SUCRE, VENEZUELA

PHYSICOCHEMICAL AND ISOTOPIC EVALUATION OF HOT SPRINGS FROM LIBERTADOR MUNICIPALITY OF SUCRE STATE, VENEZUELA

JOSÉ L. BENÍTEZ, MAJ B. MOSTUE, MARICELI LÓPEZ

Universidad de Oriente, Núcleo de Sucre, Escuela de Ciencias, Departamento de Química, Cumaná, Venezuela
E-mail: jlbenitez@udo.edu.ve

RESUMEN

Se realizó la evaluación fisicoquímica e isotópica del agua que emerge de 10 fuentes termales del municipio Libertador del estado Sucre. En las fuentes seleccionadas, se realizaron mediciones *in situ* y se tomaron muestras de agua para su posterior análisis químico. Las temperaturas estuvieron comprendidas entre 33,7 y 57,5°C, considerándose que en las zonas se encuentran fuentes con características hipotermiales, mesotermiales e hipotermiales. Los valores de pH oscilaron entre 6,07 y 6,49; indicando que son ligeramente ácidas, con valores de conductividad (9,36-14,16 mS/cm) y de sólidos totales disueltos (3,14-4,06 g/L), que las identifican como aguas con una apreciable mineralización y sólidos disueltos. Entre los iones mayoritarios predomina la presencia de Na⁺ (hasta 2,9658 g/L) y Cl⁻ (hasta 1,9766 g/L), por consiguiente, se clasifican como cloruradas sódicas. La secuencia predominante entre los cationes fue Na⁺ > K⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺ y entre los aniones fue Cl⁻ > SO₄²⁻ > HCO₃⁻. Los iones minoritarios, en su mayoría, están por debajo de 1 mg/L. Tanto el diagrama de Gibbs como el análisis de los isótopos estables ¹⁸O y ²H, muestran que son aguas debidas a evaporación. Las aguas estudiadas pueden ser usadas para fines recreativos y de esparcimiento que promuevan el desarrollo económico y social de los sectores donde emergen.

PALABRAS CLAVE: Iones, mineralización, deuterio.

ABSTRACT

The water from 10 thermal springs in Libertador Municipality of Sucre, Venezuela was analyzed "in situ" (temperature, pH, conductivity, *total dissolved solids*) and in posterior laboratory (physicochemical and isotopic) analysis. Water temperature varied between 33.7 and 57.5 °C indicating the presence of hypo-, meso- and hyperthermal waters. The pH values ranged from 6.07 to 6.49; indicating that they are slightly acidic waters. Conductivity (9.36 to 14.16 mS/cm) and *total dissolved solids* (3.14 to 4.06 g/L) values indicate an appreciable mineralization. The presence of Na⁺ predominates (up to 2.9658 g/L) and Cl⁻ (up to 1.9766 g/L), therefore, these waters are classified as chlorinated sodium. The predominant ions were Na⁺ > K⁺ > Ca²⁺ > Mg²⁺, while the anion sequence was Cl⁻ > SO₄²⁻ > HCO₃⁻. Most minority ions had concentration below 1 mg/L. Both the Gibbs diagram and the isotopic analysis of stable isotopes ¹⁸O and ²H, show that the waters belong to evaporation systems. The hot spring waters studied can be used for recreational purposes, which promote de economic and social development of the areas where they emerge.

KEY WORDS: Ions, mineralization, deuterium.

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los procesos del ciclo hidrológico, el agua meteórica que se infiltra en el terreno y, a través de grietas y formaciones permeables, puede alcanzar profundidades de varios cientos o hasta miles de metros (Mook 2002). En su recorrido, el agua va adquiriendo un conjunto de sustancias que le dan un carácter diferente conforme con la composición de los suelos, su ubicación y los procesos físicos y químicos que se realizan durante su paso (Londoño 2006). Además, 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. Igualmente, una porción de esta agua se origina a partir del magma procedente del interior de la tierra (Mook 2002). Para que el agua pueda

ascender y dar origen a los manantiales termales, debe existir, además del sistema descendente de agua superficial, un sistema ascendente desde el acuífero a la superficie, que ordinariamente es una falla geológica (Celis 2012).

