

Documento confidencial

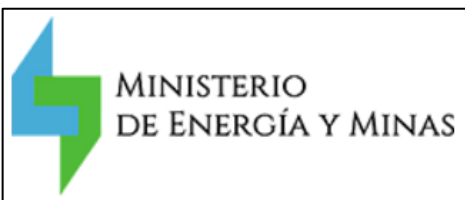
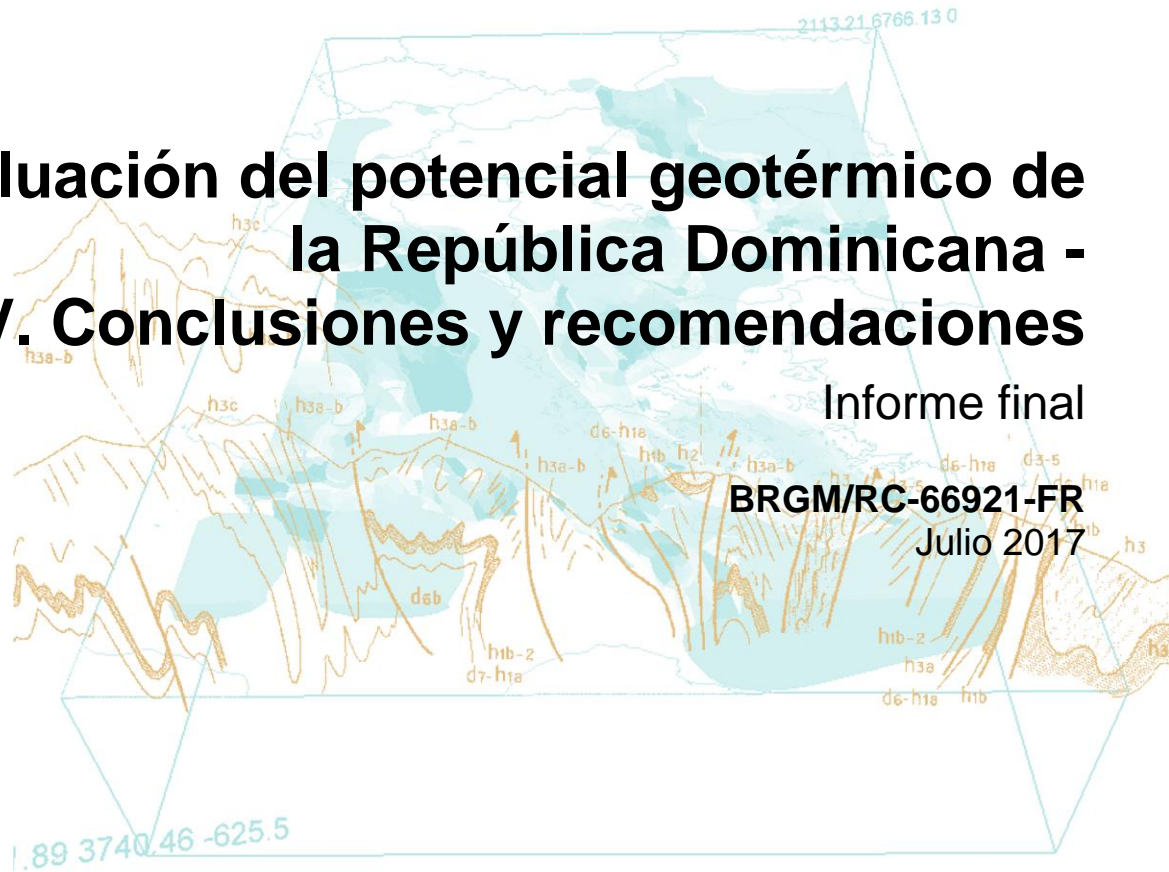


Evaluación del potencial geotérmico de la República Dominicana - IV. Conclusiones y recomendaciones

Informe final

BRGM/RC-66921-FR

Julio 2017



Documento confidencial

Evaluación del potencial geotérmico de la República Dominicana - IV. Conclusiones y recomendaciones

Informe final

BRGM/RC-66921-FR

Julio 2017


Estudio llevado bajo el contrato con el BID # CID-0001.16-00-C

B. Sanjuan, V. Bouchot, E. Bourdon, D. Tournaye, F. Gal, B. Vittecoq
Con la colaboración de **S. Muñoz, J. Rodriguez, S. Gonzalez, Y. Rodriguez, J. Vargas, A. Suardi**

Verificador:

Apellido: J.-Ph. Rançon


Fecha: 11/07/2017

Firma: 

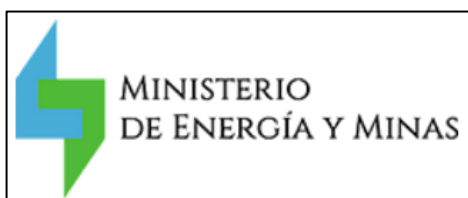
Aprobador:

Apellido: Ph. Rocher

Fecha: 12/07/2017

Firma: 

El sistema de gestión de la calidad y del medio-ambiente está certificado por AFNOR según las normas ISO 9001 e ISO 14 001.



Palabras claves: geotermia, República Dominicana, potencial, exploración, geología, geoquímica, mineralogía, fallas, fuentes termales, pozos, geotermómetros

En la bibliografía, este informe será citado de la manera siguiente:

Sanjuan B., Bouchot V., Bourdon E., Tournaye D., Gal F., Vittecoq B., Muñoz S., Rodriguez J., Gonzalez S., Rodriguez Y., Vargas J., Suardi A. (2017) – Evaluación del potencial geotérmico de la República Dominicana - IV. Conclusiones y recomendaciones. Informe final BRGM/RC-66921-FR, 32 p., 6 fig., 2 tabl.

Síntesis

Con el fin de aumentar su producción e independencia energética, diversificar sus recursos y abastecer su consumo creciente de energía, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) de la República Dominicana deseó volver a lanzar el estudio del potencial geotérmico del país, que había empezado en los años 1980.

Después de varios intercambios con el MEM y el Servicio Geológico Nacional (SGN) de la República Dominicana, la propuesta hecha por el BRGM para volver a iniciar el desarrollo de la geotermia en la República Dominicana fue aceptada y constituye el estudio presente de “Evaluación del potencial geotérmico de República Dominicana”, financiado por el Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID), bajo el contrato # CID-0001.16-00-C. Este estudio cuya duración es de 15 meses (Junio 2016 - Agosto 2017) se ha efectuado con la estrecha colaboración del MEM y del SGN de la República Dominicana.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los principales estudios de exploración geotérmica realizados hasta ahora por el BRGM en 1980 y ELECTROCONSULT en 1984, y las recomendaciones dadas en los informes respectivos, el BRGM propuso llevar a cabo un proyecto con diferentes etapas, como se suele hacer clásicamente en geotermia. Al final de cada etapa, se decide que continuación se le da al proyecto (GO/NO GO). Este estudio corresponde a la primera etapa.

Uno de los objetivos principales de la primera etapa es el de saber con más certeza si existe una posibilidad en la República Dominicana de desarrollar geotermia de alta energía para producir electricidad en las zonas del sector Yayas de Viajama - Constanza - Valle Nuevo definidas como prioritarias en 1980 y en 1984. Efectivamente, en los dos estudios anteriores, las estimaciones de las temperaturas profundas dadas por geotermometría variaban de 80 a 150-160°C (para la fuente termal de Magueyal) y hasta 240°C (para la fuente termal de Guayabal), lo que constituye importantes diferencias. Además, después de la medida de la temperatura en el fondo del único sondeo de gradiente térmico, cuya ubicación fue recomendada por ELECTROCONSULT en la zona de Constanza - Valle Nuevo, y que fue sólo de 34°C a 200 m, se pararon todas las investigaciones geotérmicas hasta este proyecto. Otro objetivo del proyecto es de mejor definir las zonas potencialmente favorables a la geotermia de baja y mediana energía (< 150°C) como podrían ser las áreas de las fuentes calientes de Canoa y de Pedro Santana, así como las cuencas de Enriquillo y de Azua, identificadas en el estudio de 1980 del BRGM.

Esta primera etapa incluye:

- un estudio bibliográfico de los trabajos existentes;
- un estudio de reconocimiento geotérmico de campo con trabajos en geología y en geoquímica;
- un estudio de pre-factibilidad técnico-económico;
- un documento final de síntesis para discutir con el MEM y dar recomendaciones para la continuación del estudio.

Después de haber realizado los tres primeros estudios, este informe presenta las conclusiones de la primera etapa y hace proposiciones para la continuación del proyecto.

Con el estudio de reconocimiento geotérmico de campo, se concluyó que la temperatura máxima de las aguas termales de las zonas del sector Yayas de Viajama - Constanza - Valle Nuevo es de $90 \pm 20^{\circ}\text{C}$ en Guayabal y de $80 \pm 20^{\circ}\text{C}$ en Magueyal, San Simón de Tamayo y Vuelta Grande. Se pudieron hacer los primeros modelos conceptuales de estas zonas con todos los conocimientos adquiridos desde los años 80, así como el de la zona de Canoa, que indica valores de temperatura profunda de $75 \pm 20^{\circ}\text{C}$.

Para las otras aguas termales como las de Ranchería Alta, Galindo, Aguas Calientes de San José de las Matas, Los Bambuses y Pedro Santana, las temperaturas profundas estimadas son inferiores a 70°C , y no parece haber signo de magmatismo profundo que pueda indicar anomalías térmicas con comparación con un gradiente térmico normal, ni de una presencia de un sistema hidrotermal actual importante.

Después de haber efectuado el estudio de pre-factibilidad técnico-económico y haber cruzado los resultados obtenidos con los de los recursos geotérmicos identificados en el campo, se destacan diferentes aplicaciones posibles de energía geotérmica en la República Dominicana.

En lo que se refiere a la producción de electricidad, no se puede generar esta última con turbinas convencionales utilizando el vapor geotérmico a partir de los recursos identificados, ya que indican una temperatura máxima de $90 \pm 20^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, aunque en límite de temperatura, el uso de un ciclo binario ORC (Organic Rankine Cycle) para generar electricidad, a partir de la vaporización de un fluido orgánico calentado por el agua caliente, podría ser considerado en el área de La Tina - Guayabal, con condiciones específicas favorables como un valor de caudal alto, un volumen de agua del reservorio importante y una profundidad relativamente moderada (≈ 500 m) para obtener este orden de temperatura. Habría también que ver si la renovación de la carretera para acceder a esta área (existen pasajes en muy mal estado) no requiere gastos excesivos. En esta zona no interconectada al sistema eléctrico nacional, la realización de un proyecto de electrificación rural, con unos cientos de kW, podría permitir el desarrollo económico de la zona. El uso luego en cascada del fluido geotérmico a la salida del ciclo binario podría también alimentar los invernaderos en calor renovable, a nivel local.

En todos los casos, varias perforaciones serán necesarias para alimentar en agua caliente un ciclo ORC a baja temperatura, teniendo en cuenta los grandes volúmenes de agua necesarios y los diámetros de perforación disponibles en República Dominicana (5 pulgadas). Actualmente, para que un proyecto de este tipo resulte ser económicamente viable, no se puede realizar pozos como suele utilizar la industria geotérmica (perforaciones de $12' \frac{1}{4}$ de 2 000 m de profundidad media), con un coste medio de 4 millones de USD. Los equipos disponibles para la perforación en la República Dominicana permiten hacer pozos a una profundidad máxima de 500 m, con un diámetro final de 5 pulgadas y con un coste final de aproximadamente 150-200 USD por cada metro perforado. Este tipo de perforación requiere una plataforma de unos 200 m². De este modo, un proyecto de este tipo podría requerir una inversión de varios millones de dólares.

Con una temperatura del reservorio geotérmico estimada de $80 \pm 20^{\circ}\text{C}$, el sistema de Magueyal, San Simón y Vuelta Grande también podría ser potencialmente utilizado para desarrollar una central de ciclo binario ORC para la producción de electricidad, con costes de infraestructura algo más bajos que para la zona de Guayabal. No obstante, el modelo conceptual sugiere una localización del reservorio geotérmico a una profundidad de unos 2 000 m, lo que haría mucho más difícil justificar económicamente el proyecto.

De todos modos, antes de perforar los pozos, se recomienda efectuar un estudio geofísico magnetotelúrico (MT), acompañado por una interpretación geológica de los datos obtenidos, para tener una mejor estimación de la profundidad del reservorio geotérmico y una mejor definición de su geometría.

Dado el tipo de recursos geotérmicos existentes en la República Dominicana, la generación eléctrica de origen geotérmico, si resulta viable económicamente, sólo podrá desempeñar un papel mínimo en la matriz eléctrica del país con algunos proyectos de baja potencia (≤ 1 MW).

En el campo de la utilización directa del calor, ningún área presenta necesidades de calor suficientemente grandes para justificar económicamente el desarrollo de la energía geotérmica para sustituirse a las necesidades existentes. Sin embargo, por lo menos en dos áreas, podrían ser propuestos, también con condiciones específicas favorables de acceso al recurso, proyectos pilotos de geotermia de baja entalpía para aplicaciones relacionadas con actividades agro-industriales.

