

# Aguas termominerales en el occidente de Venezuela como recurso potencial para energías limpias: Caso de estudio

## Thermo-mineral waters in western Venezuela as a potential resource for clean energy: Case of study

Toro-Mora, Rosibeth<sup>1,2\*</sup>; Jégat, Hervé<sup>3</sup>; Guerrero, Omar Antonio<sup>1,4</sup>; Uzcátegui-Salazar, Marisela<sup>1,5</sup>; Rosales, Rafael<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Grupo de Investigación TERRA. Escuela de Ingeniería Geológica - Universidad de los Andes-Venezuela.

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Universidad de Zaragoza - España

<sup>3</sup> Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial - Universidad de los Andes - Venezuela.

<sup>4</sup> Escuela de Geociencias – Universidad Técnica Particular de Loja - Ecuador

<sup>5</sup> H2PLT Energías Renovables e Hidrogeno Verde, Cataluña - España

[\\*rosibeth@ula.ve](mailto:*rosibeth@ula.ve)

### Resumen

*El actual sistema energético mundial aún continúa basado en la generación de energía a partir de combustible fósil, replanteándose esta situación por múltiples factores e implementando cada vez más el uso de energías primarias que incluye a la energía geotérmica. Venezuela cuenta con estudios donde se evaluó los recursos geotérmicos, quedando el occidente sin inventario. Este trabajo pretende contribuir con el Mapa Geotérmico de Venezuela, estudiando las condiciones geológicas y estructurales de las localidades fuentes y su relación con el fallamiento activo, considerados como sistemas geotérmico-tectónico para esta zona. El caso de estudio se encuentra en la cuenca de Las González, del estado Mérida. Se realizó un muestreo de aguas en 11 puntos dentro de la cuenca media, donde fue analizada por métodos fisicoquímicos e isotópicos. La geología e hidrogeología de la zona, así como los resultados del muestreo, permitieron formular un modelo conceptual de la dinámica del fluido subterráneo, estableciéndose una correlación estructural con las zonas de trazas activas en el sistema de fallas de Boconó y corrimiento de Mesa Bolívar. Las aguas termomineralizadas, se clasificaron de tipo mesothermal e hipertermal (45,2 - 64,4 °C), con pH neutro-alcalinas (7,08-7,5), alta mineralización con conductividades entre 474 y 830  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y TDS entre 355,5 y 622,5 mg/l, y capacidad de neutralizar los ácidos por altos valores de alcalinidad (92,67-101.33 mg/l). El estudio iónico indicó que son aguas sulfatadas-sódicas, con un tiempo de residencia importante, que hace suponer que provienen de grandes profundidades, concordando con el gradiente geotérmico. La presencia de los isótopos estables ( $^2\text{H}$  y  $^{18}\text{O}$ ), demostró la existencia de aguas termales y su posible mezcla con aguas meteóricas, infiltrándose entre 1.300-1.600 msnm, teniendo un recorrido lateral de 2K aproximadamente hasta su afloramiento en rocas porosas y permeables (Fm. La Quinta y Asoc. Tostós).*

**Palabra clave:** Hidrogeomorfología, aguas termominerales, isótopos estables.

### Abstract

*The current world energy system still relies on the generation of energy from fossil fuels. This situation has been reconsidered due to various factors, leading to an increasing implementation of primary energy sources, including geothermal energy. Venezuela has conducted studies to evaluate its geothermal resources, but the western part of the country remains without an inventory. This work aims to contribute to Venezuela's Geothermal Map by studying the geological and structural conditions of the source locations and their relationship with active faulting, considered as geothermal-tectonic systems for this area. The case study is located in the Las González basin, within the state of Mérida. Water sampling was conducted at 11 points within the middle basin and analyzed using physicochemical and isotopic methods. The geology and hydrogeology of the area, along with the sampling results, allowed the formulation of a conceptual model of underground fluid dynamics, establishing a structural correlation with active trace zones in the Boconó fault system and the Mesa Bolívar landslide. The thermo-mineralized waters were classified as mesothermal and hyperthermal (45.2 - 64.4 °C), with neutral-alkaline pH (7.08-7.5), high mineralization with conductivities between 474 and 830  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , and TDS between 355.5 and 622.5 mg/l. They also exhibited the capacity to neutralize acids due to high values of alkalinity (92.67-101.33 mg/l). Ionic analysis indicated that these are sulfated-sodic waters with significant residence times, suggesting they originate from great*

*depths, in agreement with the geothermal gradient. The presence of stable isotopes ( $^2\text{H}$  and  $^{18}\text{O}$ ) demonstrated the existence of thermal waters and their potential mixing with meteoric waters, infiltrating between 1,300-1,600 meters above sea level and traveling laterally for approximately 2K until they emerge in porous and permeable rocks (Fm. La Quinta and Asoc. Tostós).*

**Keywords:** *Hydrogeomorphology, thermo-minerals waters, stable isotopes.*

## 1 Introducción

El sistema energético mundial, actualmente está basado en la generación de energía a partir de combustible fósil como el petróleo, el carbón vegetal, mineral y el gas. La generación de energía, a través de estas materias está siendo ampliamente replanteada por agotamiento de reservas y la concientización de la población y las autoridades sobre la necesidad de proteger el medio ambiente y emplear métodos no contaminantes para la producción de energía (Sánchez-Navarro y col; 2000).

Históricamente, se han considerado energías renovables el conjunto de fuentes energéticas primarias que tienen su origen en la radiación solar, en la fuerza del viento, la energía del agua y la biomasa, pero también se incluye la energía geotérmica que, a diferencia del resto de energías renovables, tiene su origen en el calor interno de la Tierra y que van desde los 15°C de la superficie a los 4.000°C en el núcleo (Sánchez-Navarro y col; 2000). En la actualidad, la energía geotérmica está siendo utilizada por varios países, donde se desarrolla de forma similar a la energía termoeléctrica de turbinas (muy empleada en Venezuela) para generar electricidad.

