

# Determinación del origen y potencial geotérmico de las manifestaciones hidrotermales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena)

Determination of the origin and geothermal potential of the hydrothermal manifestations located in the municipalities of Becerril (Cesar) and Ciénaga (Magdalena)

Rafael Bernal Vergara<sup>1</sup>  
Johander Méndez Montero<sup>2</sup>  
Luis Alberto Quintero López<sup>3</sup>

DOI: <https://doi.org/10.18041/1909-2458/ingeniare.30.7923>

## RESUMEN

Se caracterizaron 2 sistemas hidrotermales, ubicados respectivamente en Ciénaga (Magdalena) y Becerril (Cesar), detallando componentes geológicos como fallas locales y zona de mezcla de fluido. Por medio de la proporción de carbonatos, sulfatos y cloruros, se establecieron dos condiciones distintas de aporte calórico, en Becerril a 3 metros de profundidad, referente a la base de emanación, las temperaturas oscilan entre 30° y 34°C, siendo enriquecidas por fases carbonatadas (CaCO<sub>3</sub>), condicionando la procedencia del fluido a un calentamiento por enterramiento, calificándolo como un Manantial Hidrotermal de Entalpia Baja (Potencial bajo); los datos en Ciénaga a 4 metros de profundidad referente a la base de emanación poseen temperaturas entre 41°-45°C, con predominancia de SO<sub>4</sub> en la solución, además de material triturado de formaciones circundantes; sugiere condiciones geológicas de zona de falla, calentadas por una fase de vapor en mezcla con aguas superficiales, siendo establecida como una fisura de Entalpia Media (Potencial Medio-Bajo).

**Palabras clave:** Carbonatos, entalpia, geotermia, hidrotermal, zona de falla.

## ABSTRACT

Two hydrothermal systems were characterized, located respectively in Ciénaga (Magdalena) and Becerril (Cesar), detailing geological components such as local faults and fluid mixing zone. Through the proportion of carbonates, sulfates and chlorides, two different conditions of caloric intake were established, in Becerril at a depth of 3 meters referred to the base of emanation, the temperatures oscillate between (30-34) ° C, being enriched by phases of carbonate (CaCO<sub>3</sub>) conditioning the origin of the fluid to heating by burial, qualifying it as a Low Enthalpy Hydrothermal Spring (Low Potential), the data in Ciénaga at 4 meters deep referred to the emanation base, have temperatures between (41-45) ° C, with a predominance of (SO<sub>4</sub>) in the solution, in addition to crushed material from the surrounding formations, suggests geological conditions of the fault zone, heated by a vapor phase mixed with surface waters, establishing itself as a Middle Enthalpy fissure (Medium -Low potential).

**Keywords:** Carbonates, enthalpy, geothermal, hydrothermal, fault zone.



**Cómo citar este artículo:** C. V. Dimas, C. A. Reyes y L.N. Ramírez. "Aplicación de un Modelo de Planificación Colaborativa, Previsión y Reposición (CPFR) en un laboratorio farmacéutico del sector salud", *Ingeniare*, vol. 17, no. 30, pp. 11-28, junio 2021.

1. Ingeniero Geólogo de la Fundación Universitaria del Área Andina. Contacto: [rbernal8@estudiantes.areandina.edu.co](mailto:rbernal8@estudiantes.areandina.edu.co)

2. Ingeniero Geólogo de la Fundación Universitaria del Área Andina. Contacto: [jmendez23@estudiantes.areandina.edu.co](mailto:jmendez23@estudiantes.areandina.edu.co)

3. Ms. Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente. Profesor-Investigador. Fundación Universitaria del Área Andina. Contacto: [lquintero34@areandina.edu.co](mailto:lquintero34@areandina.edu.co)

## INTRODUCCIÓN

La energía geotérmica es una de las formas más antiguas y versátiles en lo que a energías renovables se refiere [1]. Esta energía es definida como el calor emanante del centro de la Tierra, clasificándose en función del rango de entalpía que presente el fluido hidrotermal, a su vez es condicionado por las fracciones de vapor que componen la fase gaseosa [3], [4]. El calor se genera de forma natural por descomposición radiogénica de elementos en la corteza superior, así como el principal emanante generado por la formación del planeta [5]. Si bien hay un flujo natural de calor desde la profundidad a la superficie en cualquier lugar de la Tierra, los procesos geológicos pueden conducir a recursos geotérmicos anómalos de alta temperatura que están a profundidades menores [6].

Actualmente los Estados Unidos de América se posiciona como el más grande productor del mundo en el campo de electricidad geotérmica, generando un promedio de 15 mil millones de kilovatios hora de energía por año, comparable a la quema de cerca de 25 millones de barriles de petróleo, o 6 millones en toneladas de carbón por año [7]. En Colombia, por el contrario, sucede un caso especial, ya que cuenta con una posición geográfica privilegiada y una geología favorable debido al Cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde el gradiente de temperatura natural del subsuelo, cerca de la superficie, es anómalamente alto y se manifiesta con la actividad volcánica actual; el país sule sus necesidades de energía eléctrica, principalmente, con generación hidroeléctrica y termoeléctrica [1], [7], [10], sin embargo no todo es energías renovables, ya que en el sector económico-energético el carbón, solo entre diciembre de 2010 y enero de 2020, su consumo disminuyó en un 18% [11], [12].

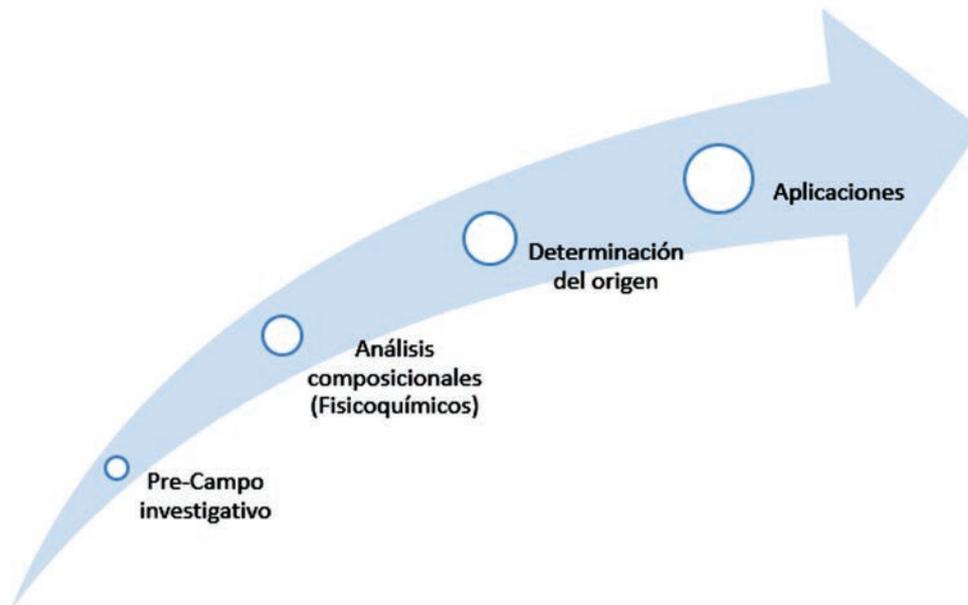
A pesar de esta recaída el carbón ha significado para la humanidad efectos severamente negativos en el ambiente, como la liberación de sustancias contaminantes por su toxicidad [13], por ende, se hace necesario poner en práctica políticas enfocadas al desarrollo de las fuentes no convencionales de energía, y aprovechar el alto potencial de otros recursos energéticos, diferentes a la hidroelectricidad [9].