El primer proyecto podría desarrollarse en la zona de San José de las Matas - Aguas calientes, con el uso directo de calor geotérmico para secar el café en la fábrica "Asociación de los Caficultores Unidos para el Progreso". Sin embargo, para que el proyecto sea económicamente viable, no se sabe si se pueden alcanzar los 60°C a menos de 500 m y si existe un reservorio importante de agua en este intervalo de profundidad. Antes de efectuar perforaciones, se recomienda, de nuevo, llevar a cabo un estudio geofísico magnetotelúrico para tener una mejor estimación de la profundidad de este reservorio y una mejor definición de su geometría.

En caso de resultados positivos, el proyecto piloto podría inicialmente validar la viabilidad del secado geotérmico de una pequeña parte de la producción de café de la asociación antes de extenderlo, en caso de éxito, a la totalidad de la producción de la Procesadora (7 000 quintales), y luego la totalidad de la producción local (20 000 quintales). Garantizando el proceso de secado, esta solución permitiría mejorar la calidad del café producido y finalmente, maximizar el valor añadido de la producción local. La compra de una secadora de granos que se utiliza con el recurso geotérmico (o una secadora normal que se puede "geotermalizar") sería la única inversión importante en este tipo de proyecto (miles a decenas de miles de dólares dependiendo del tamaño de la secadora).

El segundo proyecto piloto podría ser desarrollado en el área termal de Los Bambuses, que está cerca de la zona agrícola de Constanza. En esta área de altitud elevada ($> 1\ 000$ m), donde las temperaturas pueden caer por debajo de 0°C , el suministro de calor geotérmico para la calefacción de los invernaderos existentes mejoraría significativamente los rendimientos de los cultivos, garantizando una producción constante durante todo el año. Actualmente, los invernaderos no utilizan ningún sistema de calefacción. El uso de la calefacción geotérmica requiere que los invernaderos estén equipados de un sistema de distribución de calor, que puede ser simple y barato. Dependiendo de la naturaleza del fluido geotérmico, este último podría circular directamente en el sistema de distribución o utilizando un intercambiador de calor para alimentar un circuito secundario. Sin embargo, para que el proyecto sea económicamente viable, se necesitaría una temperatura de por lo menos 40°C a menos de 500 m de profundidad. Como para los otros proyectos, se recomienda llevar a cabo un estudio geofísico magnetotelúrico antes de efectuar perforaciones.

El mismo tipo de proyecto podría ser realizado en el área de La Tina - Guayabal, donde también existen invernaderos. En esta zona, se podría utilizar el fluido geotérmico a la salida del ciclo ORC para recuperar el calor residual antes de la reinyección en el subsuelo.

En estas diferentes zonas de producción agrícola que envían todos sus productos frescos a las principales ciudades, proyectos de secado de verduras/frutas con calor geotérmico también podrían ser desarrollados. Esta nueva actividad tendría la ventaja de aumentar el valor añadido de los productos regionales, y al mismo tiempo, proporcionar nuevos puestos de trabajo al nivel local.

La reconversión de antiguos pozos de exploración petrolífera (hasta 4 000-5 000 m de profundidad), actualmente abandonados, en pozos geotérmicos fue también mencionada para generar electricidad con un ciclo ORC o para usos directos de calor. Sin embargo, si la existencia de estos pozos presenta la gran ventaja de ahorrar costes de perforación, hay dos limitaciones muy importantes:

- la factibilidad técnica de la conversión de estos pozos petrolíferos en pozos geotérmicos, lo que requiere, en todos los casos, más informaciones sobre las características de estos pozos y los acuíferos calientes atravesados, así como un estudio de ingeniería de pozo y trabajos de reacondicionamiento;
- la necesidad de perforar, por lo menos, un pozo profundo para reinyectar el agua que se va a producir, cuya salinidad es generalmente elevada en estos contextos sedimentarios.

Para el uso directo de calor, sería también indispensable que estos pozos estuvieran cerca de una densidad suficiente de infraestructuras, como pueden ser hoteles de gran tamaño.

Teniendo en cuenta todos estos resultados y estas perspectivas, al final de esta primera etapa, se debe ahora de decidir con las instancias de la República Dominicana que continuación se le va a dar al proyecto de valorización del potencial geotérmico del país (GO/NO GO), sabiendo que la segunda etapa antes de pasar a la perforación estaría principalmente constituida por estudios geofísicos magnetotelúricos, acompañados por una interpretación geológica de los datos obtenidos, para mejor definir la profundidad y la geometría del reservorio geotérmico investigado, y proponer de este modo las localizaciones más adecuadas para la implantación de los pozos.

Para determinar estas localizaciones, habrá también que tener en cuenta todos los detalles de logística necesarios para perforar (dimensión del área de la plataforma de perforación adaptada, posibilidades de acceso a esta área, disponibilidad de esta área, alimentación en agua para las perforaciones, etc.). Luego, se podrá pasar a la etapa de las perforaciones.

Sinopsis

1. Introducción.....	9
1.1 CONTEXTO GENERAL	9
1.2 MARCO DEL ESTUDIO Y OBJETIVOS.....	10
2. Resultados científicos obtenidos y aplicaciones.....	13
2.1 MODELOS CONCEPTUALES	14
2.1.1 Modelo conceptual del sistema geotérmico del área La Tina - Guayabal	15
2.1.2 Modelo conceptual del sistema geotérmico de Magueyal, San Simón de Tamayo y Vuelta Grande	18
2.1.3 Modelo conceptual del sistema geotérmico de Canoa	21
2.2 PROPUESTAS PARA APLICACIONES GEOTERMICAS.....	25
2.2.1 Aplicaciones para generación de electricidad	25
2.2.2 Aplicaciones para usos directos del calor geotérmico	27
3. Conclusiones y recomendaciones.....	29
4. Bibliografía	31

Lista de las tablas

Tabla 1 - Las etapas clásicas de un proyecto de desarrollo de un recurso geotérmico de alta energía para la producción de electricidad (duraciones y costos estimativos).	12
Tabla 2 - Valores de temperatura estimados a partir de los geotermómetros químicos e isotópicos aplicados a las aguas termales de este estudio (Sanjuan <i>et al.</i> , 2017b)...	14
Tabla 3 - Tabla sintética que presenta las principales características de los reservorios geotérmicos potenciales que podrían alimentar en agua las fuentes termales más calientes de la República Dominicana.	23

Lista de las figuras

Figura 1 - Zonas de interés geotérmico en la República Dominicana (Varet, 1980), antes de este estudio.	9
Figura 2 - Riesgos asociados a las diferentes etapas de un proyecto clásico de geotermia de alta energía (fuente: Sinclair, Knight & Merz).....	11
Figura 3 - Localización de las fuentes termales estudiadas en el mapa geológico de la República Dominicana (Sanjuan <i>et al.</i> , 2017b).	13
Figura 4 - Modelo conceptual del funcionamiento del sistema geotérmico de Guayabal (Sanjuan <i>et al.</i> , 2017b).	16
Figura 5 - Modelo conceptual del funcionamiento del sistema geotérmico de Magueyal, San Simón y Vuelta Grande (Sanjuan <i>et al.</i> , 2017b).	20
Figura 6 - Corte regional SSO-NNE pasando por las 4 fuentes termales de Guayabal, Magueyal, San Simón y Vuelta Grande (Sanjuan <i>et al.</i> , 2017b).....	20
Figura 7 - Modelo conceptual del funcionamiento del sistema geotérmico de Canoa, a partir de un corte esquemático N-S indicando la geometría en pop up del anticlinal de Canoa (Sanjuan <i>et al.</i> , 2017b).....	22
Figura 8 - Zonas seleccionadas en este estudio para aplicaciones geotérmicas (encontradas en rojo).....	25

1. Introducción

1.1 CONTEXTO GENERAL

Como muchos países del Caribe, la República Dominicana muestra una fuerte dependencia al petróleo para la producción de su electricidad. Con el fin de aumentar su producción e independencia energética, diversificar sus recursos y abastecer su consumo creciente de energía, el Ministerio de Energía y Minas (MEM) de la República Dominicana deseó volver a lanzar el estudio del potencial geotérmico del país, que había empezado en los años 1980.

El primer estudio importante de reconocimiento geotérmico de superficie fue el que la Organización Latino-Americana de Energía (OLADE) confió a la Oficina de Investigación Geológica y Minera francesa (BRGM por sus siglas en francés), en 1980, para identificar zonas de interés geotérmico en la isla de La Española (Hispaniola), constituida por la República Dominicana y la de Haití (Varet, 1980). Al final de este estudio, en República Dominicana, se identificaron cuatro zonas con diferente orden de prioridad de interés geotérmico (fig. 1). El eje volcánico Yayas de Viajama - Constanza fue considerado como uno de los únicos donde se podría desarrollar la geotermia de alta temperatura para producir electricidad.

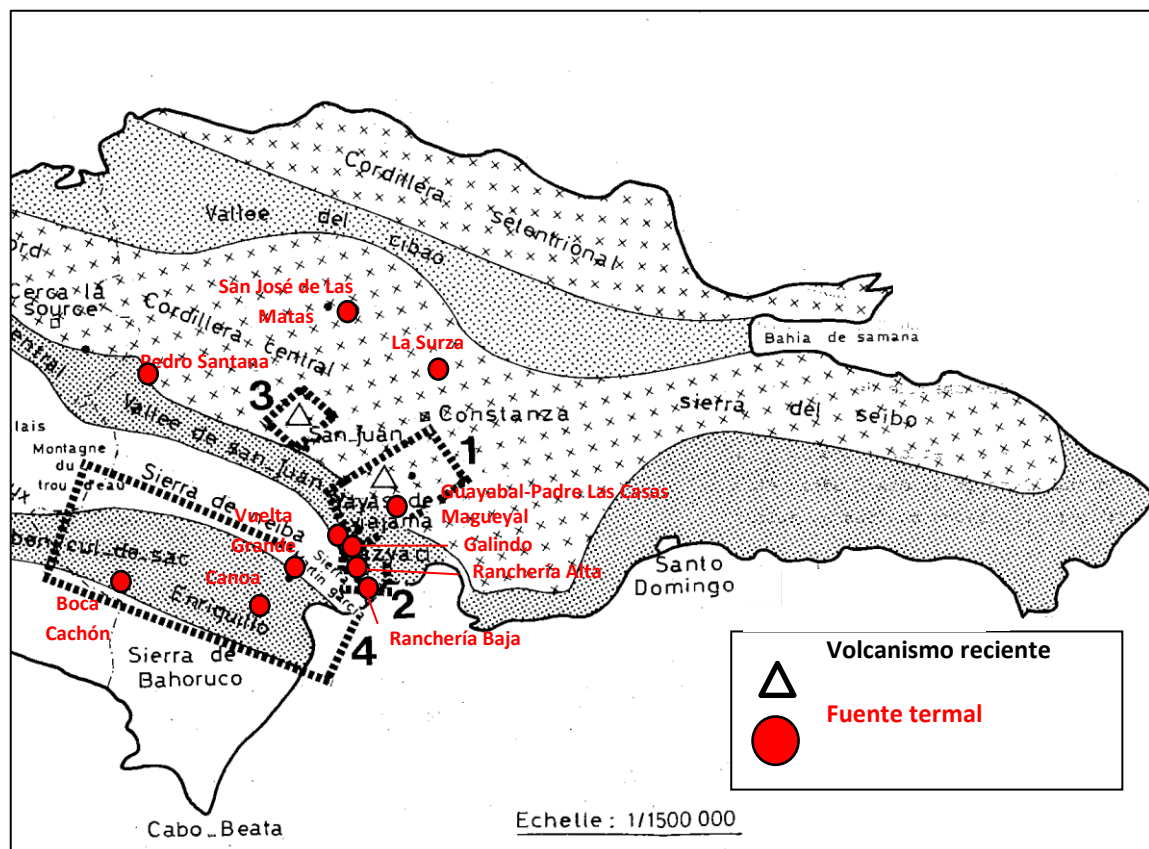


Figura 1 - Zonas de interés geotérmico en la República Dominicana (Varet, 1980), antes de este estudio.

Zona 1: zona volcánica de Yayas - Constanza - Valle Nuevo, considerada como de interés prioritario para la generación de electricidad por el BRGM, en 1980, y ELC, en 1984; zona 2: región termal de Azua considerada como de interés únicamente para la geotermia de mediana y baja entalpía; zona 3: zona volcánica considerada de interés secundario para la generación de electricidad; zona 4: Graben de Enriquillo, considerado como zona de interés únicamente para la geotermia de mediana y baja entalpía. Entre este Graben y la zona de Azua, se encuentra el área de la fuente termal de Canoa, que fue también considerada por el BRGM, en 1980, como zona de interés secundario para la generación de electricidad.

Otro trabajo importante fue el estudio de pre-factibilidad relativo a este eje volcánico, realizado en 1983, dentro del marco de un programa de cooperación técnica entre los gobiernos de la República Dominicana y de Italia. Este estudio fue ejecutado en estrecha colaboración entre la Dirección General de Minería (DGM) de la República Dominicana y la firma consultora ELC-ELECTROCONSULT S.P.A. de Milán, Italia (ELC, 1984). Tenía como objetivo principal aclarar el arreglo geológico del área, verificar la existencia de las condiciones básicas necesarias para la formación de sistemas geotérmicos, seleccionar zonas de interés prioritario y proponer, en caso de resultados alentadores, un programa de actividades adicionales, el cual incluía la ubicación de pozos exploratorios profundos. Las investigaciones geo-científicas realizadas durante este estudio confirmaron el interés geotérmico del área Yayas de Viajama - Constanza. Toda la faja que se extiende entre el pueblo de Yayas al SO y el pueblo de Constanza al NE está caracterizada por una ancha anomalía térmica, reflejada en superficie por difundidas manifestaciones volcánicas de edad Plio-Cuaternaria y por manantiales termales. La fase de exploración regional, llevada a cabo sobre una superficie de 3 500 km², ha revelado una clara migración del volcanismo en sentido NE, donde productos lávicos han sido fechados a 0,3 Ma. En esta misma dirección, se han observado las máximas concentraciones en el suelo de mercurio y radón, elementos de fuga indicadores de permeabilidad vertical y actividad geotérmica en el subsuelo.