La composición química de esta agua, junto con la abundancia de los isótopos estables del agua, deuterio (²H) y oxígeno-18 (¹⁸O) proporciona valiosa información, entre otras cosas, sobre su origen y sobre las relaciones entre distintos tipos o familias de aguas. La comprensión de estas características es esencial para la exploración y desarrollo de los recursos geotérmicos y el impacto ambiental de su utilización (Arnórsson *et al.* 2006).

Es importante resaltar que, frecuentemente, las aguas termales atraviesan en la última parte de su curso ascendente, una zona de aguas subterráneas frías, y allí

pueden mezclarse con ellas modificando la concentración de sus componentes y su temperatura. Así, en el punto de emergencia las aguas subterráneas pueden originar manantiales fríos y calientes, dependiendo del origen geomorfológico y del efecto geotérmico (Appelo y Postma 2005, Celis 2012).

En Venezuela, existe una gama muy extensa de localidades que presentan una diversidad de fuentes o manifestaciones hidrotermales superficiales, la mayoría se encuentran ubicadas en el estado Sucre representando grandes afloramientos y brotes de agua con un índice variable de temperatura, e igualmente, una gran riqueza en sales y minerales disueltos. Estas fuentes se encuentran ubicadas, en general, a lo largo de fallas tectónicas activas (Bonilla *et al.* 2002). En este sentido, se puede sospechar que, al haber un movimiento tectónico, el agua que brota en estos sitios cambie, de alguna manera, su composición (Urbani 1985).

Al noreste de Tunapuy, municipio Libertador, se

encuentra un conjunto de fuentes hidrotermales, donde su origen morfogeodinámico, viene dado por la falla geológica de El Pilar. Estas fuentes son utilizadas como atractivo turístico y de recreación, posee un frágil ecosistema, cuyo principal recurso son las pozas con sus aguas termales. Por tal motivo, en este trabajo, se evaluó la composición fisicoquímica e isotópica de estas aguas, para establecer el tipo de agua y su condición ambiental, de tal manera, que se pueda promover el desarrollo económico y social de la zona donde emergen.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

La zona en estudio se ubicó entre las coordenadas 10°34' - 10°35' norte y 63°03' - 63°04' oeste. Estas localidades se encuentran colindantes con la carretera, entre la población de Tunapuy y la hacienda Aguasana del estado Sucre (Fig. 1). Se utilizó un sistema de posicionamiento global (GPS) Explorist 100, marca Magellan, para referenciar cada localidad evaluada.

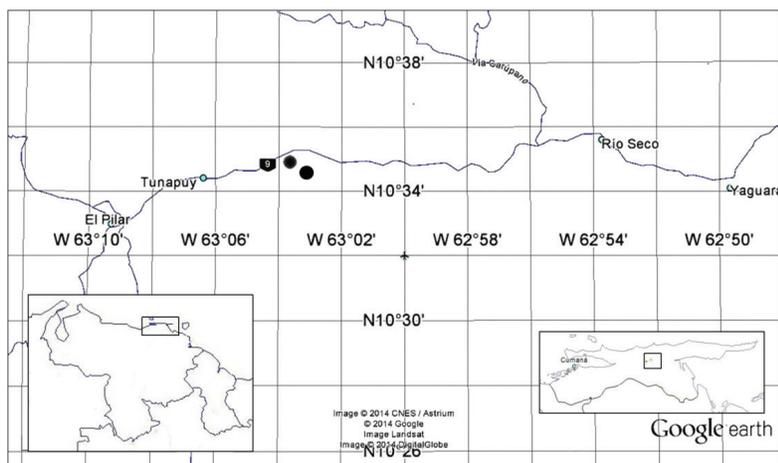


Figura 1. Zonas de muestreo de las aguas termales.

Toma de muestras

Se realizó en el sitio de emergencia de cada una de las 10 fuentes termales seleccionadas. Cada muestra de agua se ubicó individualmente en un envase de polietileno. Para el análisis de metales, se agregó 10 mL de HNO₃ concentrado por cada 500 mL de agua captada (Gómez *et al.* 2006). Luego, se refrigeraron para su posterior análisis.

Conductividad eléctrica (CE), sólidos totales disueltos (STD) y temperatura

Se midieron utilizando un conductímetro digital de campo marca HACH Sension 5.

pH

Se determinó *in situ* usando papel pH marca Sigma-Aldrich Hydrion Brilliant y se confirmó en el laboratorio utilizando un pH-metro digital marca Denver Instrument, modelo Ultra BASIC, precisión de 0,01 unidades de pH.