Los sistemas geotérmicos principales del país se encuentran en la Zona Andina y en el suroccidente del territorio [14], [15], y van desde niveles bajos-alto de entalpía [16] [18], teniendo grandes manifestaciones superficiales tanto en Dabeiba (Risaralda) como en los termales de Santa Rosa de Cabal [19].

A pesar de que Colombia se encuentre en una zona geotérmicamente privilegiada, este artículo se encuentra orientado al departamento del Cesar y Magdalena, que cuentan con una capacidad geotérmica mínima en superficie, pero este tipo de recurso plantea un objetivo principal distinto, que son los reservorios a profundidades someras a una temperatura entre 40° y 50°C [20]; estos son los llamados reservorios de baja entalpía, que se utilizan principalmente para piscicultura, calefacción e invernaderos [21], a partir de lo cual se busca contribuir al conocimiento geológico-energético del país, determinando el origen y potencial geotérmico en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena).

## 1. METODOLOGÍA

Se desarrolló bajo un tipo de investigación cuantitativa experimental, debido a la inexistencia de una metodología unificada para el estudio y evaluación de manifestaciones hidrotermales a profundidades someras. Se ha propuesto un diseño metodológico basado en cuatro fases principales, descritas en la Figura 1.



**Figura 1. Desarrollo investigativo**

Fuente: Elaboración de los autores.

### 1.1 Fase 1

Primeramente se llevó a cabo un pre-campo investigativo con el fin de conocer y enmarcar las características geológicas superficiales del terreno, que nos brindarán indicios de manifestaciones hidrotermales en las dos ubicaciones estudiadas, para así poder delimitar de una manera precisa el área de estudio, lo que llevó a direccionar la fase de campo a la correlación y corroboración de los datos obtenidos previamente a través de las memorias evolutivas y planchas geológicas nacionales, y adicionalmente se analizó la base de datos de registros hidrotermales proporcionadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) [22] (Figura 2):

<i>Becerril:</i>	Zona 18P	(1564194 E, 1085777 N)
<i>Ciénaga:</i>	Zona 18P	(1711081 E, 984231 N)

### 1.2 Fase 2

La segunda fase de la investigación fue orientada a exploración de campo y muestreo (Figura 2), tomando dos productos de las zonas a analizar; primeramente 500 g de sedimentos emanantes si-

guiendo los parámetros de la norma NTC-ISO 5667-2 [23], y 1 lt. de fluido a la distancia más cercana posible de la zona de emanaciones superficiales.

Para las muestras de agua superficial se tuvo en cuenta la normativa propuesta en el Manual de análisis de aguas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales (1995) [24], y en el análisis de la composición físico-química se buscó establecer las concentraciones de sulfuros, cloruros y de carbonatos disueltos en el fluido, ya que estos parámetros brindarían indicios del origen de la emanación. Adicionalmente se tomaron datos como el pH, conductividad y temperatura en superficie a través de un multímetro de mano (Pinza Amperimétrica Uni-t Ut200a- Auto rango 200<sup>a</sup>); para analizar la composición de los sedimentos se utilizó un estereoscopio petrográfico (NexiusZoom EVO), y su procedencia en relación con las formaciones aledañas evaluando su grado de transporte por medio de la Tabla comparativa para la caracterización del grado de redondez y esfericidad [25].



**Figura 2. (2 A-B) Emanación en Becerril; (2 C-D) Afloramiento en Ciénaga**

Fuente: Elaboración propia.

### 1.3 Fase 3

El tercer apartado metodológico corresponde al análisis de la proveniencia de los fluidos por medio del Diagrama de Piper, en conjunto con el Diagrama Triangular - Origen de aguas, empleados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) en la descripción de hidrotermales superficiales, para lo cual se usó el software de análisis y representación de datos estadísticos Grapher 12, y además se planteó determinar su fuente de poder calórico por medio de la idealización de un modelo geológico que esquematice su procedencia.

### 1.4 Fase 4

La cuarta fase está orientada a la determinación del rango de aplicaciones en función a las temperaturas alcanzadas en profundidades someras, por medio de la utilización de una sonda de tipo termocupla de punzón con buldo  $\frac{1}{4}$  tipo K, modelo industrial, de 4 metros de extensión acoplada a un termómetro sencillo DTM 317 TECPEL; se registraron los valores de temperatura y su transición en el tramo evaluado (aproximadamente de 4 m subsuelo y 1 m cuerpo de agua).

## 2. DESARROLLO INVESTIGATIVO

En el primer hito del desarrollo investigativo se planteó la determinación del marco geológico, asociado a la fuente hidrotermal en las dos ubicaciones estudiadas, evidenciadas en la Figura 3:

<i>Becerril:</i>	Zona 18P	(1564194 E, 1085777 N)
<i>Ciénaga:</i>	Zona 18P	(1711081 E, 984231 N)

Se afirma investigativamente que las aguas o fluidos geotérmicos asociados a terrenos volcánicos e ígneos pueden resultar de la circulación profunda de aguas meteóricas o de intrusión de recientes rocas, que generan un proceso de convección de soluciones acuosas [26], gracias a lo cual se parte de revisar la fuente de información pertinente en este campo, brindando un contexto geológico a partir de la cronoestratigrafía generada en la zona, ubicando principalmente los afloramientos de “El Azufral” y “El Volcán”, pertenecientes a las planchas 41-42 y 18, respectivamente en su proporción de 1:100.000 del SGC (Servicio Geológico Colombiano) correspondientes a los municipios de Becerril-Cesar y Ciénaga-Magdalena, como se aprecia en la Figura 3 [27].