En base a estas consideraciones, la zona de Constanza - Valle Nuevo, que cubre la extremidad NE del eje neo-volcánico con una superficie de 140 km², fue seleccionada como zona prioritaria y fue objeto de exploración detallada así como de un modelo geotérmico preliminar. La falta de pronunciadas anomalías geo-eléctricas y la escasez de emergencias y evidencias termales en superficie sugirieron que el sistema geotérmico principal se encontraba a una profundidad elevada, probablemente superior a los 1 500 m.

Uno de los dos sondeos de gradiente térmico recomendados por este estudio, en aquella área, fue sufragado en 1984 por la DGM, y acabado en Junio de 1986. Se había planeado una profundidad de alrededor de 400 m, pero sólo unos 200 m pudieron ser perforados. Las investigaciones se abandonaron ya que en ese sondeo sólo se alcanzaron temperaturas del agua de 34°C, estimándose que la temperatura del reservorio profundo no superaría los 70-80°C, lo cual se consideró insuficiente para continuar las investigaciones (SGN, 2000).

1.2 MARCO DEL ESTUDIO Y OBJETIVOS

Después de varios intercambios entre el MEM, el Servicio Geológico Nacional (SGN) de la República Dominicana y el BRGM, se le pidió a este último que preparara una propuesta acerca de cuáles deberían ser los primeros pasos a dar (y el costo correspondiente) para volver a iniciar el desarrollo de la geotermia en la República Dominicana.

Esta propuesta que fue aceptada constituye el estudio presente de “Evaluación del potencial geotérmico de República Dominicana”, financiado por el Banco Inter-Americano de Desarrollo (BID), bajo el contrato # CID-0001.16-00-C. Este estudio cuya duración es de 15 meses (Junio 2016 - Agosto 2017) ha sido efectuado con la estrecha colaboración del MEM y del SGN de la República Dominicana.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos hasta ahora y las recomendaciones dadas en los informes de 1980 (Varet, 1980) y en 1984 (ELC, 1984), el BRGM propuso llevar a cabo un proyecto con diferentes etapas, como se suele hacer clásicamente en geotermia (fig. 2 y tabl. 1). Al final de cada etapa, se decide que continuación se le da al proyecto (GO/NO GO).

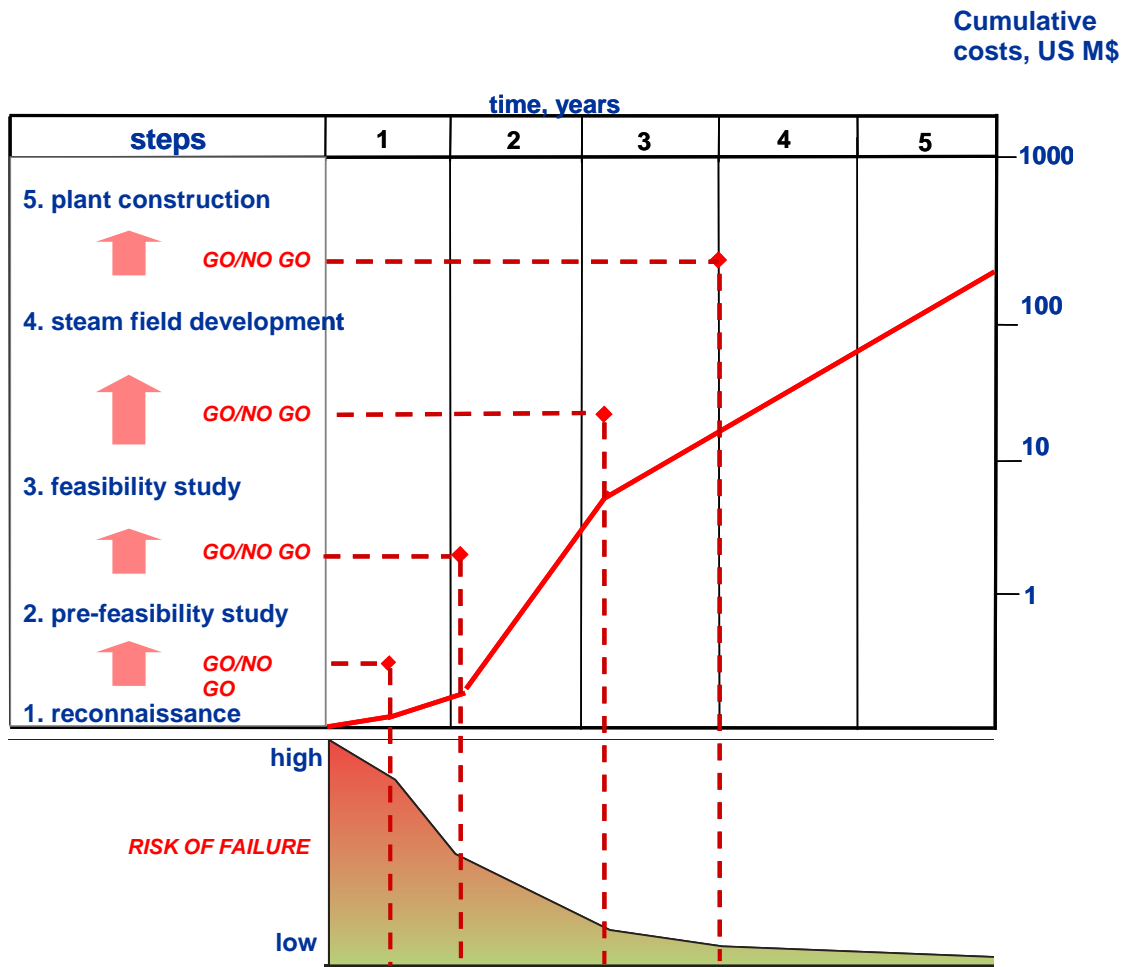


Figura 2 - Riesgos asociados a las diferentes etapas de un proyecto clásico de geotermia de alta energía (fuente: Sinclair, Knight & Merz).

Uno de los objetivos principales de esta primera etapa es el de saber con más certeza si existe una posibilidad en la República Dominicana de hacer geotermia de alta energía para producir electricidad en las zonas definidas como prioritarias en 1980 y en 1984. Otro objetivo es el de mejor definir las zonas potencialmente favorables a la geotermia de baja y mediana energía.

La primera etapa incluye:

- un estudio bibliográfico de los trabajos existentes (Sanjuan *et al.*, 2017a);
- un estudio de reconocimiento geotérmico de campo con trabajos en geología y en geoquímica (Sanjuan *et al.*, 2017b);
- un estudio de pre-factibilidad técnico económico (Bourdon y Tournaye, 2017);
- un documento final de síntesis para discutir con el MEM y dar recomendaciones para la continuación del estudio.

Después de haber realizado los tres primeros estudios, este informe presenta las conclusiones de la primera etapa y hace proposiciones para la continuación del proyecto.

Fase	Objetivos	Trabajos	Duración	Costo aproximativo (referencias mundiales)
1 - Reconocimiento preliminar	Identificar y seleccionar zonas favorables	Estudios de superficie (geología, geoquímica de los fluidos)	unos meses	de 100 a 300 k€
2 - Estudio de pre-factibilidad	Confirmar la existencia o no de un yacimiento geotérmico de alta energía y elaborar un modelo preliminar de campo Evaluar la pre-factibilidad técnico-económica de un proyecto de desarrollo	Estudios de superficie (geología, geoquímica de los fluidos, geofísica) Orientación técnico-económica preliminar	1 año	de 400 k€ a 1 M€
3 - Estudio de factibilidad	Evaluar la calidad del recurso y la capacidad del reservorio Confirmar la factibilidad técnico-económica de un proyecto de desarrollo	3-4 pozos de gradiente térmico 3-4 pozos de exploración profundos (1000 m) incluyendo una fase preliminar de ingeniería Evaluación técnico-económica	1 a 2 años	0.5 a 0.8 M€ (pozos de gradiente térmico) 7 a 10 M€ (pozos de exploración)
4 - Ingeniería del proyecto de desarrollo	Concebir y cifrar el costo de la puesta en explotación del recurso geotérmico Concebir y cifrar el costo de la construcción de la central Elaborar el Plan financiero del proyecto	Ingeniería especializada en el sub-suelo Ingeniería especializada en centrales e ingeniería financiera	1 a 2 años	10-20% del costo del proyecto
5 - Desarrollo del campo	Foración de los pozos de producción y de reinyección, ensayos de producción <i>(por ejemplo, 6-8 pozos de producción-reinyección para una capacidad de producción de 20 MWe)</i>		1 a 2 años	(~ 25 M€)
6 - Construcción de la central	Construcción de la central y del sistema de transporte de los fluidos		2 años	1.5 a 2.5 k€/kW instalado
7 - Explotación				

Tabla 1 - Las etapas clásicas de un proyecto de desarrollo de un recurso geotérmico de alta energía para la producción de electricidad (duraciones y costos estimativos).

2. Resultados científicos obtenidos y aplicaciones

Después de haber llevado a cabo el estudio bibliográfico de los datos existentes, los trabajos de reconocimiento geotérmico de campo en geología y en hidro-geoquímica, efectuados en estrecha colaboración con el SGN, han permitido de muestrear el agua y los gases asociados de la mayoría de las fuentes termales conocidas en la República Dominicana (unas veinte fuentes; fig. 3) y obtener datos geológicos de las áreas de estas fuentes para mejorar el conocimiento de los sistemas geotérmicos profundos correspondientes.

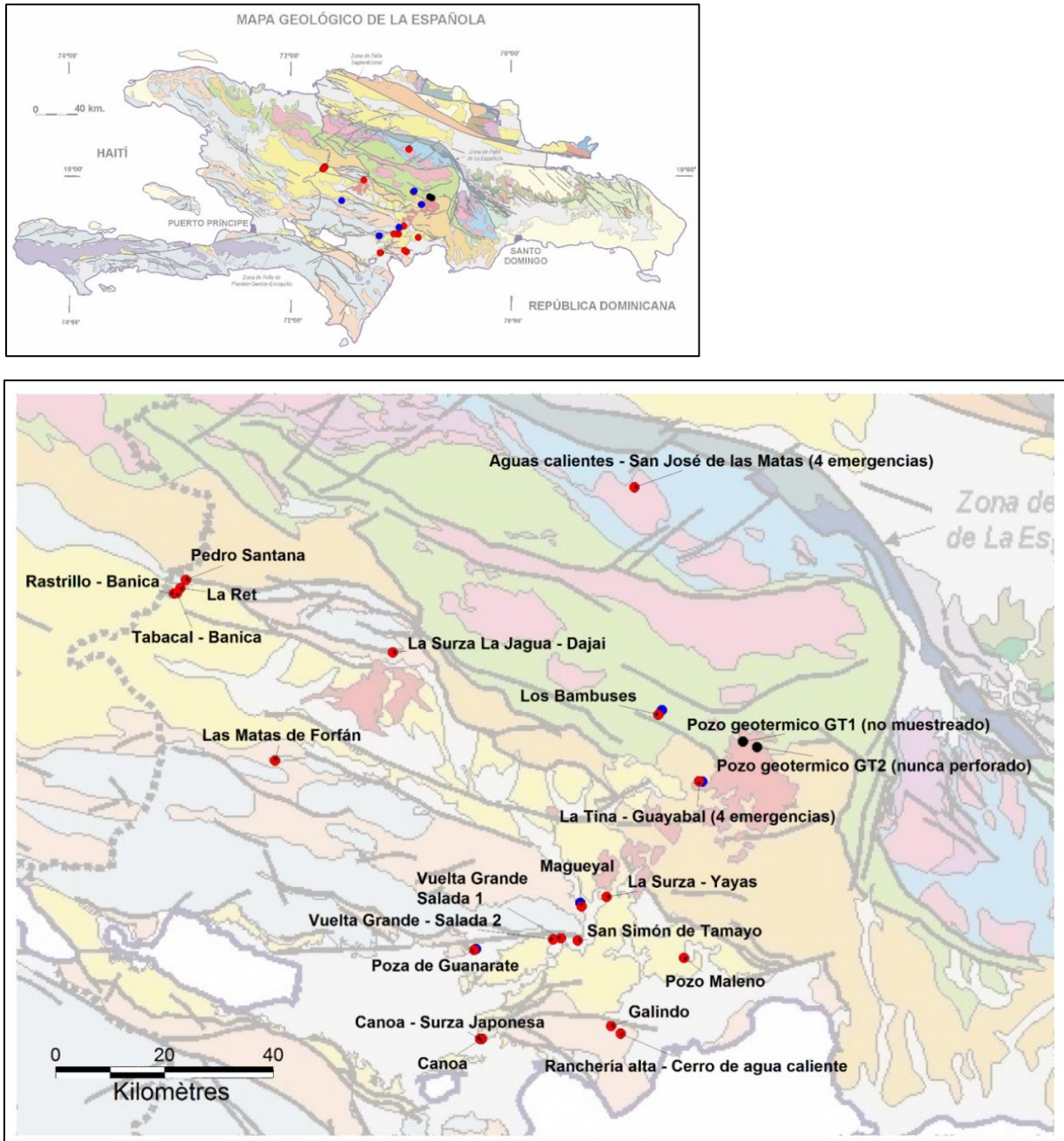


Figura 3 - Localización de las fuentes termales estudiadas en el mapa geológico de la República Dominicana (Sanjuan et al., 2017b).