Determinación de metales por espectrofotometría

Se determinó la concentración de iones metálicos (Na, K, Ca, Mg, Zn, Pb, Fe, Cu, Ni) en muestras de agua, previamente filtradas, utilizando un equipo de emisión óptica con plasma acoplado inductivamente (ICP-OES) marca Perkin Elmer modelo Optima 5400

DV. Con anticipación, se preparó, a partir de un estándar multielemental, los patrones para construir la curva de calibración para cada elemento. La cantidad de iones fue determinada a la longitud de onda más adecuada para cada elemento.

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 (Greenberg *et al.* 1992).

Determinación de cloruro (Cl) mediante el método de Mohr

La muestra, a pH neutro o ligeramente alcalino, se tituló con AgNO_3 , usando como indicador K_2CrO_4 . El AgCl, precipitó cuantitativamente primero, al terminarse el Cl, el AgNO_3 reaccionó con el K_2CrO_4 formando un precipitado rojo ladrillo de Ag_2CrO_4 (Greenberg *et al.* 1992).

Determinación de sulfato (SO_4^{2-}) por turbidimetría

El ión SO_4^{2-} se precipitó en medio ácido con BaCl_2 de modo que se formaron cristales de BaSO_4 de tamaño uniforme. Se midió la absorbancia luminosa de la suspensión de BaSO_4 con un espectrofotocolorímetro a 420 nm, y se determinó la concentración de SO_4^{2-} por comparación con la lectura con una curva de calibración (Greenberg *et al.* 1992).

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

Las muestras fueron analizadas con respecto al Standard Working de Los Gatos Research con un espectrómetro láser para agua líquida modelo DLT-100 (Newman *et al.* 2009).

Determinación de nitrito (NO_2^-) por colorimetría

El método se basó en la reacción de Griess, y es aplicado al agua de mar por Bendschneider y Robinson (1952). Los iones NO_2^- forman un diazoico con la sulfanilamida en medio ácido ($\text{pH} < 2$). Después, el diazoico reacciona con la N-naftil-etilendiamina para formar un colorante rosado que absorbe a la longitud de onda de 543 nm. Las mediciones de concentración de los patrones y muestras se realizaron en un espectrofotómetro de luz visible marca

Genesys, modelo 4001/4 (Senior 1987).

Determinación de nitrato (NO_3^-) por colorimetría

Las mediciones de las concentraciones de NO_3^- de los patrones y muestras se realizaron a una longitud de onda de 543 nm utilizando un autoanalizador Technicon II. La técnica mide, en realidad, la suma de las concentraciones de los iones NO_2^- y NO_3^- . La reducción de los iones NO_3^- a NO_2^- fue efectuada por un pasaje de la muestra a través de una columna de cadmio tratada con cobre. Por sustracción de la concentración de los iones NO_2^- analizados, se hallaron los valores de la concentración de los iones NO_3^- (Senior 1987).

Determinación de fosfato (PO_4^{3-}) por colorimetría

Se determinó según el método descrito por Murphy y Riley (1962). Los iones PO_4^{3-} reaccionan con el molibdato de amonio, en presencia de antimonio (III), para formar un complejo que es, luego, reducido por el ácido ascórbico. Esta forma reducida, de coloración azul, tiene un máximo de absorción a 885 nm. Las mediciones de las concentraciones de los patrones y muestras se realizaron en un espectrofotómetro de luz visible marca Genesys, modelo 4001/4 (Senior 1987).

Determinación de amonio (NH_4^+) por colorimetría

Se determinó utilizando el método de Koroleff (1969), el cual mide la totalidad del nitrógeno amoniacal, $\text{N-NH}_3 + \text{N-NH}_4^+$. Consiste en tratar la muestra cruda con soluciones de fenol y nitroprusiato de sodio y otra de solución de hipoclorito de calcio en medio alcalino con un exceso de tricitrato de sodio a fin de eliminar interferencias. En un primer momento el NH_4^+ (convertido en NH_3), forma una monocloramina con el hipoclorito en medio ligeramente básico. Esta última reacciona con el fenol en presencia de un exceso de hipoclorito para formar el azul de indofenol, el cual absorbe a una longitud de onda de 640 nm. La reacción es acelerada por influencia del nitroprusiato de sodio. Las medidas de absorbancia de los patrones y muestras se realizaron en un espectrofotómetro de luz visible marca Genesys, modelo 4001/4 (Senior 1987).