Las áreas terrestres donde mayormente se estudia el uso de este tipo de recurso energético, corresponden a zonas de alta actividad sísmica y volcánica, como las cercanas a las áreas continentales donde se presenta una subducción en las placas tectónicas. En Venezuela no se presenta esta última condición, pero si existen fuentes de aguas termominerales importantes de origen tectónico que pueden ser aprovechadas. Estas observaciones se iniciaron desde los años de 1800 con los viajes de Alejandro de Humboldt a Venezuela y continuaron en el siglo XIX con trabajos como los de Agustín Codazzi, Manuel Vicente Díaz, Boussingault y Rivero 1823, Karsten 1850, Díaz 1873, Adolfo Ernst 1874, Arístides Rojas 1874, Marcano 1877, W. Siever 1888, O'Daly 1891, Alamo 1893, Comisión del Ministerio de Fomento citados por Otero 1970 y Urbani 1991 (Pardo 2016), y que se extienden hasta hoy en día, a través de la realización de inventarios, evaluaciones y reevaluaciones. En 1981, con el convenio con el Consejo Nacional para Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT), se ejecutó el proyecto: "Inventarios Geotérmico para la Evaluación de los Recursos Geotérmicos en las Regiones Central, Sur y Oriente de Venezuela (años 1975–1985)", quedando el Occidente del país sin inventario, con solo una revisión bibliográfica de publicaciones existentes

(Pardo 2016).

Los objetivos de estas investigaciones estuvieron orientados a determinar la geoquímica de las aguas, geotermometría, patrones de mezclas y proveniencia (Barrientos y col; 2000). Todas estas aguas están estrechamente relacionadas con zonas de fallamiento activo, y se distribuyen formando franjas paralelas a las principales zonas que involucran todos los sectores afectados por las fallas que limitan o cortan las cordilleras (Boconó, San Sebastián y El Pilar), es decir, la Cordillera Andina, Sistema de Serranías del Centro - Costero y Oriental. En Venezuela, el mayor potencial geotérmico está al oriente del país el sistema geotérmico Mundo Nuevo-Las Minas-Aguas Calientes, estado Sucre (Pardo, N., 2016), donde se han obtenidos temperaturas del subsuelo entre 250°C a 350°C y alta presencia de CO<sub>2</sub> (Fig. 1).

En el caso específico de los Andes venezolanos, existen abundantes manantiales de aguas termales y mineralizadas (alcalinas, sulfatadas y salinas) que emergen a diferentes temperaturas del subsuelo, constituyendo así, una fuente natural de riqueza para nuestro país generando desarrollo a nivel turístico y de medicina natural (Guerrero y col; 2022).

El presente trabajo pretende contribuir con la realización del Inventario Geotérmico para en occidente de Venezuela, compilando y actualizando la información obtenida por los diferentes autores (Burguera 1981a, b; 1980; 1982; 1983a, b, Urbani 1991, Pardo 2016, Montañez 2010, Guerrero y col; 2022), detallando las condiciones litológicas y estructurales de cada localidad, las posibles fuentes y su relación con el fallamiento activo, considerado como un sistema geotérmico tectónico para la región.

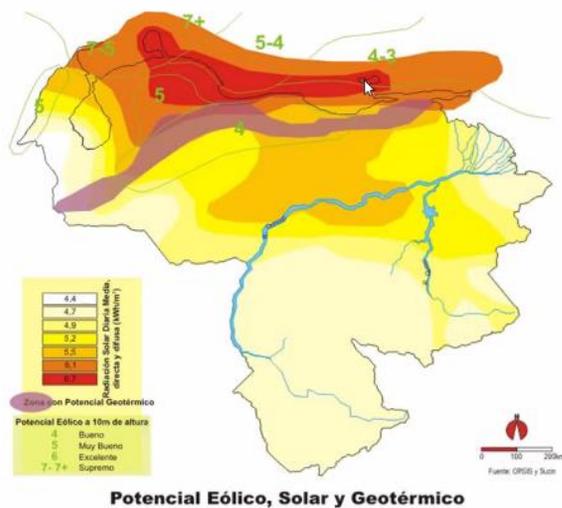


Fig. 1. Fuentes de Potencial geotérmico de Venezuela. Departamento de Geología, UCV. Caracas-Venezuela, 1983.

## 2 Marco Teórico

Todas las aguas termominerales, al igual que las subterráneas, provienen del agua de lluvia o del deshielo que se infiltra a través del suelo, es decir, pertenecen al ciclo hidrológico. Pero no toda el agua que cae sobre la superficie terrestre sigue el mismo camino. Factores como la cantidad de precipitación, porosidad o fracturamiento, pendiente del terreno y tipos de roca, condicionan su paso para alcanzar profundidades de varios cientos o hasta miles de metros (Mook 2002). Una vez alcanzada la profundidad en el suelo, son almacenadas por formaciones geotermiales, es decir, unidades que por sus características hidrogeológicas pueden contener agua y otros fluidos en condiciones de temperatura y movilidad suficiente y que además pueda permitir algún aprovechamiento geotérmico (Sánchez-Navarro y col; 2000).

Sin embargo, el comportamiento de su temperatura es controlado por la temperatura del suelo, aumentado con la profundidad. Las aguas de las napas freáticas, por lo general, pueden hallarse a unos 10 a 30 m de profundidad, y su temperatura es muy similar al promedio anual de temperatura en cada zona. En cambio, para buscar aguas más cálidas hay que hacer perforaciones de más de 100 m. También, a mayor profundidad, las aguas tienen mayor contenido de elementos minerales que fueron tomando de las rocas. De acuerdo con esta profundidad, existe un parámetro denominado gradiente geotérmico, que estima la temperatura con la profundidad siendo este en promedio de  $1^{\circ}\text{C}/\text{km}$ .