2.1 MODELOS CONCEPTUALES

Con el estudio de reconocimiento geotérmico de campo en geología y en hidro-geoquímica (Sanjuan *et al.*, 2017b), se concluyó que la temperatura profunda máxima estimada para las aguas termales de las zonas del sector Yayas de Viajama - Constanza - Valle Nuevo es de $90 \pm 20^\circ\text{C}$ en el área de Guayabal y de $80 \pm 20^\circ\text{C}$ en el área de Magueyal, San Simón de Tamayo y Vuelta Grande (tabl. 2). Se pudieron hacer los primeros modelos conceptuales de estas zonas con todos los conocimientos adquiridos desde los años 80, así como el de la zona de Canoa, que indica valores de temperatura profunda de $75 \pm 20^\circ\text{C}$. Estos modelos conceptuales son los que presentaremos a continuación.

Para las otras aguas termales como las de Ranchería Alta, Galindo, Aguas Calientes de San José de las Matas, Los Bambuses y Pedro Santana, las temperaturas profundas estimadas son inferiores a 70°C (Sanjuan *et al.*, 2017b), y no parece haber signo de magmatismo profundo que pueda indicar anomalías térmicas con comparación con un gradiente térmico normal, ni de una presencia de un sistema hidrotermal actual importante. Para obtener más detalles sobre estas áreas termales en geología e hidro-geoquímica, se pueden consultar el primer y segundo informe de este estudio (Sanjuan *et al.*, 2017a; b).

Nombre del punto de agua	Número	Fecha de la muestra	T _{medida} °C	T _{Cz} °C	T _{Calced.} °C	T _{Na-K (1)} °C	T _{Na-K (2)} °C	T _{Na-K-Ca (β=4/3)} °C	T _{Na-K-Ca-Mg} °C	T _{K-Mg} °C
La Tina - Guayabal	Y16 - 58	06/12/2016	35.7	77-109	43-78	264	268	218	166	145
Magueyal	Y1 - 57	07/12/2016	39.2	80-111	46-80	156	182	162	44	94
San Simón de Tamayo	Y5	08/12/2016	44.9	115-137	85-109	178	201	141	62	92
Vuelta Grande - Salada 1	64 ?	08/12/2016	25.2	128	99	166	191	176	25	95
Canoa	56	11/12/2016	41.5	95-121	63-91	126	156	133	46	81
Ranchería Alta - Cerro de agua caliente	60	12/12/2016	43.6	86	53	179	201	88	43	64
Galindo	59	12/12/2016	34.8	88	56	180	202	77	39	58
Pozo Maleno		12/12/2016	28.8	101	69	1305	803	45		80
Aguas calientes 1 - San José de las Matas	54	15/12/2016	37.0	96	64	57	95	32	90	60
Los Bambuses	C12 ?	13/12/2016	26.5	74	40	48	86	47		55
Poza de Guanarate		11/12/2016	27.1	96	64	101	135	45	44	36
La Surza La Jagua - Dajai		09/02/2016	28.5	58	23	122	154	37		39
Las Matas de Farfán		10/12/2016	26.1	55	21	182	204	14		33
Tabacal - Banica		10/12/2016	26.8	84	51	40	79	32	50	24
Pedro Santana	66 ?	10/12/2016	26.1	48	14	170	194	20		40
La Ret		10/12/2016	25.3	60	26	118	150	27		31

Nombre del punto de agua	T _{Na-Li} °C	T _{Mg-Li} °C	T _{Na-Rb} °C	T _{Na-Cs} °C	T _{K-Sr} °C	T _{K-Fe} °C	T _{K-Mn} °C	T _{KF} °C	T _{KW} °C	T ¹⁸ O _{H2O-SO4 (1)} °C	T ¹⁸ O _{H2O-SO4 (2)} °C	T ¹⁸ O _{H2O-SO4 (3)} °C	T _{CO2-CH4} °C	T _{estimada} °C
La Tina - Guayabal	78	96	128	84	283	242	169	113	260	136	111	88	110	90 ± 20
Magueyal	67	73	80	65	120	339	206	164	127	243	191	162	212	80 ± 20
San Simón de Tamayo	53	58	71	47	127	316	192	151	101	120	98	76		80 ± 20
Vuelta Grande - Salada 1	49	62	66	18	163	449	187	294	136	108	89	67		80 ± 20
Canoa	24	48	55	41	80	250	134	127	92	137	112	89		75 ± 20
Ranchería Alta - Cerro de agua caliente	62	38	80	62	60	154	146	145	45	109	89	68	274	65 ± 20
Galindo	54	30	78	27	51	141	89	134	40	110	90	69		65 ± 20
Pozo Maleno	223	32	225	136	84	87	62	103	68	107	88	66		65 ± 20
Aguas calientes 1 - San José de las Matas	-18	27	45	29	54	52	65	32	36	169	137	112		60 ± 20
Los Bambuses	25	51	36	17	46	103	123	45	71	146	119	95		50 ± 20
Poza de Guanarate	10	10	24	26	29	384	4	91	17	131	107	85		40 ± 15
La Surza La Jagua - Dajai	35	18	58	44	34	81	70	50	13	122	100	78		40 ± 15
Las Matas de Farfán	41	4	69	21	16	52	32	32	-1	102	83	62		40 ± 15
Tabacal - Banica	-29	-4	-26	22	26	58	-7	35	1	95	77	57		40 ± 15
Pedro Santana	10	0	48	48	51	69	94	12	7	173	139	114		35 ± 10
La Ret										565	369	327		35 ± 10

T_{Cz}, T_{Calced.}: Fournier (1977).

T_{Na-K (1)}: Michard (1979); T_{Na-K (2)}: Fournier (1979).

T_{Na-K-Ca}: Fournier and Truesdell (1973).

T_{Na-K-Ca-Mg}: Fournier and Potter (1979).

T_{K-Mg}: Giggenbach (1988).

T_{Na-Li}: Fouillac and Michard (1981).

T_{Mg-Li}: Kharaka *et al.* (1982).

T_{Na-Rb}, T_{Na-Cs}, T_{K-Sr}, T_{K-Fe}, T_{K-Mn}, T_{KF}: Michard (1990).

T¹⁸O_{H2O-SO4 (1)}: Mizutani and Rafter (1969); T¹⁸O_{H2O-SO4 (2)}: Kusakabe and Robinson (1977); T¹⁸O_{H2O-SO4 (3)}: Zeebe (2010)

T_{CO2-CH4}: Marini (1987).

Tabla 2 - Valores de temperatura estimados a partir de los geotermómetros químicos e isotópicos aplicados a las aguas termales de este estudio (Sanjuan *et al.*, 2017b).

2.1.1 Modelo conceptual del sistema geotérmico del área La Tina - Guayabal

El sistema geotérmico de Guayabal está compuesto por: (1) expresiones conocidas en la superficie, (2) un reservorio profundo en el cual los geotermómetros del agua y de los gases nos pueden informar sobre sus condiciones de temperatura y (3) potencialmente una formación desempeñando la función de cap-rock susceptible de colmatar el reservorio permeable y de limitar, de este modo, las fugas de fluidos hacia la superficie. El esquema de la figura 4 ilustra el modelo conceptual propuesto.

a) Fugas del sistema geotérmico hacia la superficie

Las expresiones superficiales de la fuente de Guayabal están constituidas por cuatro emergencias de agua termal de tipo NaCl, con una temperatura de 35.7°C, un pH de 6.17 y una salinidad de 6.5 g/l, acompañadas por gases no condensables, predominados por el CO₂, que es muy probablemente de origen magmático, como lo sugiere su valor isotópico de $\delta^{13}\text{C}$ (-6.5‰ en este estudio y -7.4‰, en 1980). El valor de presión de CO₂ (P_{CO_2}) estimado a las emergencias de esta fuente, utilizando el código numérico EQ3NR (Wolery, 1995), es de 2.1 - 5.2 atm. Se puede destacar la ausencia de H₂S. La predominancia de CO₂ en estos gases sugiere una edad relativamente avanzada del magmatismo, como lo indican también las dataciones que fueron efectuadas alrededor de la zona de Guayabal.

Estos fluidos (agua termal y gases no condensables) están asociados con travertinos de calcita de color beige, así como un travertino fósil blanco, constituido por 100% de calcita, que han probablemente precipitado durante la desgasificación de CO₂ del agua termal a su llegada a la superficie. Las emergencias de estas fuentes, con un caudal acumulado de aproximadamente 10 l/s, forman un alineamiento de unos treinta metros al pie de pendiente del valle del arroyo Guayabal. Los depósitos que precipitan en las emergencias de la fuente están placados en los conglomerados del cono de deyección antiguo. Estos travertinos recientes a actuales están presentes sobre aproximadamente 3 m de altura, a partir de las emergencias activas, lo que sugiere que el sistema geotérmico funciona desde cierto tiempo, mientras que el arroyo excava progresivamente su lecho en el valle: de este modo, las llegadas de agua carbonatada se han escalonado sucesivamente de arriba hacia abajo de la pendiente.

Al nivel de las emergencias de la fuente termal, la presencia del conglomerado impide determinar la naturaleza precisa de la masa rocosa de la cual emerge el agua termal, pero es probable que el agua brote desde el contacto tectónico entre las calizas y las lutitas. Según la hoja geológica de Padre Las Casas al 1:50 000, este contacto tectónico corresponde a un cabalgamiento NO-SE, con buzamiento moderado hacia el norte, indicando un movimiento inverso a la vergencia hacia el SO (Sanjuan *et al.*, 2016b).

b) Recarga del sistema

Sólo el valor isotópico de δD del agua termal de esta fuente (-27.1‰), muy parecido al del agua del arroyo de Guayabal (-26.2‰), permite indicar que estas dos aguas deben de compartir una zona de recarga similar, probablemente localizada en la Cordillera Central, donde nace este arroyo. Incluso, una gran parte del agua de la fuente termal podría ser aportada por este arroyo. Sin embargo, la pequeña diferencia de valor de δD , ligeramente superior a la incertidumbre analítica ($\pm 0.8\%$), podría también indicar otra zona de recarga para el agua de la fuente termal (colada de Loma de Castillo, al sur de Guayabal?). Los valores de las relaciones Br/Cl y Na/Cl del agua termal, parecidos a los del agua del mar, sugieren también una pequeña contribución de agua de mar residual ($\approx 13\%$), durante la infiltración y la circulación profunda del agua superficial de origen meteórico, que constituye, en gran parte ($\approx 87\%$), el agua termal de la fuente de Guayabal.

Esta contribución marina puede explicar los valores de concentración de Cl, Na y Br relativamente elevados del agua termal, comparados con los de un agua de origen meteórico en contacto con únicamente rocas volcánicas, como lo veremos más adelante.