Clasificación de las aguas

Mediante el diagrama triangular de Piper se determinó las familias de aguas que predominan en el área de estudio, de acuerdo con el contenido de los iones mayoritarios. Igualmente, se utilizó el diagrama propuesto por Gibbs (1970) para explicar los procesos geoquímicos que

controlan la composición química de estas aguas.

Análisis estadístico

Se realizó el análisis estadístico para cada una de las variables evaluadas utilizando el programa Statgraphics Centurion XVI.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo con los resultados presentados en la Tabla 1, la temperatura de las aguas termales osciló

entre 33,7 (fuente 10) y 57,5°C (fuente 7), presentando un gradiente térmico de 23,8°C con una media en la zona de $46,0 \pm 7,94^\circ\text{C}$. Para Rodés (2006), estas variaciones pueden ser producidas por influencia de la mezcla con aguas de precipitación infiltradas. Por su parte, Meléndez y Nuño (2006) indicaron que puede ser producto de la mezcla con aguas más frías procedentes de áreas superiores del acuífero y/o a interacciones con el terreno circundante. Tomando en consideración la clasificación propuesta por Armijo y San Martín (1994), en la zona se encontraron aguas hipotermas (< 35°C), mesotermas (35-37°C) e hipertermas (> 37°C).

Tabla 1. Parámetros físicos y concentración de las especies mayoritarias en las aguas termales del municipio Libertador, estado Sucre.

Fuente	T (°C)	pH	CE (mS/cm)	STD (g/L)	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
1	44,5	6,07	9,360	3,14	870,6	363,5	102	69,8	1.351	1.145	705,7
2	43,5	6,16	9,790	3,18	2.702	500,8	75,9	38,8	1.410	1.112	959,9
3	53,4	6,19	12,65	3,48	2.652	520,5	88,0	40,0	1.605	1.010	970,8
4	54,4	6,20	13,05	3,60	2.308	487,7	94,1	55,5	1.646	1.143	922,1
5	44,4	6,35	11,11	3,54	2.958	572,6	99,4	39,2	1.592	1.080	848,7
6	38,8	6,38	10,92	3,77	2.191	448,6	91,7	47,4	1.792	1.302	845,5
7	57,5	6,22	14,16	3,75	1.821	370,3	99,4	47,0	1.860	1.199	812,2
8	51,6	6,32	13,34	3,98	2.505	540,0	76,7	46,2	1.944	1.198	924,5
9	38,0	6,49	9,950	3,56	2.179	448,6	94,2	46,7	1.671	1.239	763,0
10	33,7	6,43	10,61	4,06	2.771	531,0	85,4	39,7	1.966	1.023	1.009
Máx.	57,5	6,49	14,16	4,06	2.958	572,6	102	69,8	1.966	1.302	1.009
Mín.	33,7	6,07	9,360	3,14	870,6	363,5	75,9	38,8	1.351	1.010	705,7
\bar{X}	46,0	6,28	11,49	3,61	2.296	478,3	90,7	47,0	1.684	1.145	876,1
DS	7,94	0,13	1,680	0,30	603,8	70,28	9,20	9,57	208,7	92,88	97,57

CE: conductividad eléctrica, STD: sólidos totales disueltos, Máx: valor máximo, Mín: valor mínimo, \bar{X} : valor medio, DS: desviación estándar.

Por otro lado, las aguas presentaron valores de pH que oscilaron entre 6,07 (fuente 1) y 6,49 unidades de pH (fuente 9), indicando una ligera acidez, con una media de $6,28 \pm 0,13$ unidades de pH. Un pH ácido o ligeramente ácido es consecuencia de los equilibrios que se establecen por la presencia del ácido sulfhídrico (y sus derivados de oxidación: sulfatos y sulfitos) (Moreno *et al.* 2007). Igualmente, los valores del pH varían con la temperatura de la solución (Arnórsson *et al.* 2006).

La conductividad eléctrica (CE) fluctuó entre 9,360 (fuente 1) y 14,16 mS/cm (fuente 7), con una variación de 4,8 mS/cm y una media de $11,49 \pm 1,680$ mS/cm. Por su parte, los valores de los STD oscilaron entre 3,14 (fuente 1) y 4,06 g/L (fuente 10), con una variación de 0,92 g/L y

una media de $3,61 \pm 0,30$ g/L. Estos altos valores de la CE y de los STD indicaron que son aguas de mineralización importante. Para Martínez *et al.* (2009) la mineralización es consecuencia de la disolución de las sustancias que se encuentran a su paso y a la temperatura que aumenta en proporción de 1°C por cada 30 metros de profundidad, aproximadamente (de 10° a 60°C e, incluso, hasta 200°C en algunas zonas).