Por lo tanto, las aguas subterráneas se consideran termal cuando cumple con el requisito de encontrarse a una temperatura entre  $4$  a  $5^{\circ}\text{C}$  por encima de la media anual del aire del sitio en que se encuentra, o de la de las aguas que discurren en superficie (Burguera 1981a, b; 1980; 1982; 1983a, b). A

partir de ello, las aguas se pueden clasificar de manera general en: aguas termales frías (menos de  $20^{\circ}\text{C}$ ), aguas hipotermiales ( $21-35^{\circ}\text{C}$ ), aguas mesotermiales ( $36-45^{\circ}\text{C}$ ), aguas hipertermales ( $46-100^{\circ}\text{C}$ ) y aguas supertermales ( $101^{\circ}\text{C}$  en adelante) (IGME 1985).

Además de la temperatura, otras propiedades geoquímicas determinan la condición de las aguas termomineralizadas (condicionada por las propiedades de los suelos y rocas) es decir: aguas cloruradas (cloro, sodio, calcio o magnesio), aguas sulfatadas o sulfuradas (sulfatos de calcio, sódicos, magnésicos, azufre) y aguas bicarbonatadas (bicarbonato). Por lo tanto, se pueden encontrar aguas de diferente composición química (desde soluciones muy diluidas hasta salmueras), con conductividades eléctricas muy superiores al agua del mar.

La surgencia de las aguas a la superficie que da origen a los manantiales, se puede producir cuando se encuentran en zonas sísmicamente activas: a) producto de actividad volcánica, denominadas aguas magmáticas, contentivas especialmente de nitrógeno, boro, arsénico, bromo, fósforo o cobre y alcanzando temperaturas mayores a  $50^{\circ}\text{C}$  o b) en fallas geológicas activas, aguas telúricas, que contienen esencialmente; sales, bicarbonato y cloruros con temperaturas menores a  $50^{\circ}\text{C}$  (Burguera 1981a,b; 1980; 1982; 1983a,b).

Esta composición química, junto con la determinación de isótopos estables del agua, deuterio ( $^2\text{H}$ ) y oxígeno-18 ( $^{18}\text{O}$ ) proporcionan una valiosa información, sobre su origen (forma de recarga), la altitud de recarga y sobre las relaciones entre distintos tipos o familias de aguas.

Para interpretar los resultados es necesario tener parámetros de referencia, uno de ellos es la línea meteórica mundial (Mook 2002), la línea meteórica local venezolana (Fig. 2) y la línea meteórica del cauce que se desarrolla en el espacio orográfico del área de estudio.

La comprensión de estas características es esencial para la exploración y desarrollo de los recursos geotérmicos y el impacto ambiental de su utilización (Benítez 2015).

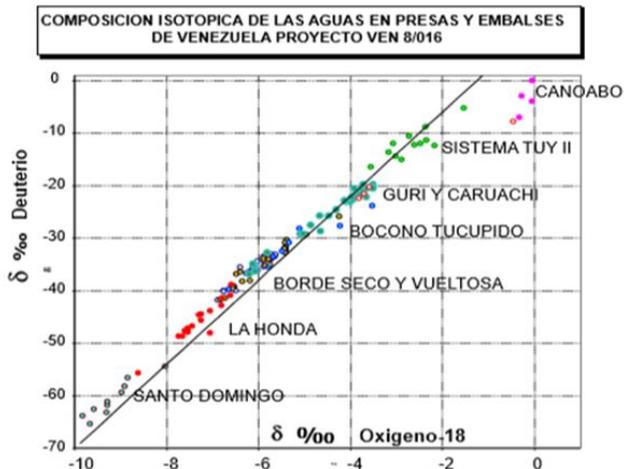


Fig. 2. Línea meteórica local venezolana. Fuente: CIDIAT 2016.

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 éstas, modificando la concentración de sus componentes y su temperatura. Así, en el punto de emergencia las aguas subterráneas pueden originar manantiales de diferentes temperaturas, dependiendo del origen geológico y del efecto geotérmico (Benítez 2015).

### 3 Materiales y métodos

#### 3.1. Recopilación de datos

Para llevar a cabo este trabajo, se comenzó con una recopilación y análisis de información bibliográfica, que permitiera inventariar y ubicar las diferentes fuentes emergentes termomineralizadas en la región. Los primeros reportes de estas aguas en el estado Mérida, fueron realizados por Sievers 1888 (Guerrero y col; 2022), quien reconoció manantiales en las cercanías del pueblo de Mucuchachí (quebrada Sucia), a orillas del camino hacia Mucutuy, que emergían de afloramientos de pizarras con temperaturas hasta 26°C (sur del estado Mérida). Además, menciona otras fuentes en el sector Caño de Arena, en río Perdido, al norte del Páramo de El Tambor y Cerro Torondoy, en las localidades denominadas Cogollal y Santa Apolonia (norte del estado Mérida).

Adolfo Ernst en 1891, en un artículo publicado en el Boletín 54 del Ministerio de Obras Públicas (MOP 1979), denominado “Las aguas termales de la Cordillera Occidental”, donde señala la existencia de surgencias de aguas en las localidades de Bailadores, Ejido, La Chorrera, Mucuchachí y Canaguá (Guerrero y col; 2022). Hace mención que las fuentes de aguas termales en las cercanías de Bailadores, están a corta distancia de la confluencia de la quebrada de las Tapias con el río Mocotíes donde registran temperaturas entre 26°C y 27°C. Igualmente al norte del Tovar y en las cercanías de la población de Zea, donde se encuentran varias fuentes ter-

males con abundante agua (Guerrero y col; 2022) en las fallas septentrionales de la Serranía de Tovar (suroeste del estado Mérida), específicamente en el valle del río Guaruríes y cuyas temperaturas registran valores entre 21°C a 56°C y señalando además la temperatura del del aire de 27°C y del agua del río 22°C.

Seelkopf y Moreno (1955), reportan aguas termales en las localidades de Macachíes, Tabay, La Culata (Musuy), Ejido, Jají, Chiguará y Bailadores. También hace mención que el manantial “La Chorrera”, localizado en el cauce de la quebrada Las González (centro del estado Mérida, carretera Ejido-Jají), se ubica a 1400 msnm y emerge a través de rocas areniscas, con temperatura de 49°C y composición hidrosulfúrica (Guerrero y col; 2022).