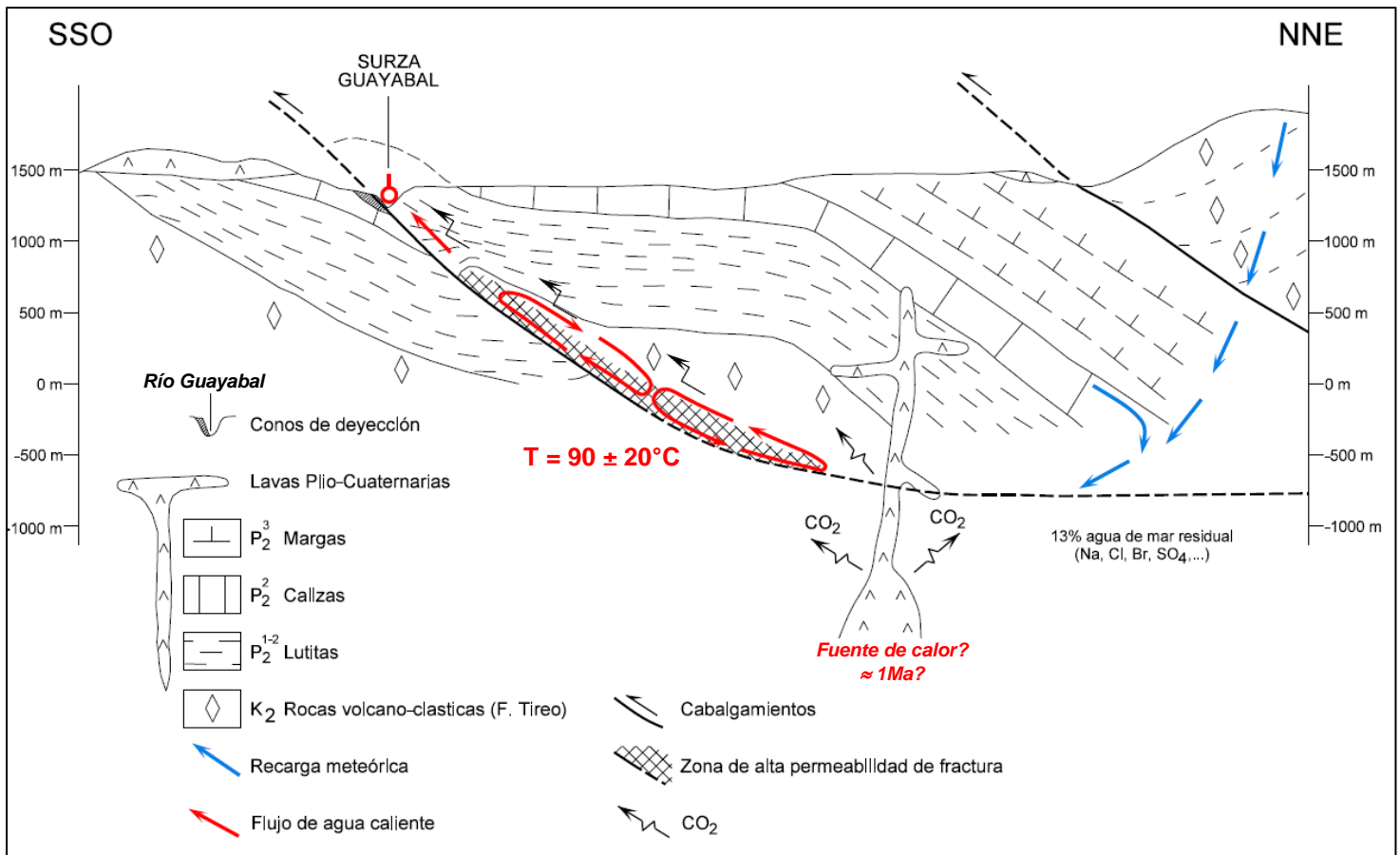


Figura 4 - Modelo conceptual del funcionamiento del sistema geotérmico de Guayabal (Sanjuan et al., 2017b).

c) Reservoirio geotérmico

Basado sobre nuestro conocimiento de la pila litológica, se sugiere que el reservorio geotermal en relación con la fuente de Guayabal esté localizado en la formación Cretácica Tíreo 1K2, que constituye el basamento (fig. 4). La formación Tíreo está compuesta por formaciones volcánicas de arco (coladas, aparatos, volcánico-sedimentos) que son, en su base, más bien básicas (basalto con olivino, andesita...), y luego hacia el techo, más diferenciadas (riolitas, dacitas,...). Los valores isotópicos de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (0.705552), y de $\delta^7\text{Li}$ (5.5‰) y $\delta^{11}\text{B}$ (6.61‰), unos de los más bajos medidos en las aguas termales de este estudio, similares a los de aguas en contacto con rocas volcánicas (basaltos, andesitas, etc.), parecen confirmar esta pertenencia del agua termal de Guayabal.

Sin embargo, el valor de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, ligeramente más alto que el de un agua en contacto con este tipo de rocas volcánicas (0.703-0.704) y cálculos de mezcla relativos a esta relación, que fueron efectuados para este estudio, sugieren la existencia de un proceso de mezcla entre aguas de un reservorio volcánico y de un reservorio carbonatado (que podría ser parecido al de Magueyal o de San Simón), con una muy pequeña contribución de agua proveniente del reservorio carbonatado (2% en el caso de Magueyal, y algo superior para San Simón).

Según la hoja geológica al 1:50 000, la formación Tireo está compuesta principalmente por rocas volcano-clásticas con grano fino a medio y metamorfoseada en la facies de esquito verde. Estas rocas volcánicas, cuya permeabilidad matricial es muy baja, son susceptibles de ser permeables por efecto de la fracturación (permeabilidad de fractura). De este modo:

- en la superficie, las emergencias de la fuente de Guayabal parecen estar localizadas al nivel de un cabalgamiento NO-SE, que pone en contacto anormal lutitas con calizas (fig. 4);
- en profundidad, la permeabilidad del reservorio resultaría, de hecho, de la cataclasis de los esquites de la formación Tireo, debido al cabalgamiento NO-SE, que se hunde hacia el NE y superpone las series. Según la figura 4, el reservorio volcánico fracturado estaría situado a más de 500 m de profundidad y dibuja una bóveda anticlinal fallada (trampa), rodeada de lutitas de la formación Ventura, de edad Eoceno Inferior a Medio. Estas lutitas, reputadas impermeables, desempeñarían la función de cap-rock del sistema geotérmico (fig. 4), colmatando el reservorio de volcanitas fracturadas por el cabalgamiento (formación Tireo).

Según algunos geotermómetros químicos e isotópicos aplicados al agua termal (tabl. 2) y los resultados de la modelización geoquímica efectuada con el código numérico EQ3/6 (Sanjuan *et al.*, 2016b), la temperatura alcanzada en el reservorio fracturado profundo podría ser de $90 \pm 20^\circ\text{C}$, sin que el agua de este reservorio esté en equilibrio químico total con las rocas que lo constituyen (sólo existen equilibrios químicos parciales, a este nivel moderado de temperatura). Así, por ejemplo, la relación Na-K no está controlada por ningún equilibrio químico (como entre los feldspatos sódicos, tipo albita, y potásicos, tipo microclino), lo que explica porque el geotermómetro que utiliza esta relación da valores de temperatura irrealistas y muy superiores a la realidad (estudios del BRGM, en 1980, y de ELECTROCONSULT, en 1984).

En términos de profundidad, según el corte geológico propuesto, el techo de la formación volcánica Tireo del Cretáceo está alcanzado a algo más de 500 m de profundidad, por encima de una bóveda anticlinal. Si suponemos la existencia de un gradiente térmico más o menos normal en la zona de Guayabal ($\approx 30^\circ\text{C}/\text{km}$), la temperatura estimada para el agua profunda del reservorio geotérmico implica que este último esté localizado entre alrededor de 1 500 y 2 500 m, en el seno de las volcanitas básicas fracturadas.

Si estimamos que pueda existir una ligera anomalía térmica local debida, por ejemplo, a la presencia de CO_2 magmático un poco recalentado, que provendría de un magma en estado avanzado de enfriamiento, este reservorio podría tener una localización algo menos profunda. Sin embargo, lo importante es que el techo de la formación Tireo esté sólo a unos 500 m de la superficie, lo que tendrá que ser no obstante verificado.

d) Motor térmico del sistema geotérmico

Una fuente de calor podría ser la existencia de aparatos magmáticos traquiandesíticos, bien desarrollados en las cercanías de Guayabal. Sin embargo, debido a la edad estimada, cerca de 1 Ma, para este volcanismo Cuaternario, se supone que la cámara magmática, controlada parcialmente por fallas NO-SE, debería de estar, en gran parte, resfriada y que el sistema geotérmico asociado a este aparato se encuentre en fin de vida... La temperatura moderada estimada para el reservorio geotérmico de Guayabal parece estar en acuerdo con estos datos.

En resumen, se propone el modelo conceptual siguiente (fig. 4): el sistema geotérmico de Guayabal se limita a cuatro emergencias de agua de una fuente termal, acompañada por CO₂ de origen magmático, que corresponden a fugas de fluidos de un reservorio geotérmico poco profundo (de 500 a 2 500 m), a lo largo de un plano de cabalgamiento NO-SE, con buzamiento NE.

Este reservorio es la sede de convección de agua caliente, que alcanza valores de temperaturas de $90 \pm 20^{\circ}\text{C}$, a profundidades $\leq 2\ 500$ m, según el gradiente térmico de temperatura local que se considere. Esta agua caliente está almacenada en volcanitas fracturadas, dominadas por materiales básicos, que forman una bóveda anticlinal fallada y controlada por el cabalgamiento NO-SE. La espesa serie de lutitas impermeables desempeña entonces la función de cap-rock del sistema geotérmico.

El emplazamiento de la fuente termal de Guayabal se sitúa en un lugar de encuentro entre:

- aguas de origen meteórico, que se infiltran en el subsuelo y siguen un recorrido subterráneo que puede ser bastante profundo y complejo, con posibilidades de mezcla con otras aguas residuales (de origen marino, por ejemplo);
- pequeñas cámaras magmáticas de aparatos traquiandesíticos, en curso de enfriamiento desde hace más o menos 1 Ma.

2.1.2 Modelo conceptual del sistema geotérmico de Magueyal, San Simón de Tamayo y Vuelta Grande

a) Fugas del sistema geotérmico hacia la superficie

Las temperaturas de emergencia son 39.2°C para la fuente de Magueyal, 44.9°C para la de San Simón y 25.2°C para la de Vuelta Grande. Los valores de pH y de salinidad respectivos son 5.27, 6.64, 7.70, así como 6.5, 5.1 y 13.2 g/l.

Las fuentes emergen desde un calcáreo karstificado de edad Mioceno Inferior para San Simón, y Mioceno Superior para Magueyal, con presencia de emanaciones de H₂S y de CO₂ para esta última fuente, mientras que para Vuelta Grande, el agua termal, muy mineralizada, circula sobre lutitas a proximidad inmediata de antiguos travertinos muy desarrollados. Los valores de P_{CO₂} estimados a las emergencias de estas fuentes utilizando el código numérico EQ3NR (Wolery, 1995) son respectivamente 6.5 atm, 0.1 - 0.8 atm y 0.01 atm. Estos valores son muy superiores a la P_{CO₂} de la atmosfera ($3.9 \cdot 10^{-4}$ atm). Excepto la presencia de H₂S a altura de 2.8% y de CH₄ a 0.7%, la composición química de los gases asociados con la fuente de Magueyal, efectuada en 1979 (Iundt, 1980), es parecida a la de los gases de la fuente de Guayabal. Predomina la presencia de CO₂ (92.7 %). Como para la fuente de Guayabal, su valor de $\delta^{13}\text{C}$ (-7.6‰) sugiere también un origen magmático predominante del CO₂. El valor de $\delta^{34}\text{S}$ medido en el H₂S disuelto en el agua de Magueyal (16.5‰) no sugiere un origen magmático de este gas.

En las emergencias de las fuentes de San Simón y Vuelta Grande, no se observan escapes de gases. Sin embargo, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ del agua de San Simón (1.6‰), parecido al del agua termal de Magueyal (2.5‰) y tampoco muy alejado del agua de Guayabal (4.0‰), sugiere también un origen magmático predominante del CO₂ asociado con esta fuente. En cuanto a la fuente de Vuelta Grande, el valor de $\delta^{13}\text{C}$ de su agua (-7.5‰) hace pensar más bien a un origen orgánico predominante del CO₂ asociado, lo que parece estar en acuerdo con el valor mucho más bajo estimado para la P_{CO₂}, comparado con el de las tres otras fuentes.

b) Recarga del sistema

Los valores de δD medidos en las aguas termales de Magueyal (-21.6‰), San Simón (-18.0‰) y Vuelta Grande (-17.4‰) siendo bastante cercanos del que ha sido medido para el agua del río Yaqué del Sur (-19.5‰), sugieren que estas aguas comparten, de manera importante, una zona de recarga común. Incluso el río Yaqué del Sur, que proviene de la Cordillera Central, y que pasa muy cerca de estas fuentes, podría alimentar en agua, en gran parte, estas fuentes.

Sin embargo, hay pequeñas diferencias de valores, superiores a la incertidumbre analítica ($\pm 0.8‰$), que sugieren otras contribuciones de aguas para las tres fuentes. Por ejemplo, para las aguas de Magueyal y de San Simón, como lo vimos para el agua de Guayabal, los valores de las relaciones Br/Cl y Na/Cl, parecidos a los valores marinos, necesitan incluir también una pequeña contribución de agua de mar residual ($\approx 15\%$ para Magueyal y $\approx 10\%$ para San Simón) para explicar las concentraciones elevadas de estos elementos químicos.

El agua de Vuelta Grande no parece seguir las relaciones marinas Br/Cl y Na/Cl, con un enriquecimiento en Br relativo al Cl y un empobrecimiento en Na relativo al Cl. Sin embargo, siendo el agua más mineralizada de todas las aguas termales estudiadas en este estudio (TDS ≈ 13 g/l), se puede pensar que haya una contribución de agua de origen marino evaporítico y/o de agua que disuelve evaporitas. No se puede tampoco descartar la contribución en agua de otras zonas de recarga para estas tres aguas.

c) Motor térmico del sistema geotérmico

La presencia cercana de algunas cámaras magmáticas de más de 2 Ma, en curso de enfriamiento, no constituye una fuente de calor de este sistema geotérmico, mismo si se pueden observar escapes de CO_2 de origen magmático predominante para las fuentes de Magueyal y San Simón.

d) Reservorio geotérmico

En todos los casos, las tres fuentes termales parecen estar controladas por dos cabalgamientos sucesivos ESE-ONO a NO-SE, que están separados aproximadamente de 7 km de distancia (fig. 5). Estos dos cabalgamientos, que superponen parcialmente las series sedimentarias del Mioceno, permiten la subida de las aguas termales hasta la superficie, ya sea en el techo del cabalgamiento (San Simón), o en su muro (Magueyal y Vuelta Grande). A la escala más regional, el corte NO-SE realizado a partir de los cortes al 1:50 000 de Villarpando al oeste, y de Yayas de Viajama al este, sugiere que las aguas termales han podido circular a lo largo de un mega-plano cabalgante sub-horizontal llamado "cabalgamiento basal", situado aproximadamente a 2 km de profundidad, poniendo en conexión los cabalgamientos más rectos NO-SE, resultando de la tectónica compresiva NO-SE (fig. 5).