Entre los cationes mayoritarios predomina el ion Na⁺, con una concentración que osciló entre 870,6 (fuente 1) y 2.958 mg/L (fuente 5), con una variación de aproximadamente 2.087 mg/L y una media de $2.296 \pm 603,8$ mg/L. En zonas próximas al mar, éste ion se puede incorporar al acuífero, tanto por intrusión como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde

el mar (Londoño 2006). Luego, se presenta el ion K^+ (con una media de $478,3 \pm 70,28$ mg/L); seguido por el ion Ca^{2+} (con una media de $90,7 \pm 9,20$ mg/L) y por último el ion Mg^{2+} (con una media de $47,0 \pm 9,57$ mg/L). Por lo que, la secuencia predominante de estos iones fue: $Na^+ > K^+ > Ca^{2+} > Mg^{2+}$. Para Plata (2002) la secuencia normal en agua de reciente infiltración es: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > Na^+$ y después de un largo tiempo de residencia en el acuífero, se tiende a invertir a: $Na^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+}$. Sin embargo, Vallejos *et al.* (2005) señalan que el distanciamiento del Mg^{2+} respecto al Ca^{2+} puede estar ligado a la disolución de la calcita que es más rápida que la de la dolomita, y a un aporte adicional condicionado por la disolución de yesos.

Entre los aniones mayoritarios, el ion Cl^- fue el más preponderante, con una concentración que osciló entre 1.351 (fuente 1) y 1.966 mg/L (fuente 10), con una variación de 615 mg/L y una media de $1.684 \pm 208,7$ mg/L. Para Cabrera *et al.* (2002), las altas concentraciones de este ion se deben a que las aguas subterráneas tienen una mayor cercanía con la interfase salina, la cual es la principal fuente para aportar Cl^- . Además, el agua de lluvia es una fuente importante del ion Cl^- , especialmente en zonas próximas a la costa. Luego le siguen los iones SO_4^{2-} (con una media de $1.145 \pm 92,88$ mg/L) y HCO_3^- (con una media de $876,1$ mg/L $\pm 97,57$ mg/L). Por lo tanto, la secuencia predominante entre estos iones fue: $Cl^- > SO_4^{2-} > HCO_3^-$. Para Plata (2002) la secuencia normal de estos iones en agua de reciente infiltración fue: $HCO_3^- > SO_4^{2-} > Cl^-$ y después de un largo tiempo de residencia: $Cl^- > SO_4^{2-} >$

HCO_3^- . Indicando además, que las aguas que presentaron esta secuencia predominante suelen corresponder a aguas muy evolucionadas geoquímicamente.

En la Tabla 2 se observa que en la mayoría de las fuentes, la concentración de las especies minoritarias estuvo por debajo de 1 mg/L, lo que puede estar indicando su origen natural. Igualmente, estas concentraciones fueron menores a los valores permitidos para aguas tipo 2 y 4, de acuerdo con las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos (MARNR 1995). Sin embargo, debe tenerse en cuenta, que en condiciones particulares un constituyente minoritario puede alcanzar rangos de concentración más altas que las permitidas.

Igualmente, en la Tabla 2, se presentan las concentraciones obtenidas de las especies que contienen nitrógeno y fósforo, y que usualmente aparecen como componentes minoritarios en las fuentes hidrotermales. Se observó que de forma general estas especies poseen concentraciones por debajo de 5 mg/L, y que su presencia en las aguas solo puede indicar indicio de contaminación cuando aparecen en niveles elevados. De acuerdo con las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos (MARNR 1995), las concentraciones de nitratos y nitritos son muy peligrosas cuando exceden los 10 mg/L. Aranda (2007), midió en la zona concentraciones de nutrientes por debajo de los 4 mg/L.

Tabla 2. Concentración de las especies minoritarias y composición isotópica en las aguas termales del municipio Libertador, estado Sucre.