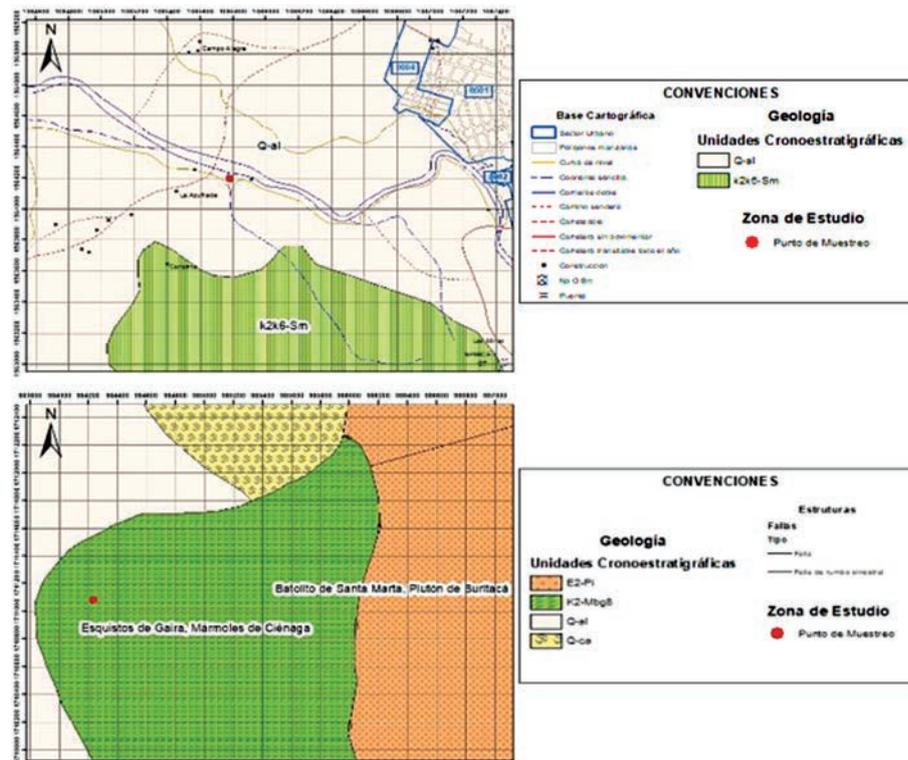


Figura 3. Mapa geológico “El Azufral” (parte superior). Mapa Geológico “El Volcán” (parte inferior)

Fuente: Modificado del SGC - Importado de ArcGIS.

La diferencia litológica es altamente apreciable, ya que El Azufral se encuentra en una zona de falla cubierta regida por el paleo-tectonismo ocurrido en la zona y cubierto por el grupo calcáreo Cogollo (K1K2cg) [28]. Por otro lado, a diferencia de la zona de “El Volcán”, donde se presenta un contexto estructural marcado por un lineamiento muy amplio (Santa Marta-Bucaramanga), el cual es sincrónico con la ubicación del área de trabajo donde se resaltan formaciones ígneo-metamórficas como el batolito de Santa Marta, y metamórficas como los mármoles de Ciénaga [29].

Posterior a la descripción en la fase de campo de la geología aflorante y predominante se procedió a la recolección de los sedimentos para analizar la composición mineralógica y morfológica de la granulometría conjunta expulsada con el fluido hidrotermal, en los cuales, por medio de un microscopio petrográfico de los laboratorios de la Fundación Universitaria del Área Andina (FUAA), permitieron realizar descripciones precisas de la forma y granulometría que estos presentan.



**Figura 4. Zona de muestreo “El Azufral” (Izq) - Zona de muestreo “El Volcán” (Der).**

Fuente: archivo fotográfico de los autores.

Después a la realización de los análisis sedimentarios, se estableció un muestreo para el análisis físico-químico, del cual se tuvo como guía el Manual de análisis de aguas de la Universidad Nacional de Colombia sede Manizales de 1995 [24], estableciendo el tipo de análisis a realizar; se debía propiamente obtener el fluido directamente de la fuente emanante, como se aprecia en la Figura 4, todo esto con el fin de evaluar los parámetros físico-químicos más representativos para este tipo de energía renovable, como son principalmente cloruros, sulfuros y carbonatos.

Luego de conocer la composición química y mineralógica de las emanaciones se tuvo en cuenta el modelo que mejor representaría el transporte del fluido y su interacción en el subsuelo, y también con las formaciones adyacente siempre teniendo presente que la temperatura juega un papel fundamental en el desarrollo generacional y de mediciones en el potencial térmico de estas emanaciones, por consiguiente se utiliza un mayado en el área cercana al punto aflorante para la verificación de la temperatura superficial, en el cual se rectifica el aumento de esta en la medida que se acerca al punto emergente de fluido hidrotermal; se utilizó una termocupla adaptada para realizar las mediciones.

### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A partir de lo estudiado en las memorias explicativas, proporcionadas por las bases de datos pertenecientes al Servicio Geológico Colombiano en las zonas de “El Azufral” y “El Volcán”, pertenecientes a las planchas 41 y 18, respectivamente, se ha logrado apreciar zonas marcadas de fallas y zonas que representan estos trazos, siendo apreciadas tanto la deformación del grupo cogollo (K1K2cg) en “El Azu-

fral”, siendo este perteneciente a capas gruesas de calizas fosilíferas con niveles de lodolitas calcáreas interstratificadas afectadas por paleo-tectonismo, mientras que en la zona de “El volcán” se presentan zonas con rocas metamórficas y graníticas principalmente milonitizadas.

Para mejor apreciación y entendimiento de este documento, se discriminará las zonas por su ubicación y ambientes geológico-mecánicos al que pertenecen.

### 3.1 Ciénaga, Magdalena

La zona se encuentra ubicada en inmediaciones del municipio de Ciénaga, haciendo referencia a las coordenadas  $11^{\circ} 1'32.55''$  N  $74^{\circ}13'18.59''$ ; por su cercanía a la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) presenta un contexto geológico que es un apéndice genético correlacionable con esta, y pertenece a unidades como el Batolito de Santa Marta (Eb) además de formaciones metamórficas como lo son los Esquistos de Gaira (Eeg) y los Mármoles de Ciénaga (Em), las cuales, al ser formaciones tanto de origen magmático como metamórficas, han brindado un ambiente propicio para la generación de esta manifestación hidrotermal (Figuras 5 y 6).

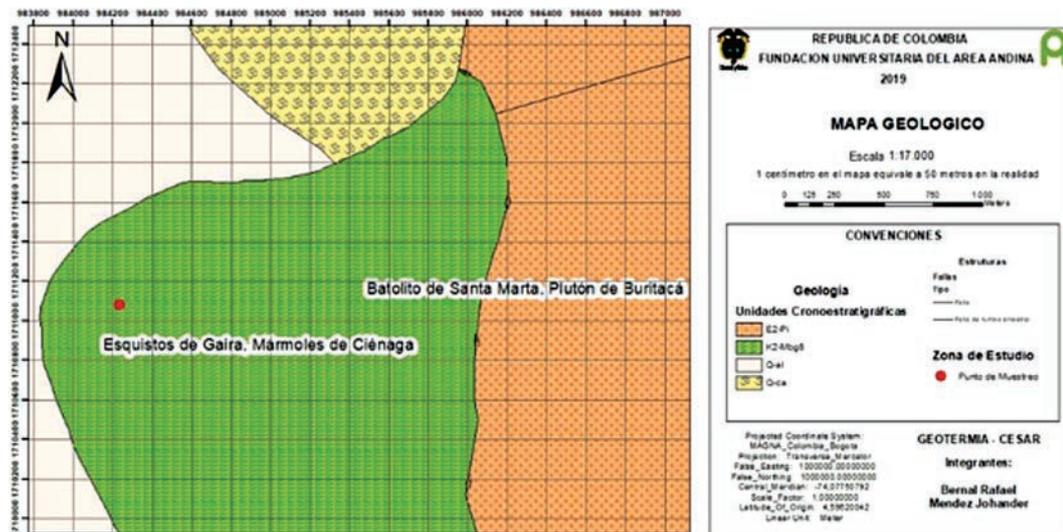


Figura 5. Mapa Geológico. Manifestación Ciénaga

Fuente: Autores. Modificado de SGC (2015).