Según Burguera (1983a, b), se reconocen veinte (20) fuentes de aguas termominerales en el estado Mérida, algunas de estas con extraordinarios poderes curativos. Estas fuentes podrían ser explotadas, para uso termo-medicinal y turístico-recreacional. Siete de estas fuentes fueron localizado en eje Panamericano del estado Mérida. f

El último inventario para el estado Mérida es el realizado por Montañez (2010), sumando 12 nuevos registros para un total de 31 (Fig. 3), a los 19 presentados en trabajos anteriores (MOP, 1979; Seelkopf, 1955; Seelkopf y Moreno, 1968; Martínez, 1970; Burguera 1981a,b; 1980; 1982; 1983a,b), localizados en su mayoría cerca de los ríos: Chama, Capaz, Mucujún, Albarregas, Las González, entre otros; con dirección noroeste, y de acceso a través de las carreteras Transandina (Andes centrales de Mérida) y Panamericana (Sur del Lago de Maracaibo); todos asociados al sistema de falla de Boconó, Corrimiento estructural de Las Virtudes y a otras fallas geológicas activas menores (Urbani 1991; Guerrero y col; 2022).



Fig. 3 Localización de algunas fuentes de las aguas termomineralizadas del estado Mérida y su vinculación con las zonas de fallamiento activo de Los Andes venezolanos.

#### 3.2. Caso estudio

La fuente termomineralizadas se encuentra al oeste del estado Mérida dentro del Municipio Campo Elías en la cuenca Las González - La Sucia (Fig. 4), específicamente en la cuenca media de Las González. Se accede por dos vías: la primera es recorriendo a pie (3h aprox.) desde la carretera trasandina (tramo antiguo) que unía a Mérida con San Juan de Lagunillas por un camino de tierra, parcialmente cubierto por vegetación (Guerrero y col; 2022) y la segunda, con vehículo por la carretera que comunica a la ciudad de Mérida con el poblado de Jají - La Mesa de Los Indios, donde se reconoce en la zonas 8 puntos de manantiales a lo largo de 350 m aproximadamente, en ambos lados del canal principal de la quebrada La Sucia (Colmenares y Diaz 2020) (Fig. 5).

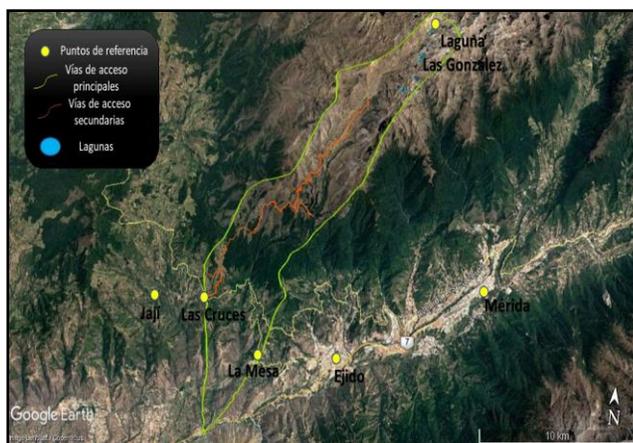


Fig. 4. Ubicación Regional y Delimitación de la Cuenca Las González. Google Earth. Imagen Landsat/Coopernicus, 2022.

La temperatura media anual de la localidad donde se ubica la fuente es de 22.7°C (Montañéz M; 2010) y las precipitaciones anuales son de 1.253mm, con vegetación xerofítica, localizada en una ladera de la vertiente de la Quebrada o arroyo de La Sucia.

La cuenca del río Las González está afectada por un sistema de fallas que atraviesan y modifican las formaciones geológicas y los drenajes (patrón dendrítico a subparalelo). Los rasgos estructurales más importantes son el sistema de fallas de Boconó, que tiene desplazamiento rumbo deslizante dextral según Rod (1956) y Urbani (1991) y el corrimiento de Mesa Bolívar (Fig. 6).

Las formaciones geológicas presentes en la cuenca media del río Las González, corresponde a la Asociación Tostós (Paleozoico – Carbonífero), contiene esquistos sericíticos y cuarcitas, la Formación La Quinta (Jurásico), compuesta de arenisca gruesa y conglomerática, limolita y algunas capas de caliza, además de limolitas y areniscas intercaladas con material tobáceo (Schubert y col; 1982). Y la Formación Aguardiente (Cretácica-Aptiense), constituida por areniscas bien estratificadas y limolitas duras de y colores grises claro a amarillo (Gonzales de Juana y col; 1980) (Fig. 6).

En cuanto a los parámetros físicos y químicos reportados por Burguera (1981a, b; 1980; 1982; 1983a, b), para las aguas termomineralizadas de esta localidad, tienen temperatura de 40°C, de aspecto cristalino, olores sulfurosos y sabor insípido, caudal aproximado de 2537 l/min., pH 7,9, densidad de agua 0,991 g/ml, los residuos obtenidos a 200°C es de 640 mg/l y a 800°C es de 580 mg/l y conductividad de 775 Mohm°/cm.

### 3.3. Metodología

Se recolectaron 11 muestras distribuidas a lo largo del área de estudio (8 correspondían a manantiales y 3 aguas de mezcla. (Fig. 5). A todas las muestras se les realizó análisis isotópico ( $^{18}\text{O}$  y  $^2\text{H}$ ) y ensayos físicos – químicos (Tabla 1).

Tabla 1. Identificador de las muestras. Coordenadas UTM, Datum WGS84, H19N.