Fuente	Zn ²⁺ (mg/L)	Pb ²⁺ (mg/L)	Fe ²⁺ (mg/L)	Ni ²⁺ (mg/L)	Cu ²⁺ (mg/L)	NO ₂ ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	NH ₄ ⁺ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	δ ¹⁸ O‰	δ ² H‰
1	0,04	0,01	0,66	ND	ND	0,01	0,08	0,37	0,12	-4,28	-18,5
2	0,02	0,01	0,06	ND	ND	0,01	2,32	0,48	0,09	-4,49	-19,1
3	0,06	0,01	0,19	ND	ND	0,01	0,09	0,2	0,22	-4,26	-19,1
4	0,03	0,03	0,17	ND	ND	0,32	0,04	1,01	2,09	-4,11	-19,2
5	0,03	0,01	0,10	ND	ND	0,08	2,32	0,48	0,09	-3,77	-19,2
6	0,02	ND	0,07	ND	ND	2,36	3,18	0,5	0,16	-3,30	-16,6
7	0,03	0,04	0,13	ND	ND	0,03	0,04	1,48	0,54	-3,21	-16,7
8	0,02	ND	0,07	ND	ND	0,03	0,05	1,08	0,35	-3,30	-16,4
9	0,02	ND	0,14	ND	ND	0,44	0,53	1,01	0,17	-2,94	-16,5
10	0,04	0,01	0,19	0,01	0,02	1,11	0,96	0,62	0,25	-3,42	-15,6
Máx.	0,06	0,04	0,66	-	-	2,36	3,18	1,48	2,09	-2,94	-15,6
Mín.	0,02	0,01	0,06	-	-	0,01	0,04	0,20	0,09	-4,49	-19,2
\bar{X}	0,03	0,02	0,18	-	-	0,44	0,96	0,72	0,41	-3,71	-17,7
DS	0,01	0,01	0,18	-	-	0,76	1,20	0,40	0,61	0,54	1,45

ND: no detectado, Máx: valor máximo, Mín: valor mínimo, \bar{X} : valor medio, DS: desviación estándar.

De acuerdo con el diagrama triangular de Piper (Fig. 2), en la zona predominaron los iones Na^+ y Cl^- . Por consiguiente, la clasificación dominante en la zona es clorurada-sódica; por lo tanto, estas aguas corresponden a un régimen profundo muy cercano a la fuente de calor (Plata 2002).

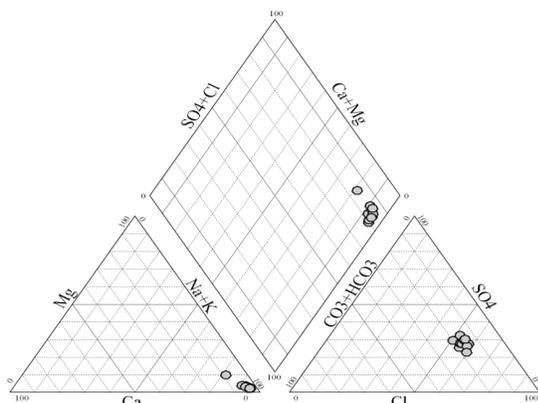


Figura 2. Diagrama de Piper correspondiente a las aguas termales del municipio Libertador, estado Sucre.

Conforme al diagrama propuesto por Gibbs (1970) (Fig. 3), se observó que las aguas termales de la zona poseen una tendencia hacia la evaporación-cristalización, ya que los puntos se ubicaron en el tercio superior derecho del gráfico, lo cual tiene mucho sentido ya que se trata de aguas termales y, en vista de su temperatura, la evaporación de las mismas es mucho mayor. De hecho, en algunas de las fuentes se encontraron depósitos de minerales al evaporarse el agua.

Para la interpretación isotópica, se presenta en la Figura 4 el gráfico de los resultados obtenidos para ^2H y ^{18}O , así como la recta correspondiente a la Línea Meteorica Mundial de las Precipitaciones (LMMP), descrita por Craig (1961). En la figura se puede distinguir claramente que las aguas se ubicaron en el tercer cuadrante (aguas de tipo I), las cuales corresponden a aguas con isótopos relativamente ligeros (empobrecidos), que abandonan el reservorio más rápidamente, haciendo que el agua residual se enriquezca en isótopos pesados (Plata y Greciano 2000). La evaporación favorece la presencia de isótopos pesados, que prevalecen en el acuífero y pueden provenir de lluvias recientes o de cualquier fenómeno atmosférico natural (Clark y Fritz 1997). Debido a dicha evaporación, la concentración de las moléculas de agua más pesadas aumentan en aguas superficiales y los valores de δ se desplazan hacia valores menos negativos (Herraez 2008).