En profundidad, algunos geotermómetros químicos e isotópicos aplicados a estas aguas termales (tabl. 2), así como los resultados de la modelización geoquímica efectuada con el código numérico EQ3/6 (Wolery, 1995), indican estimaciones de temperatura del reservorio geotérmico similares, alrededor de $80 \pm 20^\circ C$. Como para el agua termal de Guayabal, vemos que las aguas del reservorio no están en equilibrio químico total con las rocas que lo constituyen (sólo existen equilibrios químicos parciales, a este nivel moderado de temperatura). Así, por ejemplo, la relación Na-K no está controlada por ningún equilibrio químico (como entre los feldspatos sódicos, tipo albita, y potásicos, tipo microclino), lo que explica porque el geotermómetro que utiliza esta relación da valores de temperatura irrealistas y muy superiores a la realidad (estudios del BRGM, en 1980, y de ELC, en 1984; tabl. 2).

El cabalgamiento basal, marcado por una permeabilidad de fractura actual (fig. 5), podría constituir un reservorio en el cual estos valores de temperatura se alcanzarían, si se tiene en cuenta un gradiente térmico más o menos normal, alrededor de 30°C/km.

En términos de composición, el reservorio sería de origen carbonatado en los tres casos, en relación con la base de la espesa formación calcárea de edad Mioceno Inferior a Paleógeno Superior (formación Neiba, según la hoja geológica de Villarpando al 1:50 000), que viene ponerse por encima del cabalgamiento basal, hacia 2 km de profundidad (fig. 5). Los valores isotópicos de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ medidos en las tres aguas termales confirman este origen carbonatado del reservorio.

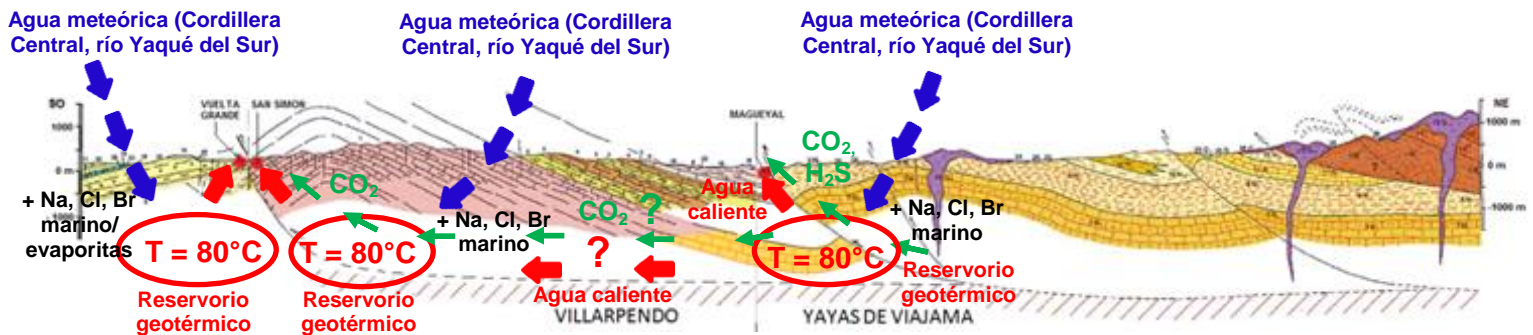


Figura 5 - Modelo conceptual del funcionamiento del sistema geotérmico de Magueyal, San Simón y Vuelta Grande (Sanjuan et al., 2017b).

La figura 6 presenta un corte regional SSO - NNE pasando por las 4 fuentes termales de Guayabal, Magueyal, San Simón y Vuelta Grande ilustrando el contexto geológico de cabalgamiento regional.

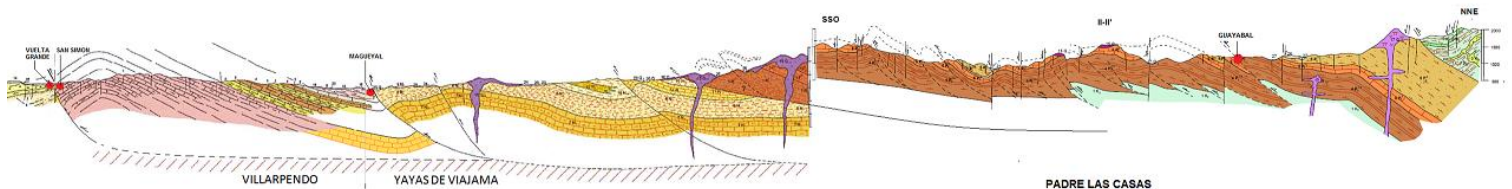


Figura 6 - Corte regional SSO-NNE pasando por las 4 fuentes termales de Guayabal, Magueyal, San Simón y Vuelta Grande (Sanjuan et al., 2017b).

2.1.3 Modelo conceptual del sistema geotérmico de Canoa

a) Fugas del sistema geotérmico hacia la superficie

Las dos emergencias de la fuente termal de Canoa brotan desde el pie de una colina explotada, en parte, por su carbonato, con emanaciones de CO₂ y de H₂S, difícilmente identificables a la vista (pocas burbujas), pero olorosas.

Las temperaturas medidas a las emergencias de esta fuente durante la campaña de terreno de este estudio fueron 41.5°C (Canoa 1) y 38.5°C (Canoa 2). Los valores de pH respectivos fueron 5.45 y 5.99, y la salinidad de estas aguas es parecida (\approx 4.3 g/l). El valor de P_{CO2} estimado para la primera emergencia utilizando el código numérico EQ3NR (Wolery, 1995) fue de 2.3 atm. El valor de $\delta^{13}\text{C}$ determinado por el BRGM en 1980 (-6.9‰) para el CO₂ asociado con esta fuente y el valor de $\delta^{13}\text{C}$ medido en el agua para este estudio (2.6‰) sugieren un origen predominantemente magmático del CO₂. El valor de $\delta^{34}\text{S}_{\text{H}_2\text{S}}$ (3.5‰) parece también indicar un origen magmático predominante para las emanaciones de H₂S.

b) Recarga del sistema

El valor de δD medido en el agua termal de Canoa (-31.0‰) está cercano del de la muestra de la "Poza de Guanarate" (-29.6‰), punto de agua relativamente superficial, que no está muy lejos de esta fuente (fig. 3). Estos dos puntos podrían compartir una zona de recarga común. Sin embargo, existen otras contribuciones de agua para la fuente de Canoa.

Así, como para las aguas termales de Guayabal, Magueyal y San Simón, los valores de las relaciones Br/Cl y Na/Cl del agua de Canoa son parecidos a los del agua de mar. Esto sugiere también una contribución de agua de mar residual cerca de 9%, que podría explicar las fuertes concentraciones de estos tres elementos en esta agua.

Otras zonas de recarga podrían ser el río Yaqué del Sur, que pasa cerca de la fuente (aunque el valor de δD del agua de este río medido más para arriba, al lado de la fuente de Magueyal, -19.5‰, sea bastante diferente, pero puede haber contribuciones de agua de otros arroyos entre Magueyal y Canoa), o también la sierra de Martín García.

c) Motor térmico del sistema geotérmico

No hay magmatismo reciente reconocido en la región. Sin embargo, el origen magmático predominante del CO₂ y H₂S asociados con la fuente termal de Canoa podría ser relacionado con la existencia de un bolsón de magma relativamente superficial, actualmente en curso de enfriamiento, como propuesto por el BRGM en 1980 (Traineau y Westercamp, 1980), pero del cual no se conoce la edad.

d) Reservorio geotérmico

En superficie, se pueda observar, en el campo, una falla vertical N-S (05.90), que afecta los calcáreos de edad Mioceno Medio. Esta dirección de falla sub-meridiana está probablemente asociada con la red de fallas cartografiadas NNO-SSE, en la hoja geológica de Vicente Noble al 1:50 000. Esta fracturación podría controlar, en parte, la subida del agua termal (fig. 7), como parece indicarlo la distribución NNE-SSO de los travertinos en el mapa geológico. Además, estos travertinos están restringidos al anticlinal limitado por los dos cabalgamientos E-O opuestos.

La hoja geológica de Vicente Noble al 1:50 000 indica también la existencia de megatravertinos orientados NNO-SSE, situados inmediatamente al norte de la fuente de Canoa y en los cerros de Isletón, al SO de la fuente.

A mayor profundidad, se sugiere que la circulación del agua termal de la fuente de Canoa esté principalmente controlada por el cabalgamiento E-O, con buzamiento sur. En estas condiciones, el reservorio geotérmico de esta fuente podría ser la formación Sombrero de edad Mioceno Inferior, constituida de calizas margosas tableadas, a veces areniscosas y formando la parte basal del anticlinal (fig. 7). El valor de la relación $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ del agua termal de Canoa (0.707792) está en acuerdo con tal configuración de reservorio.

Algunos geotermómetros químicos e isotópicos aplicados a esta agua termal (tabl. 2), así como los resultados de la modelización geoquímica efectuada con el código numérico EQ3/6 (Wolery, 1995), indican una estimación de la temperatura del reservorio geotérmico de $75 \pm 20^\circ\text{C}$. Como para las aguas anteriores, vemos que el agua del reservorio de Canoa no está en equilibrio químico total con las rocas que lo constituyen (sólo existen equilibrios químicos parciales, a este nivel moderado de temperatura). De la misma manera que para las otras aguas, no existe, por ejemplo, el equilibrio químico entre los feldspatos sódico y potásico, y el geotermómetro correspondiente Na-K da, entonces, valores de temperatura sobreestimados de $130\text{-}160^\circ\text{C}$ (tabl. 2).

Si se tiene en cuenta un gradiente térmico más o menos normal, alrededor de $30^\circ\text{C}/\text{km}$, para esta zona, la temperatura estimada del agua del reservorio sugiere que la localización de este último esté a una profundidad de 1 000 a 2 000 m, lo que parece encajar con la hipótesis de un reservorio en la formación Sombrero (fig. 7).

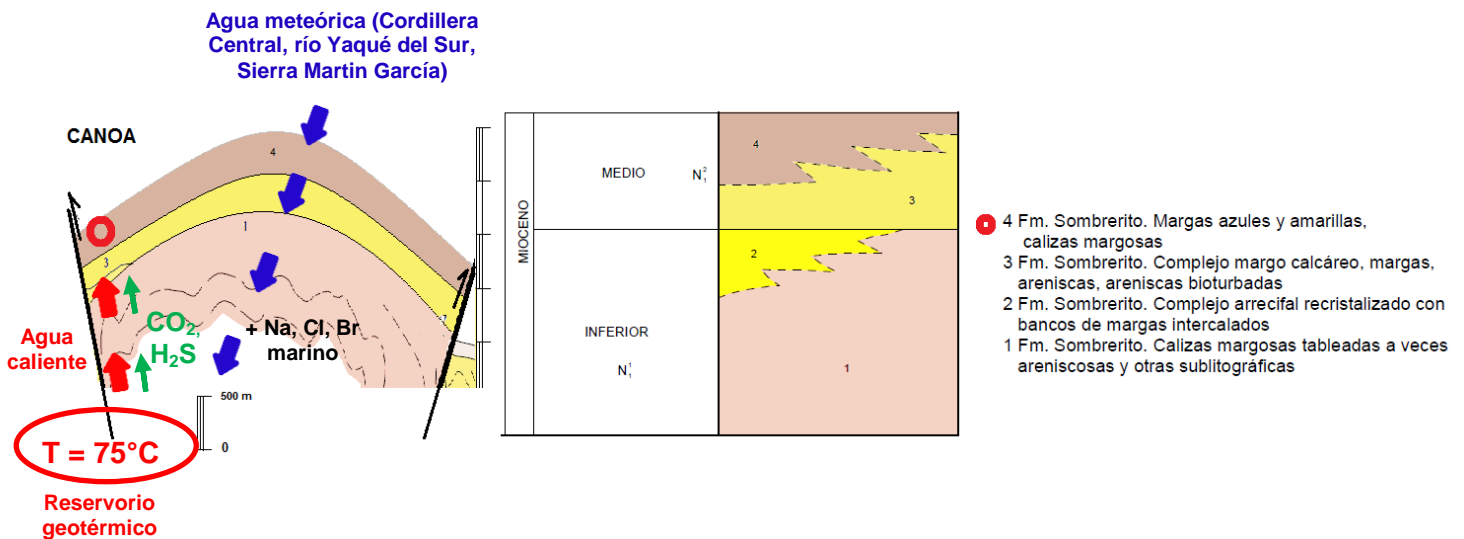


Figura 7 - Modelo conceptual del funcionamiento del sistema geotérmico de Canoa, a partir de un corte esquemático N-S indicando la geometría en pop up del anticlinal de Canoa (Sanjuan et al., 2017b).

Para acabar este capítulo, se presenta en la tabla 3 una recapitulación de las principales características de los reservorios geotérmicos potenciales que podrían alimentar las fuentes termales más calientes de la República Dominicana, a partir de los datos científicos del segundo informe de este estudio (Sanjuan et al., 2017b).