Se determinó, a partir de los ensayos realizados, el fluido emanante proveniente de las aguas termales, y se encontró que está relacionado con el control estructural del área, principalmente por desarrollarse en una zona de falla, la cual sería una consecuencia del lineamiento presente en el flanco occidental de la SNSM, además los análisis químicos describen una fuente calorífica proveniente de vapor, dada la proporción de las concentraciones cloruros, sulfuros, sulfatos y bicarbonatos (Figura 7 y Tabla 1), que a su vez se ve mezclada con aguas superficiales, como se aprecia en la Figura 6.

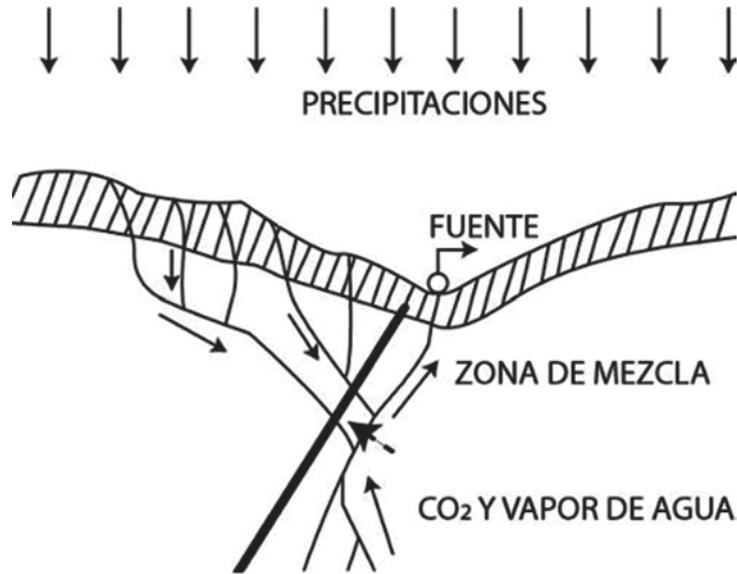


Figura 6. Modelo genético de la manifestación hidrotermal

Fuente: Modificado de Rojas (2014) [30]

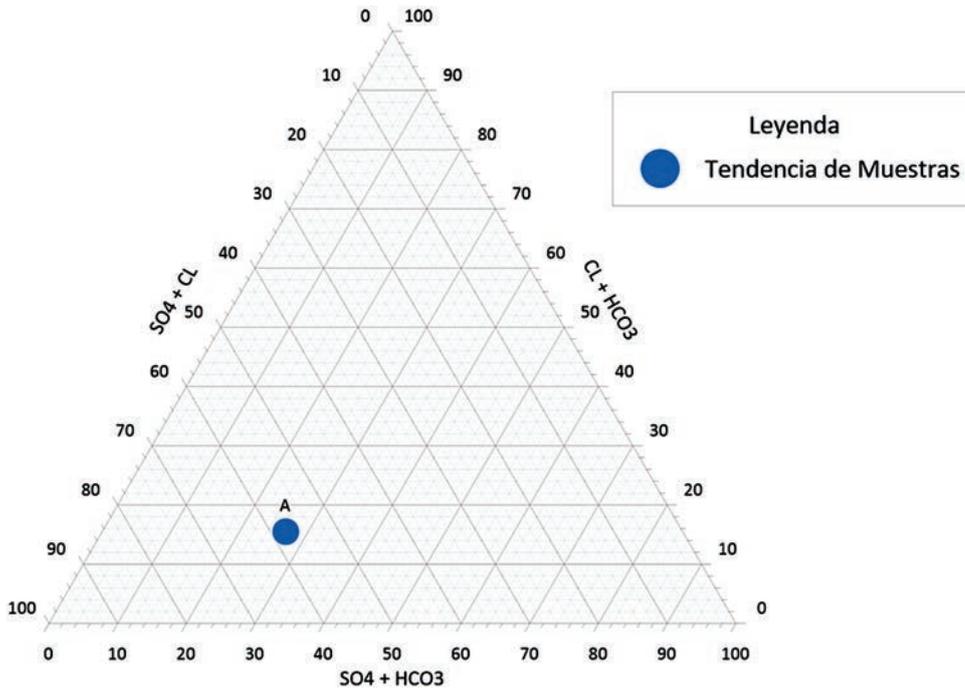


Figura 7. Representación Ternaria. Origen de las aguas

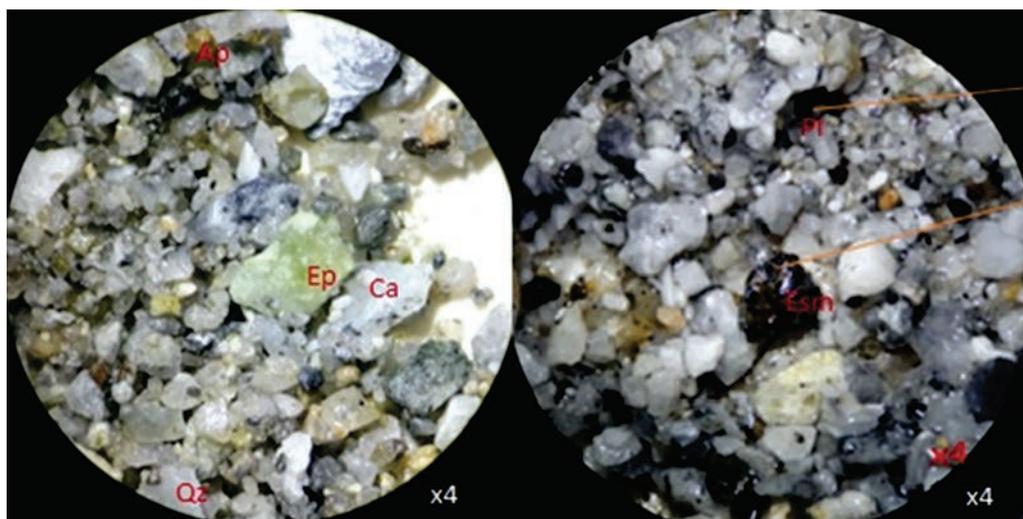
Fuente: Autores. Importado de Grapher 12.

**Tabla 1. Composición fisicoquímica de termales Ciénaga**

Análisis	Método-técnica	Resultado
Alcalinidad total (mg caco3/L)	SM 2320 B - volumétrico	419
Amonio (mg NH4/L)	SM 4500-NH3 B,C -Titulométrico	<0,643
Cloruros (mg CL/L)	SM 4500-CL B -Argentométrico	104
Bicarbonatos (mg caco3/L)	SM 2320 B - Titulométrico	419
Sulfatos (mg SO4/L)	SM 4500-SO4 E - Turbidimétrico	114
Sulfuros (mgs-2/L)	SM 4500 S F - Yodométrico	15,5

Fuente: Autores. Importado de Excel.

Debido al control estructural que presenta esta manifestación hidrotermal se puede evidenciar una granulometría muy angulosa y sin esfericidad, lo cual es indicio de que este material terrígeno es muy poco transportado; adicionalmente llevan consigo una carga mineralógica importante perteneciente a formaciones aledañas a la zona de estudio, observable en la Figura 8, formación de mármol proveniente de las unidades metamórficas anteriormente mencionadas, además de minerales de origen hidrotermal como la epidota y clorita.



**Figura 8. Discriminación Macro-Mineralógica (Izq) Ap: Apatito, Ep: Epidota, Ca: Calcita, Qz: Cuarzo – (Der) Esm: Esquisto Micáceo, Pi: Pirita**

Fuente: archivo fotográfico de los autores.

Se establecieron los modelos de distribución térmica tanto en superficie como en transición a través del subsuelo y fracturas, desarrollándose un perfil térmico relacionando profundidad y temperatura, en los cuales se determinó que las temperaturas máximas superficiales son de 40°C, y a manera de profundidad una máxima de 45°C, aproximadamente a 4 m de profundidad, evidenciando así un gradiente geotérmico de aproximadamente 1.25 °C por cada metro en profundidad recorrido, como se aprecia en

la Figura 9, aunque este gradiente es muy variable debido a las condiciones extrínsecas al medio como la escorrentía superficial, que provocan el fenómeno de regresión geotérmica superficial en el que se modifica el gradiente geotérmico; en este caso disminuye en el primer metro de profundidad, para luego aumentar su potencia al superar el límite regresivo evidenciado en la Figura 10.

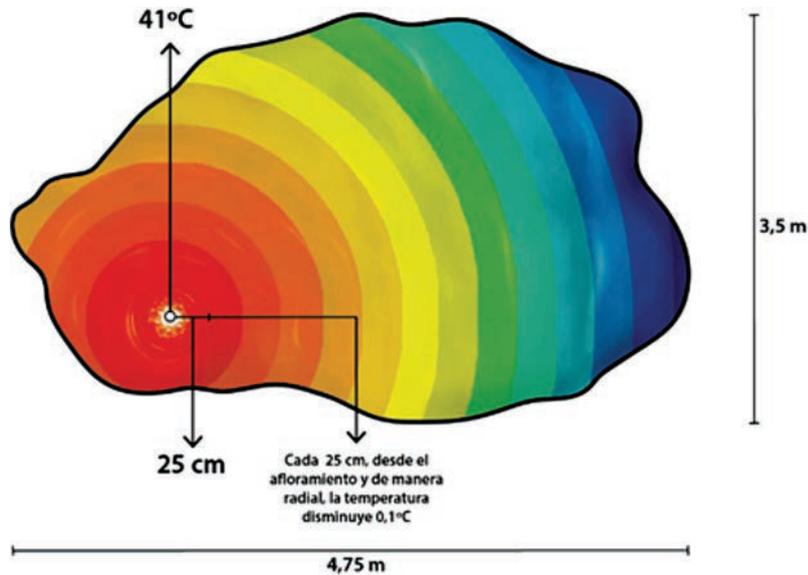


Figura 9. Diagrama de distribución térmica superficial (vista en planta)

Fuente: Elaborado por los Autores. Importado de Illustrator.

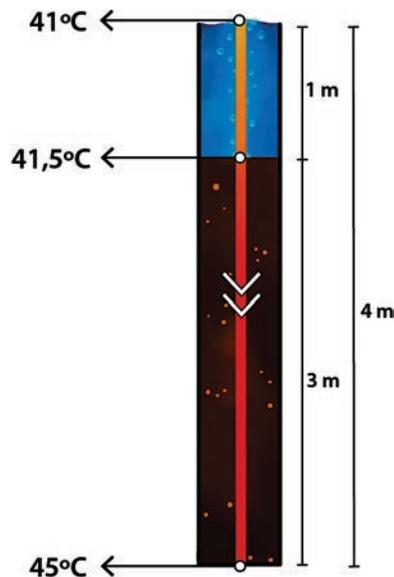


Figura 10. Transición térmica en profundidad - Perfil del punto geotérmico

Fuente: Elaborado por los Autores. Importado de Illustrator.

### 3.2 Becerril, Cesar

Se obtuvo como resultado que las unidades litológicas encontradas en campo son depósitos cuaternarios proporcionados por la margen del Rio Maracas; se encuentra en una zona de falla cubierta, la cual exhuma el Grupo Cogollo (K1K2cg) de calizas micríticas y bioesparitas con su característica composición de Carbonato de Calcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Partiendo de esto se enmarca la zona en el modelo estructuralmente definido a la zona llamado "Trazas de Falla", dominado cinemáticamente.

Cabe aclarar que en algunos lugares es posible que las fallas y los sistemas de fractura estén cubiertos por depósitos superficiales o cuaternarios [31]. El deslizamiento por la falla en su paleo-tectónica puede dar lugar a la permeabilidad anisotrópica extrínseca del material [32], ya que intrínsecamente los materiales calcáreos del Grupo Cogollo (K1K2cg) tienen una permeabilidad menor al 1% [33]. Estos diferentes mecanismos pueden formar y mantener la permeabilidad a lo largo de las superficies de falla, y pueden actuar para canalizar los fluidos hidro-geotérmicos hacia la superficie a los que nos referimos como "aguas termales rastreables en fallas" [34], [35].

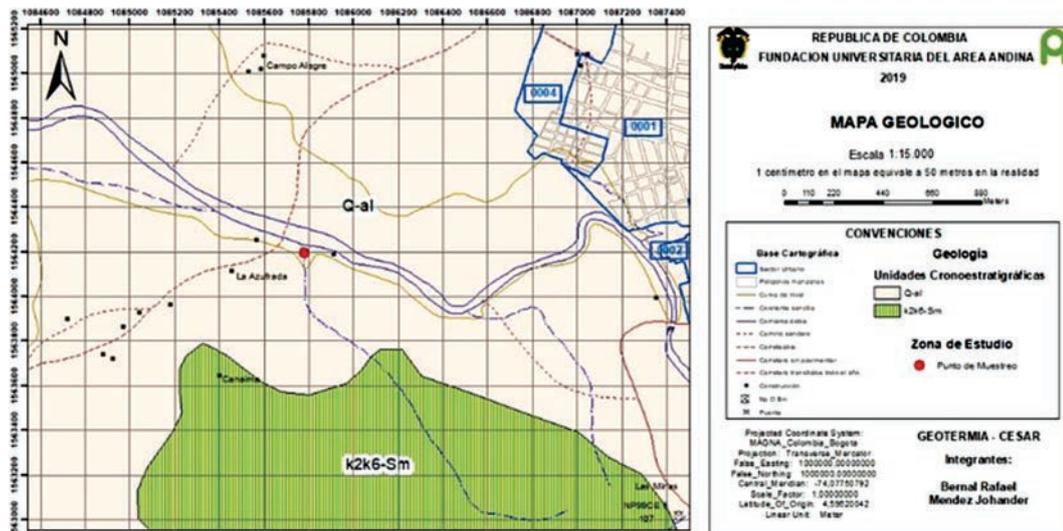


Figura 11. Mapa geológico - Manifestación Becerril

Fuente: Autores. Modificado de SGC (2015).

A partir del contexto estructural asociado al origen de la manifestación, y cotejando la información con los estudios realizados por el Geothermal Education Office [36], [37], se obtuvo una clasificación de margen intra-placa asociado a un tipo de roca sedimentaria química (Figura 12).



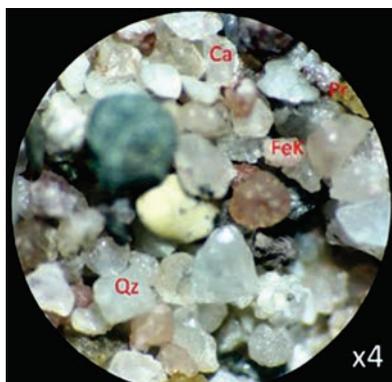
**Figura 12. Clasificación ambiental del Geothermal Education Office**

Fuente: Elaborado por los autores.

Se encontró que los sedimentos provenientes de la manifestación principal son altamente redondeados y de un color oscuro, esto provocado respectivamente por el ciclo de ascenso y descenso que sufren por estar en un ciclo cerrado, dado su alto contenido de materia orgánica inmersa en el fluido [38].

Su alto contenido de azufre le proporciona un olor desagradable a la zona, lo cual es óptimo y un indicio clave para la generación de energía geotérmica, ya que estos son los elementos que logran mantener de mejor manera la energía provocada al interior, almacenándola para que esta pueda ser aprovechada en su transporte hacia la superficie; debido a la gran acción de la falla fisurando el subsuelo, en varias ocasiones se aprecian manifestaciones en toda la longitud del río, pero que no pueden ser aprovechadas por su contaminación con las aguas dulces, las cuales bajan su potencial geotérmico drásticamente [39], [42].

En el laboratorio de la Fundación Universitaria del Área Andina se observa una composición mineralogía resaltando: feldespato potásico, cuarzo, calcita y pirita, evidenciados en la Figura 13, lo cual indica la utilización de compuestos minerales de la zona sin movilización de compuestos de formaciones aledañas; así mismo los sedimentos encontrados son redondeados, lo que indica una cadena de transporte permanente en esta manifestación hidrotermal [43]-[45].



**Figura 13. Discriminación macro-mineralógica. Qz: Cuarzo, Fek: Feldespato Potásico, Ca: Calcita, Pr: Pirita**

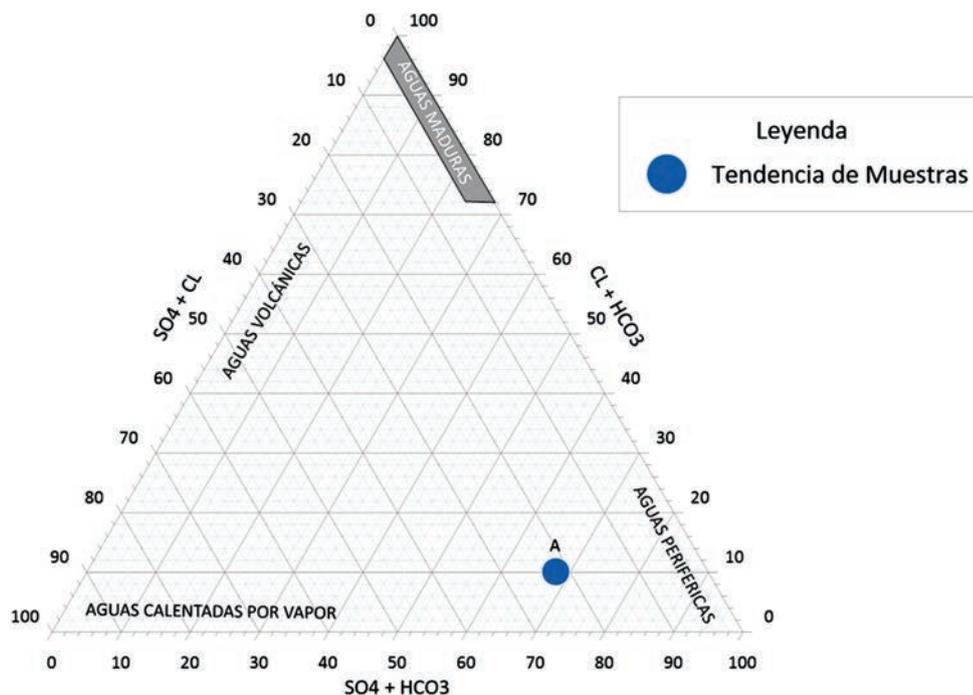
Fuente: archivo fotográfico de los autores.

Teniendo en cuenta la proporción de su composición química (Tabla 2), se generaron los siguientes diagramas (Figura 14) para establecer el origen de las aguas y facilitar el entendimiento de los procesos que en ellas actúan [46]. A nivel composicional el fluido emanante presenta una tendencia a un tipo periférico por su alta concentración de carbonatos, que pueden proceder de la lixiviación que le realiza a la formación donde se encuentra, la cual es rica en rocas sedimentarias química [47], y a nivel térmico su poca área de acción y su estrecha cercanía con el agua fría del río hace que el potencial de este se vea drásticamente afectado, presentando temperaturas en superficie de 30°C hasta 34°C, a una profundidad de 3 metros [48]-[51].

**Tabla 2. Composición fisicoquímica de termales Ciénaga**

Parámetro	Valores
PH	7.05
Temperatura superficial (°C)	30,3
Conductividad (μS/cm)	854
Alcalinidad Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	328.9
Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	240.9
Cloruros (mg cl-/l)	68.9
Sulfatos (mg so <sub>4</sub> -2/l)	70.2

Fuente: Elaborado por los autores. Importado de Illustrator.



**Figura 14. Diagrama triangular - Origen de las aguas**

Fuente: Elaborado por los autores. Importado de Grapher 12.

## CONCLUSIONES

A nivel geológico las dos manifestaciones hidrotermales se encuentran en unidades distintas. En Ciénaga el terreno se ve condicionado por rocas de tipo ígneo-metamórfico, mientras que, por el contrario, en Becerril se encuentran formaciones sedimentarias suprayaciendo a cuerpos sedimentarios químicos; sin embargo, ambas locaciones están controladas por zonas de fallas y porosidades secundarias producto del fracturamiento.

Dados los análisis químicos realizados en el muestreo, se determina que la composición de carbonatos, cloruros, sulfuros y sulfatos orientan a dos ambientes: para la emanación de Becerril se tiene que las aguas termales se asocian a un proceso de enterramiento y percolación de aguas superficiales, dado que prima la concentración de carbonatos, y el poder calórico producto del enterramiento es mitigado por la baja temperatura de la fuente fluvial cercana al punto de emanación, mientras que en Ciénaga la acción de la zona de falla es la principal fuente de poder calórico, además la concentración de sulfatos es mayor en proporción a los bicarbonatos, asociado directamente a una fase calentada por vapor, interactuando en una zona de mezcla con aguas superficiales.

La emanación de Becerril a 3 metros de profundidad, referente a la base de emanación, presenta temperaturas que oscilan de 30-34°C, estableciéndose como un “Manantial Hidrotermal de Entalpia Baja (Potencial Bajo)” con aplicaciones solamente turísticas; los datos en Ciénaga arrojan que a 4 metros de profundidad, referente a la base de emanación, las temperaturas oscilan de 41-45°C, estableciéndose como una Fisura Hidrotermal de Entalpia Media (Potencial Medio-Bajo), respectivamente, pudiendo desarrollar aplicaciones desde piscicultura hasta proyectos de invernaderos.

## REFERENCIAS

- [1] E. Mejía, L. Rayo, J. Méndez y J. Echeverri, *Geothermal development in Colombia*, 2014, p. 7.
- [2] J.W. Lund y D.H. Freeston, World-wide direct uses of geothermal energy 2000, *Geothermics*, Vol. 30, N° 1, 2001, pp. 29-68.
- [3] A. Kagel, D. Bates y K. Gawell, A guide to geothermal energy and the environment, *Geothermal Energy Association*, Washington, DC (USA), US, None, abr. 2005. doi: 10.2172/897425.
- [4] F. D'Amore y A.H. Truesdell, Calculation of geothermal reservoir temperatures and steam fractions from gas compositions, *Geological Survey*, Menlo Park, CA (USA); Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, Pisa (Italy), DOE/RA/50294-T2, ene. 1985. doi: 10.2172/6060131.
- [5] E. Akrami, A. Chitsaz, H. Nami y S. M. S. Mahmoudi, Energetic and exergoeconomic assessment of a multi-generation energy system based on indirect use of geothermal energy, *Energy*, Vol. 124, abr. 2017, pp. 625-639, doi: 10.1016/j.energy.2017.02.006.
- [6] S.E. Grasby *et al*, *Geothermal energy resource potential of Canada*, 6914, 2012. doi: 10.4095/291488.

- [7] GEA, *Geothermal Basics - Mythbusters*. Disponible en: [http://www.geo-energy.org/geo\\_basics\\_mythbusters.aspx](http://www.geo-energy.org/geo_basics_mythbusters.aspx) (accedido sep. 12, 2019).
- [8] C. Alfaro, Improvement of Perception of the Geothermal Energy as a Potential Source of Electrical Energy in Colombia, Country Update, 2015.
- [9] N.C. Marzolf, Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia, Vol. 1, N° 1, p. 86.
- [10] UPME, *Plan energético nacional Colombia: Ideario energético 2050*, Vol. 1, N° 1, p. 184.
- [11] N. Kholod *et al.*, Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production, *J. Clean. Prod.*, Vol. 256, 120489, 2020.
- [12] X. Tang, Y. Jin, B.C. McLellan, J. Wang y S. Li, China's coal consumption declining-Impermanent or permanent?, *Resour. Conserv. Recycl.*, Vol. 129, pp. 307-313, 2018.
- [13] groups/337207473276, La exportación de carbón es un ingreso económico importante para Colombia, pero tiene efectos climáticos y sociales dañinos. ¿Qué opciones tenemos? *Biogenic. Colombia*, abr. 02, 2017. Disponible en: <http://blogs.eltiempo.com/biogenic-colombia/2017/04/02/la-exportacion-de-carbon-es-un-ingreso-economico-importante-para-colombia-pero-tiene-efectos-climaticos-y-sociales-daninos-que-opciones-tenemos/> (accedido sep. 12, 2019).
- [14] C. Alfaro, L.A. Briceño, I. Alvarado y W. Quintero, Mapa Geotérmico de Colombia–2009 [PAPER IN SPANISH] Geothermal Map of Colombia-2009, 2009.
- [15] N.F. Bernal, G. Ramírez y C.V. Alfaro, Mapa Geotérmico de Colombia. Versión 1.0. Escala 1: 1'500.000. Memoria explicativa. Exploración y Evaluación de Recursos Geotérmicos, 2000.
- [16] H.C.H. Armstead y H.C.H. Armstead, *Geothermal energy: its past, present and future contributions to the energy needs of man*. Spon London, 1978.
- [17] A. Paulillo, L. Cotton, R. Law, A. Striolo y P. Lettieri, Geothermal energy in the UK: The life-cycle environmental impacts of electricity production from the United Downs Deep Geothermal Power project, *J. Clean. Prod.*, Vol. 249, 119410, 2020.
- [18] M.A. Thayer, Contingent valuation techniques for assessing environmental impacts: further evidence, *J. Environ. Econ. Manag.*, Vol. 8, N° 1, pp. 27-44, 1981.
- [19] E. Gómez Díaz, *Low Enthalpy Geothermal System at Dabeiba, Colombia; an Assessment Through the Hydrogeochemistry of Thermal Waters*, feb. 2019.
- [20] D. Bonté, Subsurface temperature of the onshore Netherlands: new temperature dataset and modelling, *Neth. J. Geosci.*, p. 25, 2012.
- [21] R. M. Díaz, A. Costa, L. Duarte y C. Rosa, Comunicación Tema 2. Principales características y limitaciones del acuífero cretácico inferior en la región de Lisboa para su potencial uso como recurso geotérmico de Baja Entalpía, p. 7, 2013.
- [22] INVTERMALES, *Bienvenidos al Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales*. Disponible en: <http://hidrotermales.sgc.gov.co/> (accedido sep. 12, 2019).
- [23] ICONTEC, NTC-ISO 5667-02-1995. Técnicas generales de muestreo. ICONTEC, oct. 08, 2018, Accedido: sep. 12, 2019. Disponible en: <http://files.control-ambiental5.webnode.com.co/200000144-4dfdd4f559/NTC-ISO%205667-02-1995.%20Tecnicas%20generales%20de%20muestreo.pdf>

- [24] G. Gloria, *Manual de análisis de agua*, Tesis Profesor Asistente, Universidad Nacional de Colombia (Sede Manizales), 1995.
- [25] J.C. Mendiberri, *Sedimentología Sedimentology*. Disponible en: <https://www.aiu.edu/spanish/publications/student/spanish/180-207/sedimentologia-sedimentology.html> (accedido sep. 12, 2019).
- [26] Ministerio de Industria y Energía y Secretaría de la Energía y Recursos Minerales, Análisis metodológico de las técnicas geoquímicas empleadas en prospección geotérmica, Instituto Geológico Minero de España, oct. 08, 1985, Disponible en: [http://info.igme.es/SidPDF/035000/001/Analisis%20metodologico%20de%20las%20tecnicas%20geoquimicas%20empleadas%20en%20prospeccion%20geotermica/35001\\_0001.pdf](http://info.igme.es/SidPDF/035000/001/Analisis%20metodologico%20de%20las%20tecnicas%20geoquimicas%20empleadas%20en%20prospeccion%20geotermica/35001_0001.pdf)
- [27] Servicio Geológico Colombiano, *Plancha Becerril*, dic. 08, 2015 (accedido: mar. 11, 2019). Disponible en: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B15/23008010028468/Documento/Pdf/2105284681103000.pdf>
- [28] SGC, *Elaboración de la cartografía geológica de un conjunto de planchas a escala 1:100.000 Ubicadas en cuatro bloques del territorio nacional, identificados por el Servicio Geológico Colombiano*, 2015, p. 160.
- [29] H. Marina, *Memoria explicativa Plancha 18 - Ciénaga*. SGC, abr. 13, 2013, Disponible en: <http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024387/documento/pdf/0101243871101000.pdf>
- [30] E. Rojas Martínez, M. Fortich Duarte y H. Pavajeau Maestre, Determinación del origen y la composición de las aguas termales ubicadas en los municipios de Becerril (Cesar) y Ciénaga (Magdalena), Colombia, *Ingenium*, Vol. 8, N° 21, p. 35, sep. 2014, doi: 10.21774/ing.v8i21.441.
- [31] D. Curewitz y J.A. Karson, Structural settings of hydrothermal outflow: Fracture permeability maintained by fault propagation and interaction, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 79, N° 3-4, pp. 149-168, dic. 1997, [https://doi.org/10.1016/S0377-0273\(97\)00027-9](https://doi.org/10.1016/S0377-0273(97)00027-9).
- [32] C.H. Scholz, N.H. Dawers, J.Z. Yu, M.H. Anders y P. A. Cowie, Fault growth and fault scaling laws: Preliminary results, *J. Geophys. Res. Solid Earth*, Vol. 98, N° B12, pp. 21951-21961, dic. 1993, doi: 10.1029/93JB01008.
- [33] SGC, Memoria Explicativa Plancha 41-42. Servicio Geologico Colombiano, Accedido: feb. 10, 2018. Disponible en: [http://recordcenter.sgc.gov.co/B23/585\\_19\\_PL41\\_GmfBecerril/Documento/Pdf/MemoGmf41.pdf](http://recordcenter.sgc.gov.co/B23/585_19_PL41_GmfBecerril/Documento/Pdf/MemoGmf41.pdf)
- [34] C.E. Barker, Geothermics of petroleum systems: Implications of the stabilization of kerogen thermal maturation after a geologically brief heating duration at peak temperature, *Petroleum Systems of the United States*, Vol. 1870, US Geological Survey Bulletin 1870, Washington, DC, 1988, pp. 26-29.
- [35] A. Minissale *et al.*, Geochemistry, geothermics and relationship to active tectonics of Gujarat and Rajasthan thermal discharges, India, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 127, N° 1-2, 2003, pp. 19-32.
- [36] G.G.E. Facts, «eothermal education office, Calif. USA [Httpgeothermal Mar. Orgpwrheat Html](http://geothermal.mar.org/pwrheat.html) Q1, 2004.
- [37] GEO, *Geothermal Education Office*. Disponible en: <http://geothermaleducation.org/> (accedido sep. 27, 2017).
- [38] P.A. Bakane, Overview of extraction of mineral/metals with the help of geothermal fluid, *Proceedings of the 38th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, CA, USA*, 2013, pp. 11-13.

- [39] J. Hecht-Méndez, N. Molina-Giraldo, P. Blum y P. Bayer, Evaluating MT3DMS for heat transport simulation of closed geothermal systems, *Groundwater*, Vol. 48, N° 5, 2010, pp. 741-756.
- [40] A. Gudmundsson, I. Fjeldskaar y S.L. Brenner, Propagation pathways and fluid transport of hydrofractures in jointed and layered rocks in geothermal fields, *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, Vol. 116, N° 3-4, 2002, pp. 257-278.
- [41] T. Xu, E. Sonnenthal, N. Spycher y K. Pruess, TOUGHREACT-a simulation program for non-isothermal multiphase reactive geochemical transport in variably saturated geologic media: applications to geothermal injectivity and CO<sub>2</sub> geological sequestration, *Comput. Geosci.*, Vol. 32, N° 2, 2006, pp. 145-165.
- [42] A.H. Truesdell, J.R. Haizlip, H. Armannsson y F. d'Amore, Origin and transport of chloride in superheated geothermal steam, *Geothermics*, Vol. 18, N° 1-2, 1989, pp. 295-304.
- [43] A. Kaya, The effects of extensional structures on the heat transport mechanism: an example from the Ortakçı geothermal field (Büyük Menderes Graben, SW Turkey), *J. Afr. Earth Sci.*, Vol. 108, 2015, pp. 74-88.
- [44] Y.S. Wu y K. Pruess, *A 3-D hydrodynamic dispersion model for modeling tracer transport in Geothermal Reservoirs*, Lawrence Berkeley National Lab. (LBNL), Berkeley, CA (United States), 1998.
- [45] S. Gentier, X. Rachez, M. Peter-Borie, A. Blaisonneau y B. Sanjuan, *Transport and flow modelling of the deep geothermal exchanger between wells at Soultz-sous-Forêts (France)*, 2011.
- [46] K. Gessner, M. Kühn, V. Rath, C. Kosack, M. Blumenthal y C. Clauser, Coupled process models as a tool for analysing hydrothermal systems, *Surv. Geophys.*, Vol. 30, N° 3, 2009, pp. 133-162.
- [47] B.C. Valley, *The relation between natural fracturing and stress heterogeneities in deep-seated crystalline rocks at Soultz-sous-Forêts (France)*, PhD Thesis, ETH Zurich, 2007.
- [48] N.J. Kusznir y R.G. Park, The extensional strength of the continental lithosphere: its dependence on geothermal gradient, and crustal composition and thickness, *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.*, Vol. 28, N° 1, 1987, pp. 35-52.
- [49] H. Brian, «eothermal gradients, hydrodynamics, and hydrocarbon occurrences, Alberta, Canada, *AAPG Bull.*, Vol. 68, N° 6, 1984, pp. 713-743.
- [50] D. Rodríguez U, C. Rodríguez, S. Ramírez y C. Flórez, Evaluación del efecto del envejecimiento del cemento asfáltico 80-100 modificado con lignina, *Ingeniare*, N° 20, 2016, pp. 47-62.
- [51] H. Martin, Effect of steeper Archean geothermal gradient on geochemistry of subduction-zone magmas, *Geology*, Vol. 14, N° 9, 1986, pp. 753-756.