Nº	ID	X	Y	Z
1	F-1	246540	947810	1349
2	P-1	246540	947801	1338
3	P-2	246545	947818	1335
4	RG-1	246492	947658	1331
5	RG-3-Me	246514	947659	1331
6	F-2	246384	947574	1329
7	F-3	246384	947574	1329
8	F-4	246384	947574	1329
9	F-5	246544	947944	1368
10	F-6	246535	947955	1368
11	RG-2	246547	947989	1376

Algunos parámetros físicos fueron medidos *in situ* (conductividad, temperatura, caudal) y otros fueron recolectados en botellas de polietileno de 1l para el análisis del pH, dureza y alcalinidad (no se pudieron medir *in situ*) y 2l de capacidad para los análisis de cloruro, sulfato y metales. Otros envases de polietileno con capacidad de 15ml para la toma de muestras de isotopos, todas estas muestras fueron rotuladas (fecha, nombre, ubicación) y refrigeradas para su posterior análisis en el Laboratorio de Aguas y Suelos e Isotopos estables del CIDIAT-ULA. La Evaluación de las concentraciones de metales (Ca, Fe, Mg, Na, K) y la medición de ion Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) se hicieron en el Laboratorio Regional de Servicios Analíticos (LARSA) de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Los Andes (ULA).

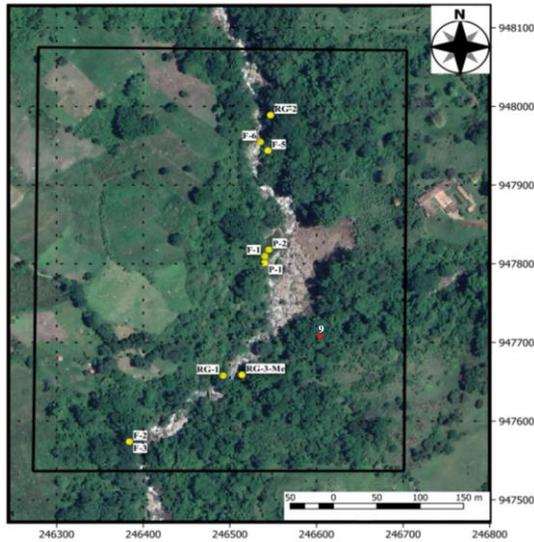


Fig. 5. Localización de las fuentes de aguas termomineralizadas en la quebrada La Sucia – Las González, Municipio Campo Elías, estado Mérida. Imagen Google Earth 2022. Coordenadas UTM, Datum WGS84, H19N

4 Resultados y Discusión

La zona constituida por valles fluviales y colinas redondeadas y abruptas refleja un patrón de drenajes dendrítico/ paralelo controlado por la geología de la zona. Esta se caracteriza estructuralmente por un cierre de bisagra de la cuenca de tracción de Las González (Fig. 6).

En esta zona convergen la traza de Falla de Boconó (F1) con fallas geológicas locales: corrimiento de Mesa Bolívar (F2) y fallas asumidas (F3, F4) que sirven de ajuste.

Las direcciones NE - SW de estas fallas conforman un entramado estructural de alta complejidad geológica, que permiten producir el manantial de las aguas termominerales, además en el sector se puede reconocer pliegues de tipo anticlinal fallados.

A continuación, se muestran en la Tabla 2, los resultados obtenidos del estudio fisicoquímico de las aguas.

Tabla 2. Resultados para cada muestra obtenida en campo de su composición fisicoquímica. Modificado de Colmenares y Díaz (2021).

ID	T (°C)	Q (l/s)	pH	Conduc. (µS/cm)	TDS (mg/l).	Dureza (mg/l Ca-CO <sub>3</sub> )	Alca. (mg/l CaCO <sub>3</sub> ).
F-1	59.6	*	7.35	830	622.5	366.67	100.67
P-1	43	*	*	827	620.25	*	
P-2	38	*	*	842	631.5	*	
RG-1	16.4	*	*	121.6	91.2	*	
RG-3-Me	41.3	*	*	872	654	*	
F-2	45.2	0.24	7.08	537	402.75	420	101.33
F-3	41.5	0.11	*	589	441.75	*	
F-4	27.2	0.45	*	474	355.5		
F-5	63.1	0.11	*	775	581.25	*	
F-6	64.4	0.13	7.5	753	564.75	300	92.67

RG-2	16.3	*	*	123.5	92.625	*
------	------	---	---	-------	--------	---

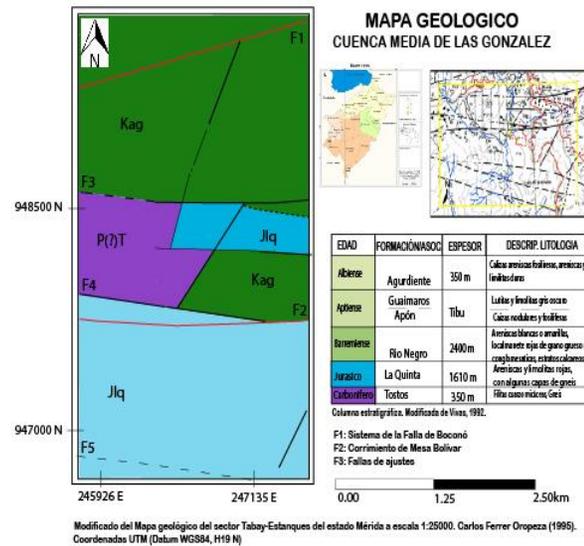


Fig. 6. Mapa geológico de la zona. Coordenadas UTM, DATUM WGS84 y H19. Modificado de Ferrer, C., 1995. Escala 1.25.000.

Los caudales medidos están alrededor de 0,45 a 0, 11 l/s, la temperatura de las fuentes la clasifican como aguas meso-termales e hipotermales (45,2 °C - 64,4 °C). Estas variaciones pueden ser producidas por la combinación de aguas de pluviales infiltradas y, mezcla con aguas más frías procedentes de áreas superiores del acuífero y/o a interacciones con el terreno circundante.

Los resultados de pH de los puntos representativos de las aguas termominerales indicaron que son aguas neutro-alcalina (7,08-7,5) es decir, no contienen sulfuros tóxicos para el ser humano, lo que las hace aptas para uso recreacional. Poseen alta mineralización con conductividades eléctricas (CE), fluctuante entre 474 y 830 µS/cm y total de solidos disueltos (TDS) entre 355,5 y 622,5 mg/l, alta capacidad de neutralizar los ácidos por los altos valores de alcalinidad (92,67-101,33 mg/l). En cuanto al color y sabor, el rango es igual para todas, siendo incoloras e insípida y, su olor si fue variado dependiendo del lugar, pero en general presentaron olores fuertes derivados de oxidación: sulfatos.

Los resultados de los análisis iónicos de las muestras se pueden observar en la Tabla 3. Según estos resultados las aguas termominerales son clasificadas como sulfatadas sódicas (Fig. 7), demostrando que son aguas con un gran tiempo de residencia que provienen de profundidades medias a grandes.

Tabla 3. Análisis iónicos de la muestra. Modificado de Colmenares y Díaz (2021).

ID	Cationes (mg/L)				Aniones (mg/L)		
	Ca <sup>2+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na+	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl-
F-1	23.35	10.24	1.99	139.07	329.12	100.66	20.13
F-2	49.64	7.79	2.62	57.69	279.75	101.32	15.22
F-6	21.90	7.57	1.14	119.58	436.25	92.66	15.94

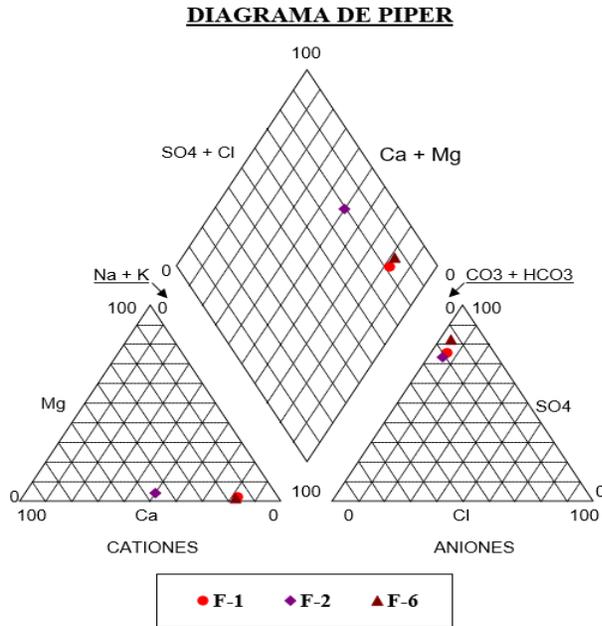


Fig. 7. Diagrama de Piper

Los resultados del análisis de isotopos estables Deuterio (<sup>2</sup>H) y Oxígeno 18 del muestreo de agua, se pueden observar en la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de Deuterio(<sup>2</sup>H) y Oxígeno 18 (O<sup>18</sup>) para cada muestra.

Ed	d <sup>2</sup> H‰ VR (por mil)	d <sup>2</sup> H‰ DE	d <sup>18</sup> O‰ VR (por mil)	d <sup>18</sup> O‰ DE
F-1	-74,9	-73,29	-11,77	-11,695
P-1	-70,72	-70,4425	-11,45	-11,25
P-2	-76,63	-74,395	-12,42	-12,45
RG-1	-53,54	-54,005	-9,15	-9,12
RG-3-Me	-63,25	-62,755	-9,96	-9,89
F-2	-55,61	-55,6225	-9,1	-9,03
F-3	-57,57	-57,2325	-9,33	-9,29
F-4	-44,69	-45,48	-8,15	-8,13
F-5	-75,82	-75,465	-11,78	-11,68
F-6	-77,89	-77,1	-12,08	-11,98
RG-2	-62,5	-62,335	-9,09	-9,12

Las muestras rey colectadas arrojaron un rango de deuterio entre -44,69 (F-4) a -77, 89 ‰ (F-6) y de oxígeno 18, entre -8,15 (F-4) a 12,42 ‰ (P-2), ubicándolas en un mismo cuadrante y formado una línea meteórica local subparalela a la línea meteórica nacional, como se ve en la Fig. 8, estos rangos señalan como punto de referencia base al embalse de Santo Domingo (1600 msnm aproximadamente).

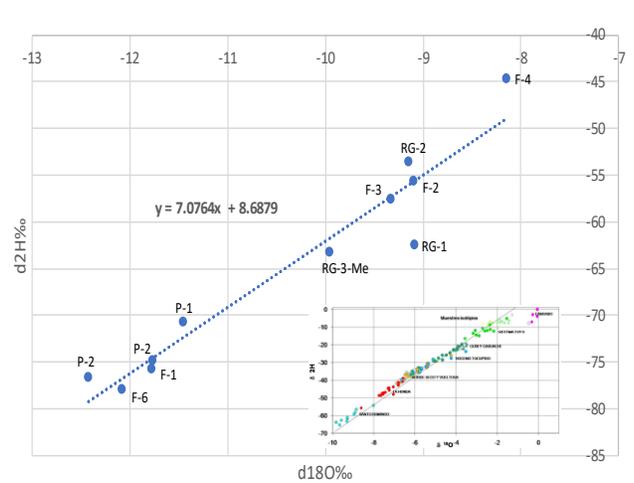


Fig. 8 Línea meteórica local y la línea meteórica nacional con los principales embalses de Venezuela y relación isotópica entre <sup>2</sup>H y <sup>18</sup>O de la zona.

Demostrando así la existencia de aguas termales y su posible mezcla con aguas meteóricas que se infiltran entre 1.500-1.700 msnm, teniendo un recorrido aproximado de 2Km, desde la zona de infiltración en rocas porosas y permeables (Fm. Aguardiente), hasta su afloramiento cotas más abajo (Fm. La Quinta y la Asociación Tostós). Las aguas de los puntos F-1, F-5 y F-6 poseen la misma fuente de recarga. El agua del P-1 está alimentada parcialmente por agua superficial y la del P-2 es únicamente subterránea. En las aguas de los puntos F-2 y F-3, la composición isotópica es similar, mientras que en el punto F-4 es diferente por la mezcla con agua superficial.

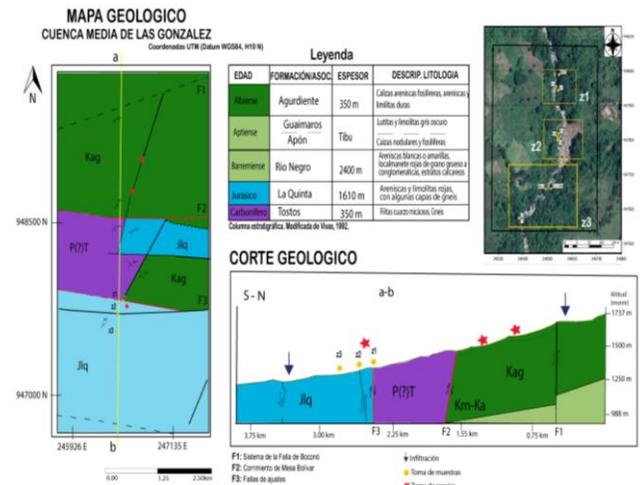


Fig. 9. Ubicación de la sección geológica para la zona. En el corte a-b con dirección sur-norte (Fig. 9), se corrobora que la infiltración está asociada con la traza norte de la falla de Boconó (F1). El recorrido lateral del agua se hace a través de las rocas porosas, permeables y bien estratificadas (Formaciones Aguardiente, Apón y Rio Negro). Este resultado confirma que, las aguas hacen un recorrido por un gran tiempo de residencia y alcanzan grandes profundidades, tal

como lo señala su composición química y verificando que la temperatura coincide con el gradiente geotérmico relacionado a esa profundidad (2K). Su mecanismo de salida se realiza a través de la falla de ajuste (F3), que pone en contacto la Formación La Quinta con la Asociación Tostós, que sugieren verticalidad para que el agua descargue rápidamente y conserve la temperatura (entre 40 a 65°C).

La disminución de la temperatura hacia el sur puede deberse a la mezcla de las aguas en su ascenso producto de la percolación con otras fallas o a la poca rapidez en el ascenso de éstas.

## 5 Conclusiones

La importancia de las fuentes de energía limpias es cada día mayor, los países se abocan a determinar su potencial energético en estas fuentes con el objeto de trazar una ruta para intensificar su utilización con miras a enfrentar el cambio climático. Con la crisis energética actual, por la guerra Rusia – Ucrania, se ha visto la necesidad de desarrollar planes para acelerar el uso de este tipo de energías a nivel mundial. Venezuela debe incrementar sus estudios abandonados desde el 2009 para tal fin.

El establecimiento de Plantas eléctricas en nuestro estado requiere de localización de yacimientos de alta a media entalpia, es decir, producción de temperatura mayor a los 100°C. Estos yacimientos se establecen combinando dos disciplinas que aporten sus conocimientos como lo son los estudios petroleros (profundidades mayores a los 2K) y los estudios de agua subterránea (origen, tránsito, estancia, química, etc.), con este primer trabajo como piloto, se logra abarcar y aportar conocimientos a la segunda rama, quedando aún más por investigar.

El caso de estudio confirmo la existencia aguas termominerales no investigado hasta el momento, con temperaturas que no superan los 64.4°C. Su origen es meteórico, y se infiltran a cotas entre los 1500 - 1700 msnm, coincidiendo con la Chorrera de Jají, la cual es un salto de falla (Falla de Boco-nó) del complejo estructural de la zona. El recorrido lateral tiene un tiempo de residencia importante donde los minerales de la Asociación Tostós se disuelven y aportan su mayor composición química. Así mismo, la gran profundidad a la que se realiza el recorrido (2K), aporta el aumento de temperatura aportado por el gradiente geotérmico del suelo.

## Referencias

Alvarado, M; (2008). Caracterización neotectónica de Cuenca Las González, Mérida – Venezuela. Tesis de maestría. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela.  
Audemard, F.E., y F.A., Audemard (2002). Structure of the

Merida Andes, Venezuela: relations with the South America–Caribbean geodynamic interaction. *Tectonophysics* 345: pp. 299– 327.

- Audemard, F (1991). *Tectonics of western Venezuela*. Thesis PhD. Rice University. Ouston, Texas. USA.
- Barrientos, Y (2000). Estudio hidroquímico de los manantiales: Cumbotico y Cumbote, y Colonia Tovar, estado Aragua, Venezuela. *ECOTROPICOS* 13(2), pp 81-89.
- Benítez, J. L., Mostue, M. B., & López, M. (2015). Estudio Físicoquímico e Isotópico de Aguas Termales del Municipio Libertador del Estado Sucre, Venezuela. *SABER*, 27(1), pp. 94-101.
- Burguera, J. L., Burguera, M., Andressen, R., y Sampol de Reyes, M. S. (1983a). “Aguas Termales en el Estado Mérida. Mérida”. Universidad de Los Andes, Facultad de Ciencias Forestales.
- Burguera, M., Millán, F., García, R., Odreman, O. y Sampol, M. (1980). “Estudio de Las Fuentes Termales del Estado Mérida. Mérida”. Facultad de Ciencias, Departamento de Química.
- Burguera, J; Burguera, M y Sampol de Reyes, M. (1981a). Descripción geológica y relación mineralógica de las fuentes de aguas termales del estado Mérida. *Geotermia* 3: pp. 26-41.
- Burguera, J; Burguera, M; Millán, F; García, R; Odreman, O., y Sampol de Reyes, M; (1981b). Estudio de las aguas termales del estado Mérida. *Geotermia* 4: 41-46.
- Burguera, J., Burguera, M., Silva, J., Usubillaga, A., Diaz, C. y Bellester, L. (1982). Fuentes de aguas termales del estado Mérida: Farmacia y ecología y análisis bacteriológico. *Geotermia* 6: pp. 42-56.
- Burguera, R. (1983b). Aguas termales del Estado Mérida. Universidad de los Andes. Facultad de Ciencias Forestales. Mérida – Venezuela. 71 p.
- Colmenares, M.L. y Días, A. (2021). “Estudio hidrogeoquímico de las aguas termominerales presentes en la cuenca media del río Las González del estado Mérida, Venezuela”. Mérida: Universidad de Los Andes.
- Carrillo E., Benítez, R., Silva, C. (1995). Inventario Geotérmico de Trujillo Septentrional y distrito Moran del estado Lara, Published in Abstract Book. AsoVAC. Caracas – Venezuela.
- CIDIAT-Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras. (2016). Estudio isotópico de las aguas en presas y embalses en Venezuela, Proyecto ven8/016. Mérida, Venezuela.
- Ernst, A. (1874). Informe sobre las cualidades físicas y composición química de las aguas calientes de Guarume. *Gaceta Oficial (Caracas)*, 3 (193): pp-397-398.
- Guerrero, O., Contreras, W., Guerrero, G. y Monzón, G (2022). Aguas termominerales del estado Mérida - Venezuela: aspectos geoquímicos y proyección geoturística. Mérida: Universidad de Los Andes.
- González de Juana, C., J. M. Iturralde de Arozena y C. X. Picard. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Edic. Foninvez, 2 T., 1031 p.

- Hervia A. y Di Gianni, N. (1983). Inventario de las manifestaciones geotérmicas del estado Sucre. Tesis de grado UCV, 957 p. (Publicado en: Geotermia (UCV, Caracas), y colección Libros, publicación especial 4, 957., 1984.
- IGME - Instituto Geológico y Minero de España (1985). Análisis metodológicos de las técnicas geoquímicas empleadas en prospección geotérmica. Ministerio de Industrias y Energía, Secretaría de la Energía y Recursos Minerales. Julio 1985.
- Jé gat, H. (2014). Aguas subterráneas, definición, origen, importancia. Mérida: Universidad de Los Andes. Venezuela
- López Sanabria, M. C. (2012). Hidrogeoquímica de Las Aguas de Cariaco, Estado Sucre, Venezuela. Cumaná: Universidad de Oriente.
- Martínez, F. (1970). Aguas termales de Venezuela. Publicaciones del Rectorado. Universidad de Los Andes. Mérida – Venezuela, 183 p.
- MOP - Ministerios de Obras Públicas (1979). Ministerio de Obras Públicas, República de Venezuela, boletín N° 54, Caracas, Venezuela.
- Montañéz D. L. (2010). “Aguas Termales del Estado Mérida: Aproximación Geográfica, Turística y Conservacionista”. Mérida: Universidad de Los Andes. Venezuela.
- Mook, W. G. (2002). Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico. Ciclo Global del Agua. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- Pardo, N. (2016). La Energía Geotérmica en Venezuela. Publicado en *Commodities venezolanos*, año 6, 18ª Edición, pp 57-59.
- Rod, E. (1956). “Strike slip fault of Northern Venezuela”. *American Association of Petroleum*, pp. 457-476.
- Sánchez-Navarro, J., Carnicer, C., Coloma, P., Velarte, M., Breta, S. y Morea, J. (2001). Atlas de la Energía Geotérmica en Aragón, Editorial: Gobierno de Aragón, Departamento de Industria, Comercio y Turismo. Editor: Gobierno de Aragón. ISBN: 84-7753-894-8
- Seelkopf, C. (1955). Aguas mineromedicinales en el estado Mérida. *Universita Emeritensis*, 2, pp. 67-93.
- Seelkopf, C. y Moreno R. (1955). Aguas termominerales del estado Mérida. *Universitas Emeritenses* N° 2. pp.76-92
- Schubert, C. (1982). Cuenca de tracción en los Andes meridionales y en las montañas del Caribe, Venezuela. *Acta científica venezolana* 33, pp. 389-395.
- Urbani, F. (1991). Geotermia en Venezuela. *Revista Geos* N° 31, diciembre 1991, pp. 1- 347.
- Vivas, L. (1992). “Los Andes Venezolanos”. Caracas: Academia Nacional de la historia.

**Recibido:** 13 de enero de 2023

**Aceptado:** 12 de abril de 2023

**Toro-Mora, Rosibeth:** Especialista en Gestión de Abastecimiento, recolección y tratamiento de agua (CIDIAT-ULA) y doctorado en Ciencias Geológicas (Zaragoza-España). Profesora en el área de geología de campo y colaboradora en Hidrogeología y Geofísica en la Escuela de Ingeniería geológica de la ULA-Mérida.

 <https://orcid.org/0000-0002-1252-3584>

**Hervé, Jegat:** Profesor Titular CIDIAT- ULA. PhD. Mecánica de Fluidos. Ingeniero Hidráulico. Profesor Titular Centro Interamericano de Desarrollo Ambiental y Territorial. ULA.

Correo electrónico: [hjegt@gmail.com](mailto:hjegat@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0003-0185-2873>

**Guerrero, Omar:** Profesor Titular Escuela de Ingeniería Geológica. ULA. Postgrados y estudios doctorales en ciencias geológicas. Correo electrónico: [omarguerrero1231@gmail.com](mailto:omarguerrero1231@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0002-8859-2906>

**Uzcátegui-Salazar, Marisela:** Especialista en Recursos Hídricos, H2PLT, Cataluña-España. Prof. Titular Escuela de Ingeniería Geológica. ULA. PhD. en Hidrología y Gestión de los Recursos Hídricos. MSc. en Desarrollo de los Recursos de Aguas y Tierras. Ingeniero Civil. Hidrogeólogo. Correo electrónico: [mariselauzcatégui@gmail.com](mailto:mariselauzcatégui@gmail.com)

 <https://orcid.org/0000-0002-2894-5925>

**Rosales, Rafael:** Profesor Instructor Escuela de Ingeniería Geológica. Ingeniero Geólogo. Profesor en el área de Petrología y Petrografía ígneo-metamórfico, Yacimientos Minerales y colaborador en Análisis de Cuencas y Geología de Campo en la Escuela de Ingeniería Geológica de la ULA-Mérida. Correo electrónico: [rafaeljrosales@ula.ve](mailto:rafaeljrosales@ula.ve)

 <https://orcid.org/0009-0007-5988-9421>