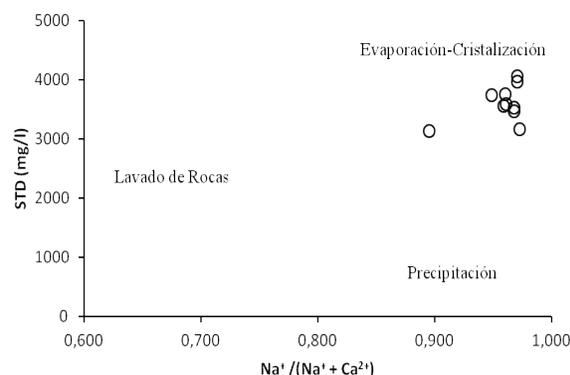


Figura 3. Diagrama de Gibbs correspondiente a las aguas termales del municipio Libertador, estado Sucre.

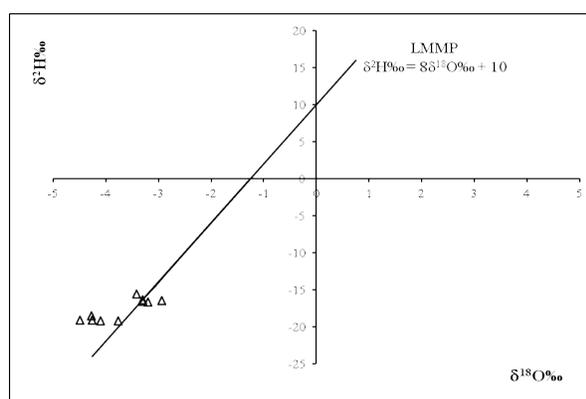


Figura 4. Relación isotópica ^{18}O y ^2H

CONCLUSIÓN

La condición ambiental que presentaron las aguas bajo estudio, es de alta incidencia térmica, que las caracteriza de mesotermal a hipertermal, son débilmente ácidas, los altos valores de la conductividad y sólidos totales disueltos indican que poseen una mineralización importante, con una alta cantidad de sales disueltas. Igualmente, son clasificadas como cloruradas-sódicas, con bajo contenido de especies minoritarias y poseen una tendencia hacia la evaporación-cristalización. Por lo tanto, estas aguas termales pueden ser usadas para fines recreativos y de esparcimiento que promuevan el desarrollo económico y social de los sectores donde emergen.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Química de la Universidad de Oriente, Núcleo de Sucre. Al Consejo de Investigación, Universidad de Oriente, a través del Proyecto CI-2-010201-1395-08. Al Instituto de Investigaciones en Biomedicina y Ciencias Aplicadas de la UDO

(IIBCAUDO). Al Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT).