Area termal	Reservorio potencial	Temperatura medida a la emergencia de la fuente termal (°C)	Temperatura de reservorio estimada (°C)	Fluido	Fuente de calor potencial	Zona de recarga potencial
La Tina - Guayabal	Formación Tíreo constituida por volcanoclasticas del Cretáceo superior, cuyo techo podría estar a tan sólo 500 m de profundidad (fig. 4; a verificar con la geofísica) y la base a 2 500 m	35.7	90 ± 20	Tipo Na-Cl Salinidad ≈ 6.5 g/l pH = 6.17	Aparatos magmáticos traquiandesíticos situados cerca de Guayabal, de 1 Ma de edad? Fugas de CO ₂ de origen magmático	Cordillera Central, colada Loma de Castillo, agua de mar residual, arroyo Guayabal
Magueyal - San Simón - Vuelta Grande	Reservorio carbonatado (espesa formación calcárea de Neiba de edad Mioceno inferior a Paleógeno superior, que viene a ponerse por encima del cabalgamiento basal, hacia 2 km de profundidad; fig. 5)	39.2 - 44.9 - 25.2	80 ± 20	Tipo Na-Cl Salinidad ≈ 6.5 - 5.1 - 13.2 g/l pH = 5.27 - 6.64 - 7.70	Presencia cercana de algunas cámaras magmáticas de más de 2 Ma de edad? Fugas de CO ₂ de origen magmático y emanaciones de H ₂ S en Magueyal y San Simón	Cordillera Central, río Yaqué del sur, agua de mar residual
Canoa	Formación Sombrero de edad Mioceno inferior, constituida por calizas margosas tableadas, a veces areniscosas, y formando la parte basal del anticlinal (fig. 7)	41.5	75 ± 20	Tipo Na-Cl Salinidad ≈ 4.3 g/l pH = 5.45	No hay magmatismo reciente reconocido en la región. Sin embargo, las fugas de CO ₂ de origen magmático y las emanaciones de H ₂ S podrían estar relacionadas con la existencia de un bolsón de magma relativamente superficial?	Zona de recarga común con el agua superficial de la poza de Guanarate, agua de mar residual, río Yaqué del sur, sierra de Martín García?
Azua (Ranchería Alta, Galindo)	Reservorio carbonatado (calizas tableadas blancas y rosadas de la formación Sombrero del Mioceno medio; por lo menos, 2 000 m de profundidad)	43.6 - 34.8	65 ± 20	Tipo Na-Cl Salinidad ≈ 1.1 - 1.0 g/l pH = 6.88 - 6.94	Existencia de un aparato basáltico a 11 km al norte del área?	(?) Valores isotópicos δD y δ ¹⁸ O del agua muy negativos (Sanjuan et al., 2017b)
San José de las Matas - Aguas calientes	Ancho batolito de tonalita de edad probablemente Cretáceo superior, que atraviesa rocas volcánicas y volcanosedimentarias más bien básicas, de edad Cretáceo inferior (> 1 500 m de profundidad?)	37.0	60 ± 20	Tipo Na-SO ₄ Salinidad ≈ 0.6 g/l pH = 8.55	Ningún testigo de volcanismo Cuaternario identificado	Valores isotópicos δD y δ ¹⁸ O del agua parecidos a los de las fuentes de la zona de Pedro Santana y Tabacal (Sanjuan et al., 2017b)
Los Bambuses	Reservorio encajado en la formación Tíreo del Cretáceo superior, dominada por materiales básicos	26.5	50 ± 20	Tipo Na-Cl-HCO ₃ Salinidad ≈ 2.2 g/l pH = 7.31	La fuente de Los Bambuses está situada entre el Mogote (volcanismo andesítico reciente de 0.8 ± Ma de edad, que recorta las lavas del Cretáceo superior) a unos 5 km, y una pequeña intrusión Cuaternaria (pórfidos cuarzo-feldespáticos), a 2 km, que no fue datada	Cordillera Central, río Grande, agua de mar residual

Tabla 3 - Tabla sintética que presenta las principales características de los reservorios geotérmicos potenciales que podrían alimentar en agua las fuentes termales más calientes de la República Dominicana.

2.2 PROPUESTAS PARA APLICACIONES GEOTÉRMICAS

Después de haber efectuado el estudio de pre-factibilidad técnico-económico (Bourdon y Tournaye, 2017) y haber cruzado los resultados obtenidos en este estudio con los de los recursos geotérmicos identificados en el campo (Sanjuan *et al.*, 2017b), se destacan diferentes aplicaciones posibles de energía geotérmica en la República Dominicana.

2.2.1 Aplicaciones para generación de electricidad

En lo que se refiere a la producción de electricidad, no se puede generar esta última con turbinas convencionales utilizando el vapor geotérmico a partir de los recursos identificados, ya que indican una temperatura máxima de $90 \pm 20^\circ\text{C}$. Sin embargo, aunque en límite de temperatura, el uso de un ciclo binario ORC (Organic Rankine Cycle) para generar electricidad, a partir de la vaporización de un fluido orgánico calentado por el agua caliente, podría ser considerado en ciertas áreas, con condiciones específicas favorables como un valor de caudal alto, un volumen de agua del reservorio importante y una profundidad relativamente moderada (≈ 500 m) para obtener este orden de temperatura.

a) Área termal de Guayabal - La Tina

El área de La Tina - Guayabal (fig. 8) parece ser el mejor candidato para este tipo de aplicación. Sin embargo, habría también que ver si la renovación de la carretera para acceder a esta área (existen pasajes en muy mal estado) no requiere gastos excesivos. En esta zona no interconectada al sistema eléctrico nacional, la realización de un proyecto de electrificación rural, con unos cientos de kW, podría permitir el desarrollo económico de la zona. El uso luego en cascada del fluido geotérmico a la salida del ciclo binario podría también alimentar los invernaderos en calor renovable a nivel local.

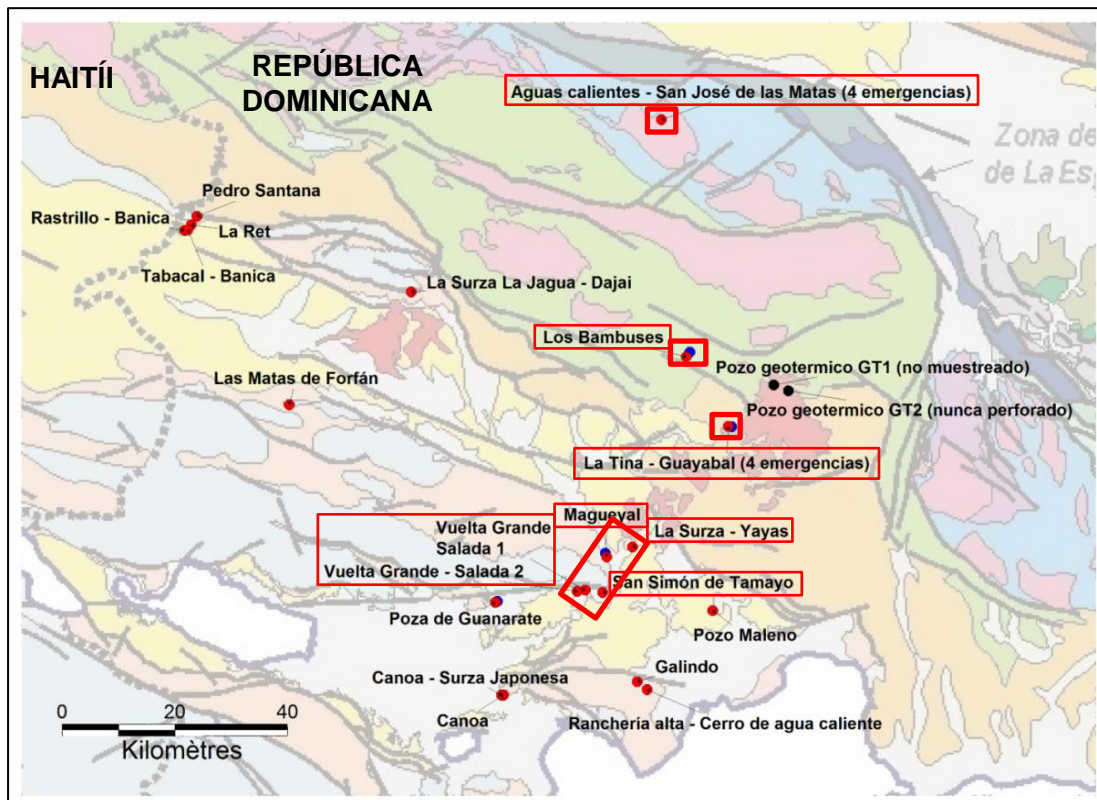


Figura 8 - Zonas seleccionadas en este estudio para aplicaciones geotérmicas (encuadradas en rojo).

En todos los casos, varias perforaciones serán necesarias para alimentar en agua caliente un ciclo ORC a baja temperatura, teniendo en cuenta los grandes volúmenes de agua necesarios y los diámetros de perforación disponibles en República Dominicana (5 pulgadas). Actualmente, para que un proyecto de este tipo resulte ser económicamente viable, no se puede realizar pozos como suele utilizar la industria geotérmica (perforaciones de 12' ¼ de 2 000 m de profundidad media), con un coste medio de 4 millones de USD. Los equipos disponibles para la perforación en la República Dominicana permiten hacer pozos a una profundidad máxima de 500 m, con un diámetro final de 5 pulgadas y con un coste final de aproximadamente 150-200 USD por cada metro perforado. Este tipo de perforación requiere una plataforma de unos 200 m². De este modo, un proyecto de este tipo podría requerir una inversión de varios millones de dólares.

b) Área termal de Magueyal - San Simón de Tamayo - Vuelta Grande

Con una temperatura del reservorio geotérmico estimada de $80 \pm 20^{\circ}\text{C}$, el sistema de Magueyal, San Simón y Vuelta Grande (fig. 8) también podría ser potencialmente utilizado para desarrollar una central de ciclo binario ORC para la producción de electricidad, con costes de infraestructura algo más bajos que para la zona de Guayabal. No obstante, el modelo conceptual (fig. 5) sugiere una localización del reservorio geotérmico a una profundidad de unos 2 000 m, lo que haría mucho más difícil justificar económicamente el proyecto.

c) Recomendaciones

De todos modos, antes de perforar los pozos y en la siguiente etapa, se recomienda efectuar un estudio geofísico magnetotelúrico (MT) para tener una mejor estimación de la profundidad del reservorio geotérmico y una mejor definición de su geometría. Este estudio deberá ser acompañado por una interpretación geológica de los datos obtenidos.

La reconversión de antiguos pozos de exploración petrolífera, actualmente abandonados, en pozos geotérmicos también fue mencionada en el estudio de Bourdon y Tournaye (2017) para generar electricidad con un ciclo ORC. Algunos de estos pozos muy profundos (hasta 4 000-5 000 m de profundidad), que fueron perforados en las cuencas sedimentarias de Azua, San Juan y Enriquillo, atravesaron formaciones con agua caliente e indicaron valores de temperatura hasta 110°C en el fondo del pozo, con un gradiente térmico poco más o menos normal en estas áreas ($\approx 30^{\circ}\text{C}/\text{km}$).

Sin embargo, si la existencia de estos pozos presenta la gran ventaja de ahorrar costes de perforación, hay dos limitaciones muy importantes:

- la factibilidad técnica de la conversión de estos pozos petrolíferos en pozos geotérmicos, lo que requiere, en todos los casos, más informaciones sobre las características de estos pozos y los acuíferos calientes atravesados, así como un estudio de ingeniería de pozo y trabajos de reacondicionamiento;
- la necesidad de perforar, por lo menos, un pozo profundo para reinyectar el agua producida, cuya salinidad es generalmente elevada en estos contextos sedimentarios.

De todos modos, dado el tipo de recursos geotérmicos existentes en la República Dominicana, la generación eléctrica de origen geotérmico, si resulta viable económicamente, sólo podrá desempeñar un papel mínimo en la matriz eléctrica del país con algunos proyectos de baja potencia ($\leq 1 \text{ MW}$).

2.2.2 Aplicaciones para usos directos del calor geotérmico

En el campo de la utilización directa del calor, ningún área presenta necesidades de calor suficientemente grandes para justificar económicamente el desarrollo de la energía geotérmica para sustituirse a las necesidades existentes. Sin embargo, por lo menos en dos áreas, podrían ser propuestos, también con condiciones específicas favorables de acceso al recurso, proyectos pilotos de geotermia de baja entalpía para aplicaciones relacionadas con actividades agro-industriales.

a) Área termal de San José de las Matas - Aguas calientes

El primer proyecto podría desarrollarse en la zona de San José de las Matas - Aguas calientes (fig. 8), con el uso directo de calor geotérmico para secar el café en la fábrica “Asociación de los Caficultores Unidos para el Progreso”. Actualmente, este secado se realiza de manera artesanal en plataformas de hormigón o en túneles. La temperatura a las emergencias de la fuente termal es aproximadamente de 37°C y la temperatura profunda del agua termal está estimada a 60°C ± 20°C.

La proximidad de la Procesadora a estas emergencias y la buena accesibilidad por la carretera a esta área de interés están perfectamente adecuadas para el desarrollo de este proyecto. Sin embargo, para que el proyecto sea económicamente viable, no se sabe si se pueden alcanzar los 60°C a menos de 500 m y si existe un reservorio importante de agua en este intervalo de profundidad. Antes de efectuar perforaciones, se recomienda, de nuevo, llevar a cabo un estudio geofísico magnetotelúrico para tener una mejor estimación de la profundidad de este reservorio y una mejor definición de su geometría.