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APPELO C, POSTMA D. 2005. Geochemistry, groundwater and pollution. A. A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands, pp. 536.
- ARANDA S. 2007. Características fisicoquímicas de las aguas termales de la hacienda posada Aguasana, Tunapuy, estado Sucre-Venezuela. Cumaná: Universidad de Oriente, Escuela de Ciencias, Departamento de Química [Ascenso a Profesor Asistente], pp. 54.
- ARMIJO M, SAN MARTÍN J. 1994. Clasificación de las aguas mineromedicinales. En: Curas Balnearias y Climáticas. Talasoterapia y Helioterapia. Editorial Complutense, Madrid, España, pp. 688.
- ARNÓRSSON S, BJARNASON J, GIROUD N, GUNNARSSON I, STEFÁNSSON A. 2006. Sampling and analysis of geothermal fluids. *Geofluids*. 6(3):203-216.
- BENDSCHNEIDER K, ROBINSON R. 1952. A new spectrophotometric method for the determination of nitrite in sea water. *J. Mar. Res.* 11(1):87-96.
- BONILLA R, QUINTERO A, FIGUEROA DE GIL Y, MÁRQUEZ A, MOYA J, MÁRQUEZ J, RAMÍREZ Y, FRANQUIZ H. 2002. Condición y calidad ambiental de las aguas hidrotermales del complejo Aguas de Moises-Aguas Calientes, estado Sucre, Venezuela. LII Convención Anual ASOVAC. Barquisimeto. Venezuela.
- CABRERA A, PACHECO J, CUEVAS E, RAMÍREZ J, COMAS M, CÁMARA A. 2002. Hidrogeoquímica del agua que subyace a la Japay I, en Mérida, Yucatán, México. *Ingeniería*. 6(3):29-40.
- CELIS R. 2012. Caracterización geoquímica del sistema geotermal termas de Puyehue – Aguas Calientes, región de los lagos, Chile. Santiago de Chile: Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Departamento de Geología [Memoria para Título de Geólogo], pp. 97.
- CLARK I, FRITZ P. 1997. Environmental isotopes in hydrogeology. Lewis Publishers, New York, USA, pp. 312.
- CRAIG H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 133(3465):1702-1703.
- GIBBS R. 1970. Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science*. 170(3963):1088-1090.
- GÓMEZ A, SEGOVIA N, MARTÍNEZ V, ARMIENTA M, BARRAGAN R, ITURBE J, LÓPEZ B, SEIDEL J. 2006. Physical, chemical, bacteriological and radioisotopic parameters from springs and wells around Jocotitlan volcano, Mexico. *Int. J. Environ. Pollut.* 26(3):266-283.
- GREENBERG A, CRESCERL L, EATON A. (Eds). 1992. Standard Methods for the Examination of Water and WasteWater. APHA, AWWA, AWWFC, Washington DC, USA, pp. 1268.
- HERRAEZ I. 2008. Relaciones isotópicas, oxígeno-18 y deuterio, entre las aguas superficiales y subterráneas. Técnicas y aplicaciones multidisciplinares de los isótopos ambientales. UAM Ediciones, Madrid, España, pp. 25-43.
- KOROLEFF F. 1969. Direct determination of ammonia in natural waters as indophenol blue. *International Council for the Exploration of the Sea (ICES), C.M. Interlap. Rep.* (3):19-22.
- LONDOÑO A. 2006. Fundamentos sobre química ambiental, “el agua”. Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, Colombia, pp. 33.
- MARNR (MINISTERIO DEL AMBIENTE Y DE LOS RECURSOS NATURALES RENOVABLES). 1995. Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Decreto N° 883. Gaceta Oficial de la República de Venezuela N° 5021, Extraordinario.
- MARTÍNEZ P, IBARRA G, ZÁRATE R. 2009. Estudio Hidrogeológico en la mina Natividad, Oaxaca. *Geociencia*. 3(5):5-20.
- MELÉNDEZ M, NUÑO C. 2006. Principales características de las aguas termales en acuíferos carbonatados en el Principado de Asturias, España. *Geogaceta*. 39:87-90.
- MOOK W. (Ed). 2002. Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico, principios y aplicaciones. Instituto

- Geológico y Minero de España. Serie: Guías y Manuales N° 1, Madrid. España. pp. 558.
- MORENO C, DÍAZ J, CARABALLO H, CHACÓN K, BAPTISTA J. 2007. Caracterización hidrogeoquímica de las fuentes de aguas termales del estado Trujillo-Venezuela. *Academia*. 6(12):92-105.
- MURPHY J, RILEY J. 1962. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chim. Acta*. 27:31-36.
- NEWMAN B, TANWEER A, KURTAS T. 2009. IAEA standard operating procedure for the liquid-water stable isotope analyser. Laser procedure. IAEA Water Resources Programme, pp. 27.
- PLATA A. 2002. Análisis hidroquímico e isotópico de las aguas subterráneas de varios acuíferos de la zona de Denia, España. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, pp. 21.
- PLATA A, GRECIANO R. 2000. Hidrología isotópica e hidroquímica del acuífero cuaternario de la Vega de Granada. *Ingeniería civil, CEDEX*. (120):115-126.
- RODÉS O. 2006. Control de calidad de las aguas minero-medicinales. Panorama actual de las Aguas Minerales y Minero-medicinales en España. Madrid, España, pp. 75-86.
- SENIOR W. 1987. Manual de métodos de análisis de agua de mar. Instituto Oceanográfico de Venezuela. Universidad de Oriente. Cumaná, Venezuela, pp. 119.
- 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. Ediciones del C.D.I.G.N., Caracas, Venezuela, pp. 4319-4359.
- VALLEJOS A, PULIDO A, SÁNCHEZ F, GISBERT J, MOLINA L. 2005. Evolución geoquímica de las aguas subterráneas en el borde meridional de la Sierra de Gádor (Almería). *Geogaceta*. 37:99-102.