En caso de resultados positivos, el proyecto piloto podría inicialmente validar la viabilidad del secado geotérmico de una pequeña parte de la producción de café de la asociación antes de extenderlo, en caso de éxito, a la totalidad de la producción de la Procesadora (7 000 quintales), y luego la totalidad de la producción local (20 000 quintales). Garantizando el proceso de secado, esta solución permitiría mejorar la calidad del café producido y finalmente, maximizar el valor añadido de la producción local. La compra de una secadora de granos que se utiliza con el recurso geotérmico (o una secadora normal que se puede “geotermalizar”) sería la única inversión importante en este tipo de proyecto (miles a decenas de miles de dólares dependiendo del tamaño de la secadora). Para completar esta aplicación, se puede añadir que la temperatura del recurso geotérmico no es suficiente para considerar el tostado del café localmente porque este proceso requiere temperaturas de aproximadamente 200°C.

b) Área termal de Los Bambuses

El segundo proyecto piloto podría ser desarrollado en la zona agrícola de Constanza, y más precisamente, en la zona termal de Los Bambuses (fig. 8). En esta zona elevada (> 1 000 m), donde las temperaturas pueden caer por debajo de 0°C, el suministro de calor geotérmico para la calefacción de los invernaderos existentes mejoraría significativamente los rendimientos de los cultivos, garantizando una producción constante durante todo el año. Actualmente, los invernaderos no utilizan ningún sistema de calefacción. El uso de la calefacción geotérmica requiere que los invernaderos estén equipados de un sistema de distribución de calor, que puede ser simple y barato. Dependiendo de la naturaleza del fluido geotérmico, este último podría circular directamente en el sistema de distribución o utilizando un intercambiador de calor para alimentar un circuito secundario. Sin embargo, para que el proyecto sea económicamente viable, se necesitaría una temperatura de por lo menos 40°C a menos de 500 m de profundidad. Como para los otros proyectos, se recomienda llevar a cabo un estudio geofísico magnetotelúrico antes de efectuar perforaciones.

c) Área termal de La Tina - Guayabal

El mismo tipo de proyecto podría ser realizado en el área termal de La Tina - Guayabal (fig. 8), donde también existen invernaderos. En esta zona, se podría utilizar el fluido geotérmico a la salida del ciclo ORC para recuperar el calor residual antes de la reinyección en el subsuelo.

En estas diferentes zonas de producción agrícola que envían todos sus productos frescos a las principales ciudades, proyectos de secado de verduras/frutas con calor geotérmico también podrían ser desarrollados. Esta nueva actividad tendría la ventaja de aumentar el valor añadido de los productos regionales, y al mismo tiempo, proporcionar nuevos puestos de trabajo al nivel local.

d) Otros usos

Por fin, tal como para la generación de electricidad, la conversión de antiguos pozos de exploración petrolífera en pozos geotérmicos fue también mencionada en el estudio de Bourdon y Tournaye (2017). Además de las dos limitaciones importantes evocadas para la generación de electricidad, sería también indispensable que estos pozos estuvieran cerca de una densidad suficiente de infraestructuras como pueden ser hoteles de gran tamaño.

3. Conclusiones y recomendaciones

Tras haber efectuado los tres primeros informes (estudio bibliográfico, estudio de reconocimiento geotérmico de campo y estudio técnico-económico), como convenido en los términos de referencia del contrato con el BID, este último informe presenta las conclusiones y recomendaciones de la primera etapa del proyecto de evaluación del potencial geotérmico de la República Dominicana.

Queda claro que la gran incertidumbre sobre la temperatura de un reservorio geotérmico potencial en la zona volcánica de Yayas de Viajama - Constanza - Valle Nuevo (de 80 a 150-160°C para la fuente termal de Magueyal y hasta 240°C para la fuente de Guayabal - La Tina), considerada como prioritaria por los estudios de 1980 y 1984, realizados respectivamente por el BRGM y ELECTROCONSULT, ha sido solucionada por este estudio.

Con el estudio de reconocimiento geotérmico de campo, se concluyó que la temperatura máxima de las aguas termales de las zonas del sector Yayas de Viajama - Constanza - Valle Nuevo es de $90 \pm 20^\circ\text{C}$ en Guayabal y de $80 \pm 20^\circ\text{C}$ en Magueyal, San Simón de Tamayo y Vuelta Grande.

Se pudieron efectuar los primeros modelos conceptuales de estas zonas con todos los conocimientos adquiridos desde los años 80, así como el de la zona de Canoa, que indica valores de temperatura profunda de $75 \pm 20^\circ\text{C}$.

Para las otras aguas termales como las de Ranchería Alta, Galindo, Aguas Calientes de San José de las Matas, Los Bambuses y Pedro Santana, las temperaturas profundas estimadas son inferiores a 70°C , y no parece haber signo de magmatismo profundo que pueda indicar anomalías térmicas con comparación con un gradiente térmico normal, ni de una presencia de un sistema hidrotermal actual importante.

Con estos resultados relativamente decepcionantes comparados con los de los estudios anteriores, el estudio técnico-económico permitió proponer varias aplicaciones geotérmicas que necesitan a la vez trabajos adicionales como estudios geofísicos y geológicos, antes de perforar, y condiciones específicas de acceso favorables al recurso, como una temperatura adecuada a menos de 500 m de profundidad, un valor de caudal relativamente importante y un volumen de reservorio de agua consecuente.

En lo que se refiere a la generación de electricidad, dado el tipo de recursos geotérmicos existentes en la República Dominicana, la generación eléctrica de origen geotérmico, si resulta viable económicamente, sólo podrá desempeñar un papel mínimo en la matriz eléctrica del país con algunos proyectos de baja potencia ($\leq 1 \text{ MW}$).

En el campo de la utilización directa del calor, ningún área presenta necesidades de calor suficientemente grandes para justificar económicamente el desarrollo de la energía geotérmica para sustituirse a las necesidades existentes. Sin embargo, por lo menos en dos áreas, podrían ser propuestos, también con condiciones específicas de acceso al recurso, proyectos pilotos de geotermia de baja entalpía para aplicaciones relacionadas con actividades agro-industriales.

La reconversión de antiguos pozos de exploración petrolífera, actualmente abandonados, en pozos geotérmicos fue también mencionada para generar electricidad con un ciclo ORC o para usos directos de calor.

Sin embargo, si la existencia de estos pozos presenta la gran ventaja de ahorrar costes de perforación, hay dos limitaciones muy importantes:

- la factibilidad técnica de la conversión de estos pozos petrolíferos en pozos geotérmicos, lo que requiere, en todos los casos, más informaciones sobre las características de estos pozos y los acuíferos calientes atravesados, así como un estudio de ingeniería de pozo y trabajos de reacondicionamiento;
- la necesidad de perforar, por lo menos, un pozo profundo para reinyectar el agua que se va a producir, cuya salinidad es generalmente elevada en estos contextos sedimentarios.

Para el uso directo de calor, sería también indispensable que estos pozos estuvieran cerca de una densidad suficiente de infraestructuras como pueden ser hoteles de gran tamaño.

Teniendo en cuenta todos estos resultados y estas perspectivas, al final de esta primera etapa, se debe ahora de decidir con las instancias de la República Dominicana que continuación se le va a dar al proyecto de valorización del potencial geotérmico de este país (GO/NO GO), sabiendo que la segunda etapa antes de pasar a la perforación estaría principalmente constituida por estudios geofísicos magnetoteléuticos, acompañados por una interpretación geológica de los datos obtenidos, para mejor definir la profundidad y la geometría del reservorio geotérmico investigado, y proponer de este modo las localizaciones más adecuadas para la implantación de los pozos.

Para determinar estas localizaciones, habrá también que tener en cuenta todos los detalles de logística necesarios para perforar (dimensión del área de la plataforma de perforación adaptada, posibilidades de acceso a esta área, disponibilidad de esta área, alimentación en agua para las perforaciones, etc.). Luego, se podrá pasar a la etapa de las perforaciones.

4. Bibliografía

- Boschetti T. (2013) - Oxygen isotope equilibrium in sulfate-water systems: A revision of geothermometric applications in low-enthalpy systems. *Journal of Geochemical Exploration*, 124, 92-100.
- Bourdon E., Tournaye D. (2017) - Estudio técnico y económico preliminar de los recursos geotérmicos de la República Dominicana. *Informe CFG Services 17-CFG-67*, 46 p.
- ELC (1984) - Proyecto geotérmico Yayas - Constanza. Estudio de pre-factibilidad, exploración de superficie. *Informe final ELC-ELECTROCONSULT*, 62 p. + 12 anexos.
- Fouillac C. et Michard G. (1981) - Sodium/lithium ratio in water applied to geothermometry of geothermal reservoir. *Geothermics* 10, p. 55-74.
- Fournier, R.O. (1977) - Chemical geothermometers and mixing models for geothermal systems. *Geothermics*, 5, 41-50.
- Fournier R.O. (1979) - A revised equation for the Na/K geothermometer. *Geoth. Res. Council Trans.*, 3, p. 221-224.
- Fournier R.O. and Potter R.W. (1979) - Magnesium correction to the Na-K-Ca chemical geothermometer. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 43, 1543-1550.
- Fournier R.O. and Rowe J.J. (1966) - Estimation of underground temperatures from the silica content of water from hot springs and wet-steam wells. *Amer. J. Sci.*, 264, p. 685- 697.
- Fournier R.O. and Truesdell A.H. (1973) - An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 37, p. 1255-1275.
- Giggenbach W.F. (1988) - Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geothermometers. *Geochim. Cosmochim. Acta* 52, p. 2749-2765.
- Iundt F. (1980) - Proyecto de investigación geotérmica de la isla Hispaniola. Estudio de reconocimiento geoquímico. *Informe final BRGM-OLADE*, 24 p + 2 anexos.
- Kharaka Y-K., Lico M.S. et Law-Leroy M. (1982) - Chemical geothermometers applied to formation waters, Gulf of Mexico and California basins. *AAPG Bulletin*. 66, 5, p. 588-595.
- Kharaka Y.K. and Mariner R.H. (1989) - Chemical geothermometers and their application to formation waters from sedimentary basins. In: Naeser, N.D. and McCulloch, T.H. (eds), Thermal history of sedimentary basins: methods and case histories. *Springer-Verlag*, New York, p. 99-117.
- Kusakabe M., Robinson B.W. (1977) - Oxygen and sulfur isotope equilibria in the system from 110 to 350°C and applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41, 1033-1040.
- Mercado S., Nieva D. (1980) - Interpretación geoquímica de zonas de alteraciones hidrotermales de la República Dominicana. *Informe final OLADE*, 66 p.

- Michard G. (1979) - Géothermomètres chimiques. Bull. du BRGM (2^{ème} série), Section III, n°2, 183-189.
- Michard G. (1990) - Behaviour of major elements and some trace elements (Li, Rb, Cs, Sr, Fe, Mn, W, F) in deep hot waters from granitic areas. *Chem. Geol.*, 89, p. 117-134.
- Mizutani Y. and Rafter T.A. (1969) - Oxygen isotopic composition of sulphates, 3. Oxygen isotopic fractionation in the bisulphate ion-water system. *N. Zealand J. Sci.*, 12, p. 54-59.
- Sanjuan B., Bouchot V., Gal F., Vittecoq B., Muñoz S., Rodriguez J., Rodriguez Y. (2017a) - Evaluación del potencial geotérmico de la República Dominicana - I. Estudio bibliográfico. *Informe final BRGM/RC-66921-FR*, 102 p., 43 fig., 1 tabl., 9 anexos.
- Sanjuan B., Bouchot V., Gal F., Vittecoq B., Muñoz S., Rodriguez J., Gonzalez S., Rodriguez Y., Vargas J., Suardi A. (2017b) - Evaluación del potencial geotérmico de la República Dominicana - II. Estudio de campo e interpretación de los datos. *Informe final BRGM/RC-66921-FR*, 136 p., 35 fig., 13 tabl., 2 anexos.
- Traineau H., Westercamp D. (1980) - Proyecto de investigación geotérmica de la isla Hispaniola. Estudio de reconocimiento geo-volcanológico. *Informe final BRGM-OLADE*, 40 p.
- Varet J. (1980) - Projet de recherche géothermique en République Dominicaine. Etude de reconnaissance, synthèse et recommandations. *Rapport final BRGM-OLADE*, 26 p. + 1 anexo.
- Wolery T.J. (1995) - EQ3NR, A Computer Program for Geochemical Aqueous Speciation-Solubility Calculations: Theoretical Manual, User's Guide, and Related Documentation (version 7.0), 246 p.
- Wolery T.J. and Daveler S.A. (1995) - EQ6, A Computer Program for Reaction Path Modeling of Aqueous Geochemical Systems: Theoretical Manual, User's Guide, and Related Documentation (version 7.0), 338 p.
- Zeebe E.E. (2010) - A new value for the stable oxygen isotope fractionation between dissolved sulfate ion and water. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 74, 818-828.



Centro científico y técnico
Dirección de los Geo-Recursos - Departamento de Geotermia
3, Avenue Claude-Guillemain
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr