



**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS FASES DE EXPLORACIÓN  
ENTRE PROYECTOS DE HIDROCARBUROS Y GEOTERMIA**

ALIX MARITZA BOLAÑOS

Geóloga

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS  
BUCARAMANGA

2024

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS FASES DE EXPLORACIÓN  
ENTRE PROYECTOS DE HIDROCARBUROS Y GEOTERMIA**

**ALIX MARITZA BOLAÑOS**

**Geóloga**

Monografía para optar el Título de

**Especialista en Gerencia de Hidrocarburos**

**DIRECTOR:**

HARVING DIAZ CONSUEGRA

Especialista en Ingeniería Ambiental

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS

ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS

ESPECIALIZACIÓN EN GERENCIA DE HIDROCARBUROS

BUCARAMANGA

2024

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero agradecer a Dios por sus constantes bendiciones.*

*A mi esposo y mi mami por su apoyo incondicional en todo momento en mi vida, y mis hijos, mis motores constantes por cederme su tiempo de compañía para que pudiera cumplir con este proyecto.*

*A nivel profesional, agradezco a todos aquellos que han influido en mi formación, compartiendo conocimientos y experiencias que sin duda han sido muy importante en mi proceso de crecimiento.*

## CONTENIDO

|   | Pág.      |
|---|-----------|
| <b>INTRODUCCION .....</b>                             | <b>11</b> |
| <b>1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....</b>            | <b>12</b> |
| <b>2. JUSTIFICACIÓN .....</b>                         | <b>13</b> |
| <b>3. OBJETIVOS .....</b>                             | <b>14</b> |
| <b>3.1 Objetivo general .....</b>                     | <b>14</b> |
| <b>3.2 Objetivos específicos .....</b>                | <b>14</b> |
| <b>4. EXPLORACION DE HIDROCARBUROS .....</b>          | <b>15</b> |
| <b>4.1 Identificación de áreas prospectivas .....</b> | <b>17</b> |
| <i>4.1.1 Mapa de Cuencas .....</i>                    | <i>19</i> |
| <i>4.1.2 Mapa Geológico .....</i>                     | <i>22</i> |
| <i>4.1.3 Mapa de gradientes Geotérmicos .....</i>     | <i>24</i> |
| <i>4.1.4 Información sísmica 2D/3D .....</i>          | <i>25</i> |
| <i>4.1.5 Información de pozo .....</i>                | <i>28</i> |
| <i>4.1.6 Informes técnicos .....</i>                  | <i>30</i> |
| <b>4.2 Adquisición de Información .....</b>           | <b>30</b> |
| <b>4.3 Interpretación.....</b>                        | <b>32</b> |
| <b>4.4 Análisis Económico.....</b>                    | <b>34</b> |
| <b>4.5 Perforación Pozo exploratorio.....</b>         | <b>34</b> |
| <b>4.6 Análisis de Ingeniería.....</b>                | <b>36</b> |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| <b>4.7</b> | <b>Evaluación Económica .....</b>  | <b>36</b> |
| <b>5.</b>  | <b>GEOTERMIA .....</b>   | <b>38</b> |
| <b>5.1</b> | <b>Definiciones .....</b>  | <b>38</b> |
| <b>5.2</b> | <b>Clasificación de los sistemas geotérmico .....</b>  | <b>44</b> |
| <b>5.3</b> | <b>Clasificación de Yacimientos Geotérmicos .....</b>  | <b>47</b> |
| <b>5.4</b> | <b>Historia de la Geotermia .....</b>  | <b>51</b> |
| <b>5.5</b> | <b>Geotermia en el mundo .....</b>   | <b>53</b> |
| <b>6.</b>  | <b>EXPLORACION DE RECURSOS GEOTERMICOS .....</b>   | <b>68</b> |
| <b>6.1</b> | <b>Fase 1. Reconocimiento .....</b>  | <b>70</b> |
| <b>6.2</b> | <b>Fase 2. Prefactibilidad .....</b>   | <b>70</b> |
| <b>6.3</b> | <b>Fase 3. Factibilidad .....</b>  | <b>72</b> |
| <b>6.4</b> | <b>Fase 4. Desarrollo .....</b>  | <b>74</b> |
| <b>7.</b>  | <b>COMPARATIVO TECNICAS UTILIZADAS EN LA FASE DE EXPLORACION<br/>DE HIDROCARBUROS EN RELACION CON UN PROYECTO GEOTERMICO. ....</b> | <b>76</b> |
| <b>8.</b>  | <b>AREAS DE CONOCIMIENTO DE LA EXPLORACION DE HIDROCARBUROS<br/>QUE PUEDEN APLICARSE A UN PROYECTO DE GEOTERMIA. ....</b>          | <b>84</b> |
| <b>8.1</b> | <b>Geología y Geofísica .....</b>  | <b>84</b> |
| <b>8.2</b> | <b>Análisis hidrológicos. ....</b>   | <b>90</b> |
| <b>8.3</b> | <b>Modelación Geológica .....</b>  | <b>91</b> |
| <b>8.4</b> | <b>Evaluación del riesgo geológico .....</b>   | <b>94</b> |
| <b>8.5</b> | <b>Perforación y completamiento de Pozos .....</b>   | <b>95</b> |
| <b>9.</b>  | <b>CONCLUSIONES .....</b>  | <b>96</b> |
|            | <b>REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....</b>  | <b>99</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Figura 1.</b> Diagrama de Flujo Evaluación de prospectos .....  | 16   |
| <b>Figura 2.</b> Tomado de la AHN Classification of sedimentary basins in Colombia (ECOPETROL, 2000) and adopted in the ANH land map . ..... | 20   |
| <b>Figura 3.</b> Proposed basin map of Colombia for ANH 2007 .....   | 21   |
| <b>Figura 4.</b> Mapa Geológico de Colombia, Geological Map of Colombia y Atlas Geológico de Colombia .....                                  | 23   |
| <b>Figura 5.</b> Mapa de Gradientes Geotérmicos Colombianos.....   | 24   |
| <b>Figura 6.</b> Imagen Geovisor ANH – Programas sísmicos 2D (líneas verdes) y Sísmicos 3D (polígonos morados achurados) .....               | 26   |
| <b>Figura 7.</b> Información Sísmica 2D en Colombia .....  | 27   |
| <b>Figura 8.</b> <i>Información Sísmica 3D en Colombia</i> .....   | 28   |
| <b>Figura 9.</b> Información de pozo.....  | 29   |
| <b>Figura 10.</b> Técnicas de Geología de exploración en Hidrocarburos .....   | 31   |
| <b>Figura 11.</b> Etapas en un análisis Económico.....   | 34   |
| <b>Figura 12.</b> Fases perforación de Pozo .....  | 35   |
| <b>Figura 13.</b> Esquema de la estructura de la tierra y rangos de temperatura .....  | 39   |
| <b>Figura 14.</b> Estructura interna de la tierra y repartición de flujos caloríficos .....  | 40   |
| <b>Figura 15.</b> Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas y zonas de subducción.....  | 41   |
| <b>Figura 16.</b> Esquema de un sistema geotérmico ideal .....   | 43   |
| <b>Figura 17.</b> Modelo conceptual de un campo de alta temperatura dentro de un sistema de cordillera volcánica.....                        | 45   |
| <b>Figura 18.</b> Figura Esquemática de una cuenca sedimentaria con Yacimiento geotérmico a una Prof. de 2 a 4 Km.....                       | 46   |
| <b>Figura 19.</b> <i>Yacimiento geotérmico de alta entalpia</i> .....  | 49   |
| <b>Figura 20.</b> Yacimiento geotérmico de baja entalpia .....   | 50   |

|   |    |
|---|----|
| <b>Figura 21.</b> Modificada Energía Geotérmica utilizada en usos directos en el mundo (2010).....  | 55 |
| <b>Figura 22.</b> Capacidad Instalada en el 2010 (10.7 GWt).....  | 59 |
| <b>Figura 23.</b> Modificada Energía geotérmica utilizada en usos directos en el mundo (2020) .....   | 60 |
| <b>Figura 24.</b> La capacidad geotérmica de uso directo instalada y la utilización anual desde 1992 hasta 2020.....  | 61 |
| <b>Figura 25.</b> Comparación mundial del uso directo de energía geotérmica en TJ/año de 1995,2000,2005, 2010, 2015 y 2020 .....  | 64 |
| <b>Figura 26.</b> Capacidad Instalada y uso de energía en el 2019 <sup>24</sup> .....   | 66 |
| <b>Figura 27.</b> Los 10 Países con Mayor Capacidad Geotérmica .....  | 67 |
| <b>Figura 28.</b> Fases del desarrollo de un proyecto geotérmico .....  | 69 |
| <b>Figura 29.</b> Etapa de Exploración Superficial .....  | 70 |
| <b>Figura 30.</b> Etapa de Exploración Profunda.....  | 73 |
| <b>Figura 31.</b> Etapa de Desarrollo .....   | 75 |
| <b>Figura 32.</b> Mapa geológico de un prospecto geotermal.....   | 85 |
| <b>Figura 33.</b> Mapa de datos de gravedad.....  | 86 |
| <b>Figura 34.</b> Mapa de anomalía Magnética. ....  | 87 |
| <b>Figura 35.</b> Gradiente de velocidad horizontal. ....   | 89 |
| <b>Figura 36.</b> Modelo Conceptual <b>A.</b> Mapa de Superficie en Nueva Zelanda <b>B.</b> Sección vertical a través de un sistema geotérmico en Nueva Zelanda y <b>C.</b> Un Modelo en tres dimensiones de California ..... | 93 |

## LISTA DE TABLAS

|  | Pág. |
|--|------|
| <b>Tabla 1.</b> Riesgo Geológico para evaluación de un prospecto .....   | 33   |
| <b>Tabla 2.</b> Clasificación de fuentes geotermales basada en temperatura °C. Tomado de Dickson & Fanelli (2005).....   | 48   |
| <b>Tabla 3.</b> Evolución de la capacidad Instalada entre 1995 - 2010 <sup>20</sup> .....  | 56   |
| <b>Tabla 4.</b> Evolución de la energía térmica utilizada <sup>20</sup> .....  | 57   |
| <b>Tabla 5.</b> Países que tiene uso directo de la energía geotérmica.....   | 58   |
| <b>Tabla 6.</b> Modificación de Resumen en MWt para varias categorías Capacidad instalada en el periodo 1995 – 2020 .....                                      | 62   |
| <b>Tabla 7.</b> Modificación de Resumen en TJ/año para varias categorías uso directo en el periodo 1995 -2020 <sup>26</sup> .....                              | 63   |
| <b>Tabla 8.</b> Tomado de Resumen de datos de uso directo en todo el mundo por región/continente <sup>24</sup> .....   | 65   |
| <b>Tabla 9.</b> Tabla descriptiva de la información requerida para el desarrollo de un proyecto de exploración de hidrocarburo y un proyecto de geotermia..... | 76   |
| <b>Tabla 10.</b> Tabla resumen comparación de las técnicas de exploración de hidrocarburos y un proyecto de geotermia .....                                    | 83   |
| <b>Tabla 11.</b> Riesgo Geológico para evaluación de un prospecto .....  | 94   |

## RESUMEN

**Título:** Análisis Comparativo De Las Fases De Exploración Entre Proyectos De Hidrocarburos Y Geotermia.<sup>1</sup>

**Autor:** Alix Maritza Bolaños <sup>2</sup>

**Palabras claves:** Exploración de Hidrocarburos, Geotermia, metodologías técnicas, adquisición de información, evaluación de riesgo.

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo entre las fases de exploración de un proyecto de hidrocarburos y un proyecto de geotermia, con el fin de identificar cuáles son las similitudes, diferencias y posibles áreas de transferencia de conocimientos entre ambas actividades.

Se describirán las metodologías y actividades técnicas esenciales para la exploración de hidrocarburos (petróleo y gas) y de fluidos geotérmicos (agua y vapor), desde la identificación del área prospectiva, perforación de pozos de exploración hasta la evaluación técnica y económica de los proyectos.

La monografía esta subdivida en capítulos, que cubren la exploración de un proyecto de hidrocarburos, la energía geotérmica, y la exploración en un proyecto geotérmico. A continuación, se explicarán las técnicas utilizadas en ambos proyectos, comenzando con la adquisición de información como son: datos geológicos, geofísicos, geoquímicos e hidrogeológicos. Posteriormente, se abordará la interpretación e integración de esta información a través de modelos, la evaluación de riesgo geológico, la evaluación técnica y económica de un proyecto, resaltando como cada técnica favorece la identificación del recurso buscado. Y al final, se presentan las conclusiones obtenidas a partir del análisis comparativo entre los dos tipos de exploración y si estos pueden contribuir a la transición energética que ahora se vive en Colombia.

---

<sup>1</sup> Monografía

<sup>2</sup> Facultad De Ingenierías Físicoquímicas, Escuela De Ingeniería De Petróleos. Director: Harving Díaz Consuegra Especialista en ingeniera ambiental

## ABSTRACT

**Title:** Comparative Analysis of Exploration Phases between Hydrocarbon and Geothermal Projects.<sup>3</sup>

**Author:** Alix Maritza Bolaños<sup>4</sup>

**Key Words:** Hydrocarbon Exploration, Geothermal, technical methodologies, information acquisition, risk assessment.

The objective of this work is to carry out a comparative analysis between the exploration phases of a hydrocarbon project and a geothermal project, in order to identify the similarities, differences and possible areas of knowledge transfer between both activities.

The essential methodologies and technical activities for the exploration of hydrocarbons (oil and gas) and geothermal fluids (water and steam) will be described, covering steps from the identification of the prospective area, drilling of exploration wells to the technical and economic evaluation of the projects.

The monograph is subdivided into chapters, that cover the exploration of hydrocarbon project, geothermal energy, and exploration in a geothermal project. Next, the techniques used in both types of projects will be explained, starting with the acquisition of information such as: geological, geophysical, geochemical and hydrogeological data. Subsequently, the interpretation and integration of this information through models, the geological risk assessment, and the technical and economic evaluation of a project will be addressed, highlighting how each technique contributes to the identification of the targeted resource. Finally, the conclusions obtained from the comparative analysis between the two types of exploration are presented and whether these can contribute to the energy transition that is now being experienced in Colombia.

---

<sup>3</sup> Monografía

<sup>4</sup> Facultad De Ingenierías Fisicoquímicas, Escuela De Ingeniería De Petróleos. Director: Harving Díaz Consuegra Especialista en ingeniera ambiental

## INTRODUCCION

Actualmente, la transición energética se ha convertido en una prioridad a nivel mundial debido a los efectos del calentamiento global y a la necesidad de reducir la dependencia de fuentes no renovables. Entre las energías energéticas sostenibles, la energía geotérmica se destaca como una fuente confiable y con potencial para contribuir en la generación de electricidad en Colombia. A pesar de que esta fuente de energía se encuentra en sus primeras etapas en nuestro país, la vasta experiencia acumulada en la Industria de los hidrocarburos ofrece una oportunidad única para ayudar a acelerar su crecimiento.

Este trabajo tiene como objetivo realizar un análisis comparativo entre las fases de exploración de proyectos de hidrocarburos y de proyectos geotérmicos, identificando las similitudes, diferencias y áreas de posible transferencia de conocimiento entre ambas industrias. Para ello se analizarán las metodologías técnicas y etapas de evaluación de un proyecto de exploración de un recurso energético.

La monografía está estructurada en capítulos que abordan la exploración de hidrocarburos como el desarrollo de un proyecto geotérmico, resaltando como cada técnica contribuye a la identificación del recurso energético y a la toma de decisiones en el paso a seguir. Este análisis desea mostrar como el conocimiento de la industria de los Hidrocarburos puede favorecer su implementación en proyectos geotérmicos y contribuir a la transición energética del país.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con base al calentamiento global y los problemas ambientales, el mundo ha empezado a realizar un cambio energético a pasos agigantados, orientándose a la utilización de energías más limpias y renovables, como son: la eólica, solar, hidroeléctrica, geotérmica entre las más mencionadas. En particular, La geotermia se ha considerado como una fuente de energía confiable y sostenible, por tal motivo, en las últimas décadas en Colombia se han realizado esfuerzos sustanciales tanto en la investigación como en el desarrollo de este tipo de energía, con el objetivo de fortalecerla su implementación y considerarla una fuente importante para la generación de electricidad.

Teniendo en cuenta que en Colombia la industria de hidrocarburos es una de las fuentes de energía más importantes para el país, la cual se ha desarrollado desde inicios del siglo XX, con el descubrimiento del primer pozo productor Infantas-1, el cual fue perforado en 1918 y la posterior producción comercial en 1921. Desde ese momento hasta nuestros días ha evolucionado la forma en que se desarrollan los proyectos de exploración de hidrocarburos en nuestro país. Hoy en día, estos proyectos son cada vez óptimos, tanto técnica como económicamente. Esta experiencia en proyectos de hidrocarburos podría servir como una guía para el desarrollo e implementación de proyectos de energía geotérmica y dar un gran paso al crecimiento del sector geotérmico en el país.

## 2. JUSTIFICACIÓN

A nivel mundial la transición energética se ha convertido en una prioridad para la humanidad, donde los recursos no renovables como son: los Hidrocarburos y el carbón, altamente contaminantes, deben ser remplazados por recursos renovables tales como: la energía eólica, energía solar, hidroeléctricas, biomasa y energía geotérmica entre otras, para la conservación del planeta.

Con base a la experiencia que se tiene en la exploración de hidrocarburos en subsuelo en Colombia y los avances que se han reportado a nivel mundial en la exploración y uso de la energía geotérmica, se crea una oportunidad para impulsar el desarrollo de proyectos que generen una nueva fuente de electricidad. Para este fin, es fundamental conocer y analizar las fases que involucra la evaluación de proyectos de geotermia. Estas fases permiten determinar su viabilidad y desarrollar un programa de planificación y ejecución de los proyectos, que asegure que el país pueda cumplir con las políticas energéticas planteadas a mediano y largo plazo.

Es posible acelerar el crecimiento del sector geotérmico en Colombia, partiendo de la transferencia de la experiencia acumulada en la industria de los hidrocarburos.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Realizar un análisis comparativo de las fases de exploración en un proyecto de hidrocarburos y las fases de un proyecto de geotermia, con el fin de identificarlos factores técnicos o tecnológicos utilizados en la industria de los hidrocarburos y que pueden ser aplicables y útiles en un proyecto de geotermia.

#### **3.2 Objetivos específicos**

- Analizar las etapas que componen el proceso de exploración en proyectos geotérmicos, desde la identificación de recursos térmicos hasta la caracterización del yacimiento.
- Identificar similitudes y diferencias en las metodologías y técnicas utilizadas en cada fase de exploración tanto en proyectos de hidrocarburos como en proyectos geotérmicos
- Determinar áreas específicas de conocimiento y competencias técnicas en adquiridas en la exploración de hidrocarburos que podrían transferirse y aplicarse en el desarrollo de proyectos de geotermia.

#### 4. EXPLORACION DE HIDROCARBUROS

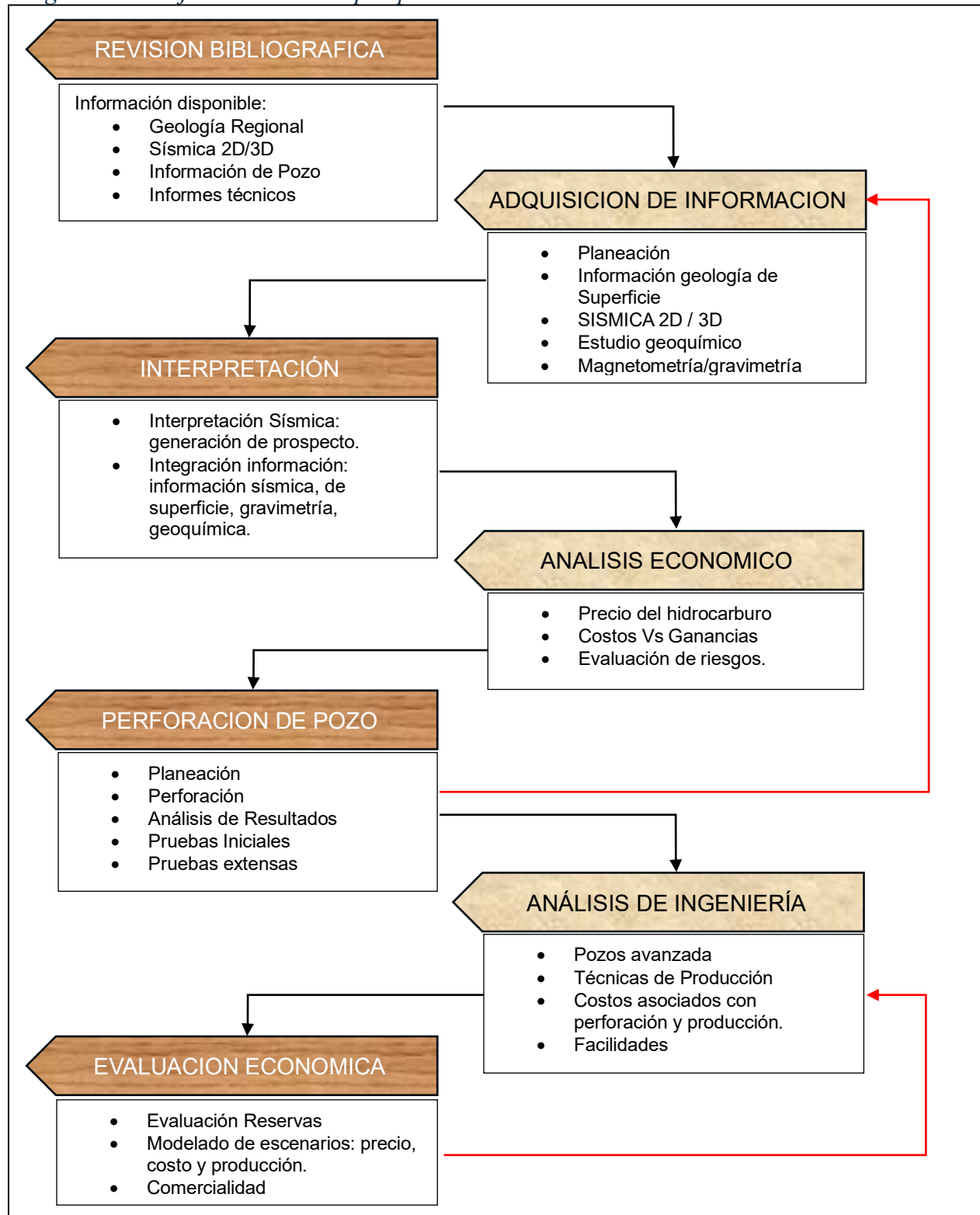
La exploración de Hidrocarburos como el petróleo y el gas es un proceso que implica la realización en varias etapas. Estas permiten identificar y evaluar las formaciones geológicas de un área que posee uno o varios potenciales yacimientos. Desde el inicio, es necesario una inversión económica y tener en cuenta diversos factores, como los riesgos geológicos, técnicos y económicos. Adicional a esto, es conveniente conocer las regulaciones ambientales y sociales a nivel nacional; así como el mercado, el precio del barril de petróleo es una variable que impacta el desarrollo de los proyectos.

Este proceso de exploración sigue una secuencia la cual puede representarse mediante el siguiente diagrama de flujo (Figura 1), cuando ya se tiene un área asignada por la Agencia Nacional de Hidrocarburos. El primer paso es la revisión bibliográfica, en donde se recopila la información técnica del área; que incluye la geología de superficie, programas sísmicos (tanto de adquisición como los procesamientos), gravimetría, magnetometría e información de pozo, (registros eléctricos, núcleos, test especiales, etc.). Con toda esta data se genera una interpretación preliminar del área.

Posteriormente, se busca mitigar algunos de los riesgos geológicos por medio de la obtención de nueva información geológica, para ello se considera la adquisición de Sísmica 2D/3D, geología de superficie y estudios de gravimetría o magnetometría, entre otros y los recursos necesarios para realizar estas actividades.

Figura 1.

Diagrama de Flujo Evaluación de prospectos



Finalmente, se integra toda la información disponible para construir una interpretación más detallada del área de estudio que defina uno o varios prospectos y se proyectaran la posición de uno o varios pozos exploratorios.

La perforación del pozo es una etapa concluyente, debido a que permite obtener un dato concreto y confiable sobre lo que se encuentra en subsuelo, confirmando la presencia de petróleo o gas en donde solo se tenían indicios geológicos de su presencia. Cabe resaltar, que nos permite adquirir registros eléctrico o muestras de pared para describir las propiedades de las rocas y las características del fluido contenidos en ellas. También puede concluir si es necesario adquirir información adicional específica para conocer, delimitar o evaluar la calidad del yacimiento.

Una vez completada la perforación de pozos exploratorios, se da paso a la fase de análisis de ingeniera, en la cual se plantea el diseño de los pozos de avanzada, técnicas de perforación y producción, así como todos los aspectos relacionados con yacimiento desde el punto de vista técnico, económico y de viabilidad en ingeniería.

Finalmente, se efectúa la evaluación económica del proyecto. En esta fase se consideran diversos factores como son: las reservas, los escenarios donde se observa la relación precio, los costos y la producción, así como los riesgos y rentabilidad, ente otros. Estos elementos indican si el proyecto puede continuar a fase de explotación o si es necesario obtener más información técnica para disminuir los riesgos asociados.

#### **4.1 Identificación de áreas prospectivas**

El objetivo de esta primera fase es identificar las áreas que tienen un potencial geológico con yacimientos de hidrocarburos. Esta actividad se realiza primero por medio de la revisión bibliográfica, donde hay diversas fuentes de consulta.

A principios del siglo XX, los hidrocarburos tuvieron un impacto masivo a nivel mundial, los primeros descubrimientos de petróleo se dieron en Texas (USA), en Medio Oriente, Rusia entre otros lugares. Y esto abrió las puertas al desarrollo de la industria petrolera desde la perforación, producción y el refinamiento del petróleo. Colombia no era ajeno a lo que estaba pasando en el mundo, en ese momento despertó la necesidad de conocer lo que se hallaba en la superficie de la tierra, investigar si también se encontraba en el subsuelo y como poder extraer aquello que llamaban petróleo. Vásquez (2012), comenta que los primeros manaderos de petróleo fueron utilizados por los indios Latoro cerca hoy de Barrancabermeja, también, cito que el primer pozo productor, Infantas No 1 se perforó en 1918 y en 1921 se estableció la comercialidad. Y de ahí en adelante se empezaron a realizar estudios de geología de superficie y de pozos que permitieron el desarrollo del campo. Hoy el campo la Cira-Infantas es uno de los campos maduros más antiguos, con una producción acumulada de 858 millones de barriles, la cual inició con la compañía Tropical Oil Company-Troco (1918 – 1951) y luego se cedió a ECOPETROL, quien lo opera hasta la fecha<sup>5</sup>.

A medida que el siglo prosperaba, ocurrieron muchos avances tecnológicos en esta industria, y esto facilitó que en Colombia se ampliara el conocimiento tanto de geología de superficie como de subsuelo y de ingeniería durante las fases de exploración como de la perforación, permitiendo la obtención de nueva data y criterios de evaluación que sirvieron para el descubrimiento de nuevos campos. Algunos de los campos con mayor cantidad de información son: La Cira Infantas, Cano Limon, Castilla, Chichimene, Rubiales, entre otros.

---

<sup>5</sup> <https://www.portafolio.co/negocios/empresas/la-cira-infantas-un-siglo-sudando-petroleo-514864>

#### 4.1.1 *Mapa de Cuencas*

El mapa de cuencas es un producto que proporciona herramientas en la identificación del sistema petrolífero de un área, debido que para su clasificación se han integrado conceptos de geología, geoquímica, ambiente de formación y evolución tectónica entre otros.

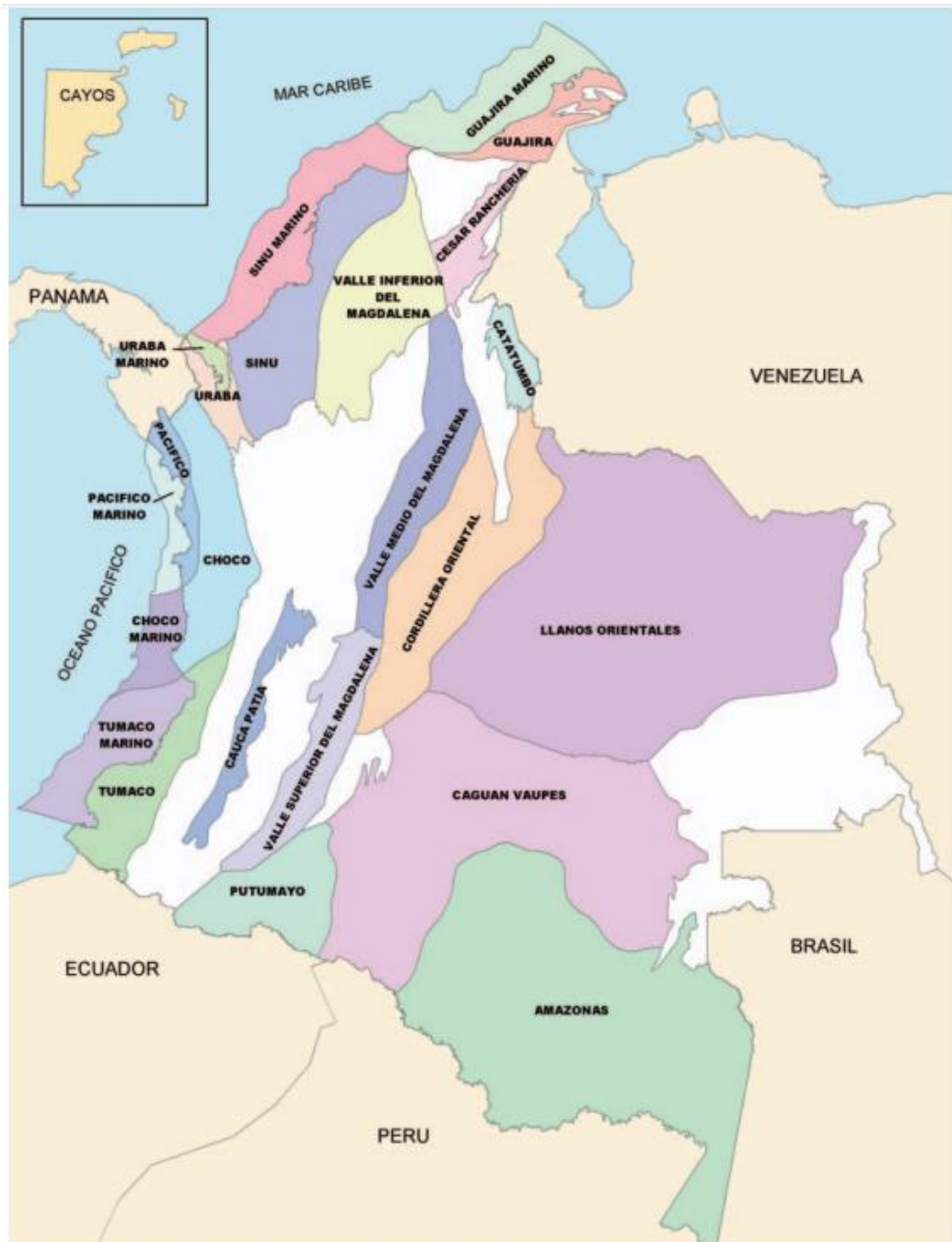
En 1985, Govea y Aguilera<sup>6</sup>, empleados de Ecopetrol publicaron un artículo donde describieron 13 cuencas sedimentarias en Colombia, considerando en primer lugar su origen geológico y la clasificación de Kingston et al. (1983), como: cuencas continentales, cuencas fronterizas continentales y cuencas oceánicas. Posteriormente, Ecopetrol en el 2000 presentó una subdivisión de 18 cuencas con base a esta información la Agencia Nacional de Hidrocarburos la adopto y presento el mapa que actualmente se utiliza en Colombia (figura 1 y figura 2), donde plantea dividir el territorio colombiano en 23 cuencas, teniendo más criterios de evaluación.

---

<sup>6</sup> [https://www.anh.gov.co/documents/12/colombian\\_sedimentary\\_basins.pdf](https://www.anh.gov.co/documents/12/colombian_sedimentary_basins.pdf)

**Figura 2.**

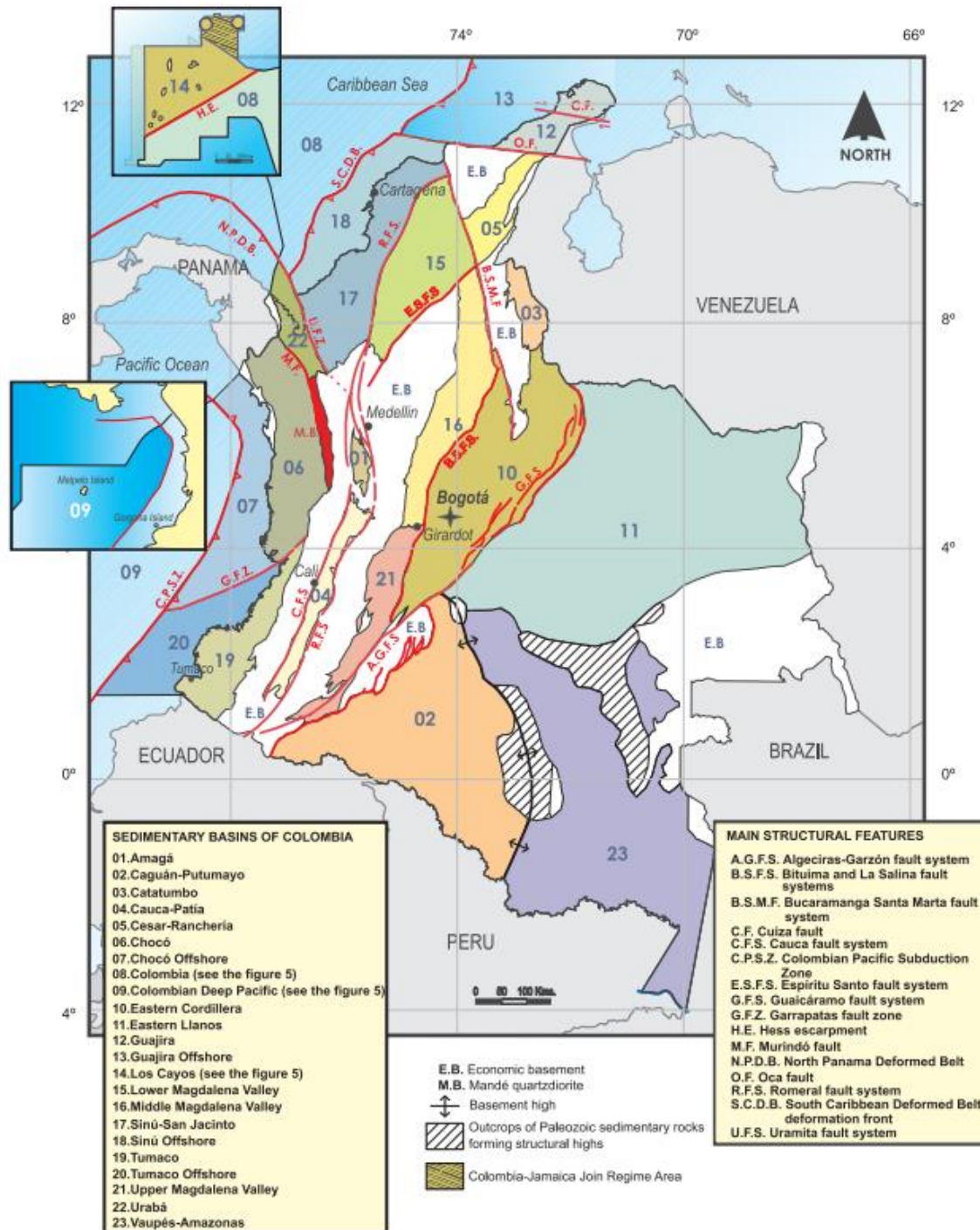
*Tomado de la AHN Classification of sedimentary basins in Colombia (ECOPETROL, 2000) and adopted in the ANH land map 7.*



<sup>7</sup> [http://www.anh.gov.co/html/i\\_portals/index.phz](http://www.anh.gov.co/html/i_portals/index.phz).

Figura 3.

Proposed basin map of Colombia for ANH 2007



#### 4.1.2 *Mapa Geológico*

Una de las fuentes más relevantes es el mapa geológico, en él se puede encontrar: roca fuente, roca almacenadora, rasgos estructurales entre lo más importante que nos abren las puertas a la investigación de la caracterización de un sistema petrolífero.

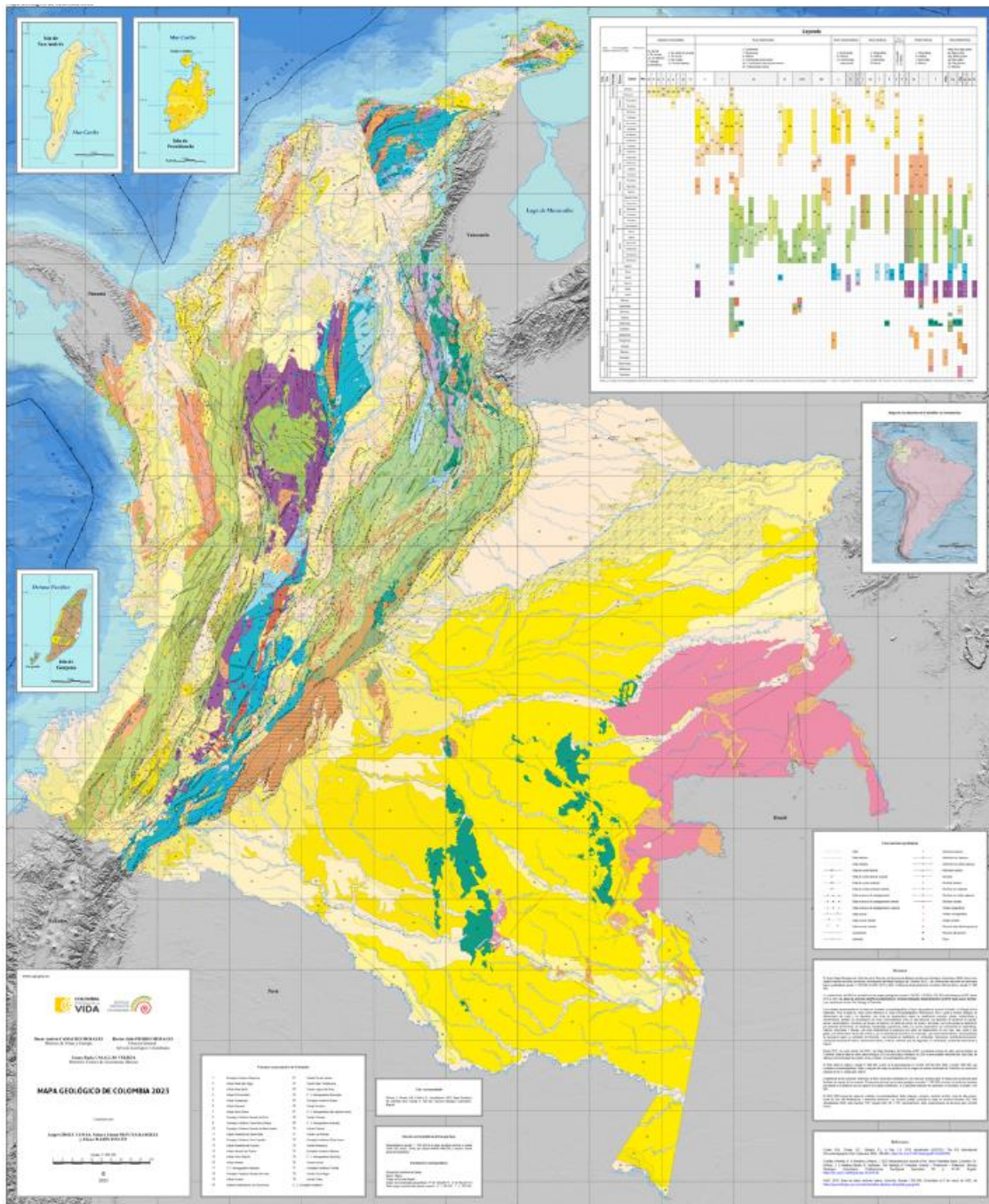
El mapa geológico de Colombia<sup>8</sup> a escala 1:1500000, es una fuente básica de información de la geología de superficie del país elaborado por el Servicio Geológico Colombiano, es el resultado de la recopilación de información publicada hasta el 31 de marzo de 2022 en las planchas geológicas a escala 1:100000, 1:50000 y 1:25000. Adicionalmente, se consultaron Imágenes de relieve sombreado generados con el SRTM e la NASA, imágenes de satélite Landsat, tesis de maestría, doctorado y artículos científicos.

---

<sup>8</sup> [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Documents/MGC\\_2023/Memoria\\_mgc\\_gmc\\_agc\\_2023.pdf](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Documents/MGC_2023/Memoria_mgc_gmc_agc_2023.pdf)

**Figura 4.**

*Mapa Geológico de Colombia, Geological Map of Colombia y Atlas Geológico de Colombia<sup>9</sup>*



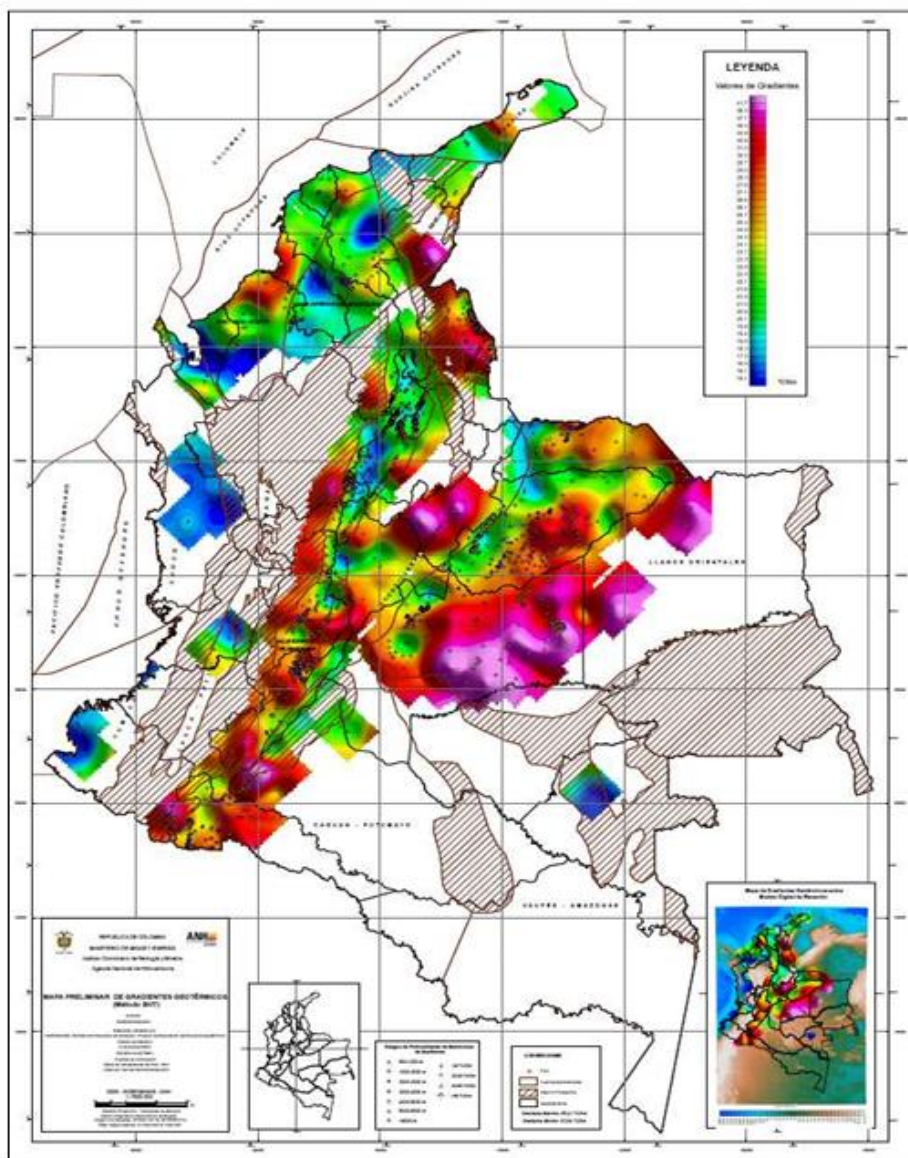
<sup>9</sup> [https://www2.sgc.gov.co/MGC/Documents/MGC\\_2023/Memoria\\_mgc\\_gmc\\_agc\\_2023.pdf](https://www2.sgc.gov.co/MGC/Documents/MGC_2023/Memoria_mgc_gmc_agc_2023.pdf)

### 4.1.3 Mapa de gradientes Geotérmicos

En los últimos 45 años, INGEOMINAS y ahora el Servicio Geológico de Colombia han realizado un gran esfuerzo para generar el mapa de gradientes geotérmicos del país.

**Figura 5.**

*Mapa de Gradientes Geotérmicos Colombianos<sup>10</sup>.*



<sup>10</sup> Servicio Geológico Colombiano, «Geotérmica en Colombia Proyecciones y Plan de Trabajo del Servicio Geológico Colombiano,» Manizales, 2017.

#### **4.1.4 Información sísmica 2D/3D**

Es uno de los métodos más utilizados en la industria de los hidrocarburos, esta hace referencia a la adquisición de datos por medio de técnicas de prospección sísmica, lo cual ha permitido observar las capas geológicas bajo la superficie de la tierra.

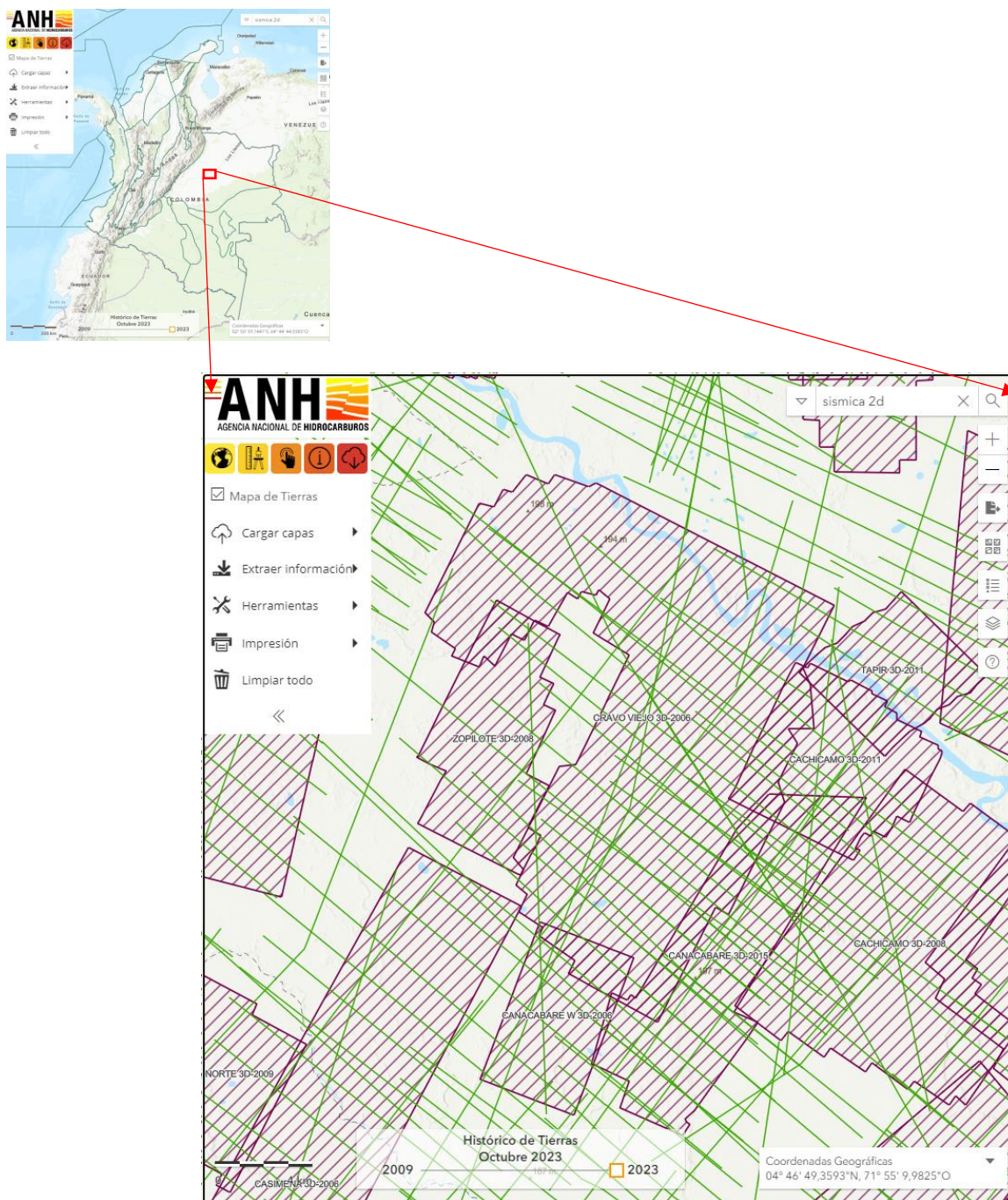
Este método consiste en la generación de ondas elásticas en la superficie por medio de explosiones controladas o vibradores, posteriormente las ondas se propagan por el subsuelo y son reflejadas hacia la superficie por las capas encontradas, y estas ondas reflejadas son registradas en la superficie por medio de geófonos. Existen dos tipos: la sísmica 2D en donde la información recopilada se realiza sobre una línea unidimensional y la sísmica 3D es más avanzada debido a que permite la recolección de mayor cantidad de datos en un área tridimensional.

La información sísmica 3D en las últimas décadas se ha convertido en un elemento esencial que proporciona una clara imagen del subsuelo, donde no solo tenemos información estructural sino también estratigráfica, y es tan detallada que hoy podemos llegar a tener mejor información del yacimiento y así localizar nuevos pozos y por medio de ellos también aumentar la información que se tiene del reservorio.

En Colombia la Agencia Nacional de Hidrocarburos es una de las entidades gubernamentales donde se puede encontrar información técnica tanto de superficie y como de subsuelo en el país. Y por medio de <https://geovisor.anh.gov.co/tierras/> se puede consultar información específica como geología de superficie, sísmica y pozos en un área determinada.

**Figura 6.**

*Imagen Geovisor ANH – Programas sísmicos 2D (líneas verdes) y Sísmicos 3D (polígonos morados achurados)*<sup>11</sup>

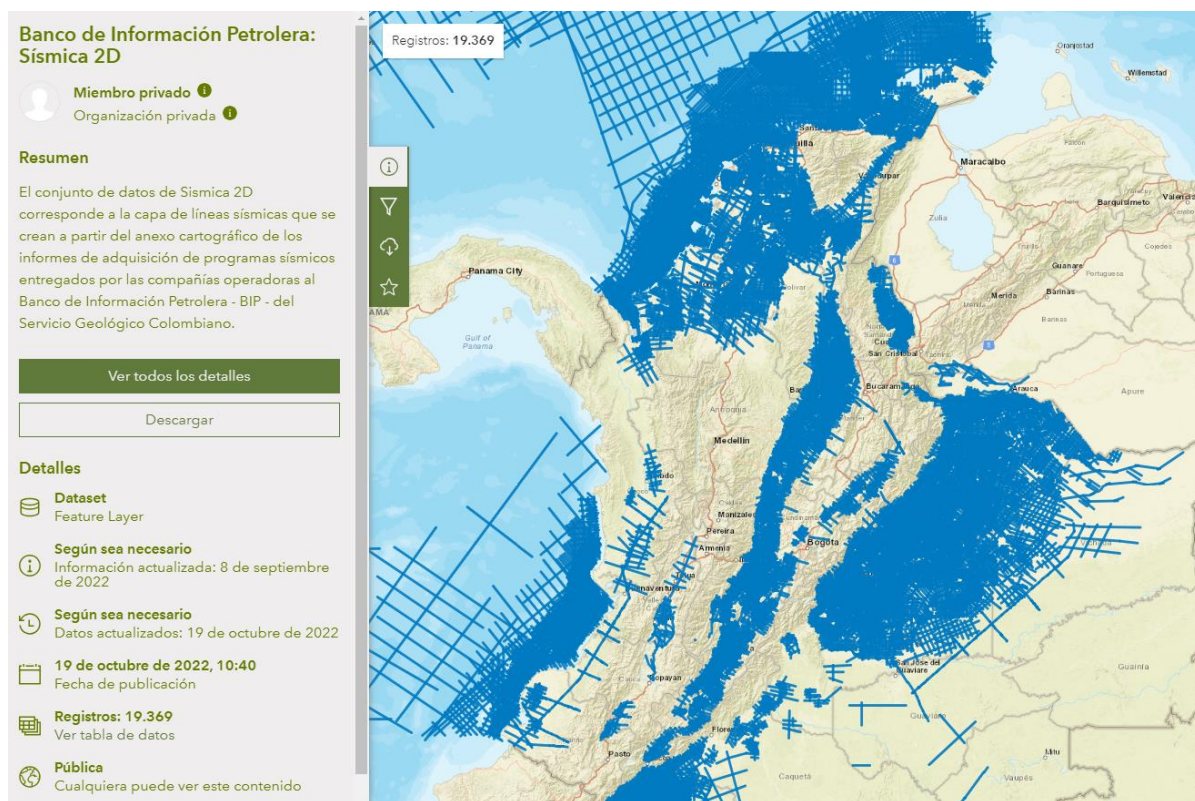


<sup>11</sup> <https://geovisor.anh.gov.co/tierras/>

Así mismo, se puede señalar al <sup>12</sup>Banco de Información Petrolera (BIP), el cual es el repositorio oficial de Colombia con la función de recibir, preservar, cargar, custodiar y administrar la información técnica resultante de las actividades de Exploración y Producción de Hidrocarburos en el país. En las figuras 6 y 7 se alcanza a observar el cubrimiento sísmico que se tiene tanto en programas sísmicos 2D como en Sísmica 3D.

**Figura 7.**

*Información Sísmica 2D en Colombia*<sup>13</sup>



<sup>12</sup> <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/BancoInformacionPetrolera/Paginas/banco-de-informacion-petrolera.aspx>

<sup>13</sup> [https://datos.sgc.gov.co/datasets/cc3fdb59c91f4351ab2d5ecd943c0f6b\\_0/explore?location=6.498556%2C-74.063710%2C6.59](https://datos.sgc.gov.co/datasets/cc3fdb59c91f4351ab2d5ecd943c0f6b_0/explore?location=6.498556%2C-74.063710%2C6.59)

**Figura 8.**

*Información Sísmica 3D en Colombia*<sup>14</sup>



#### 4.1.5 Información de pozo

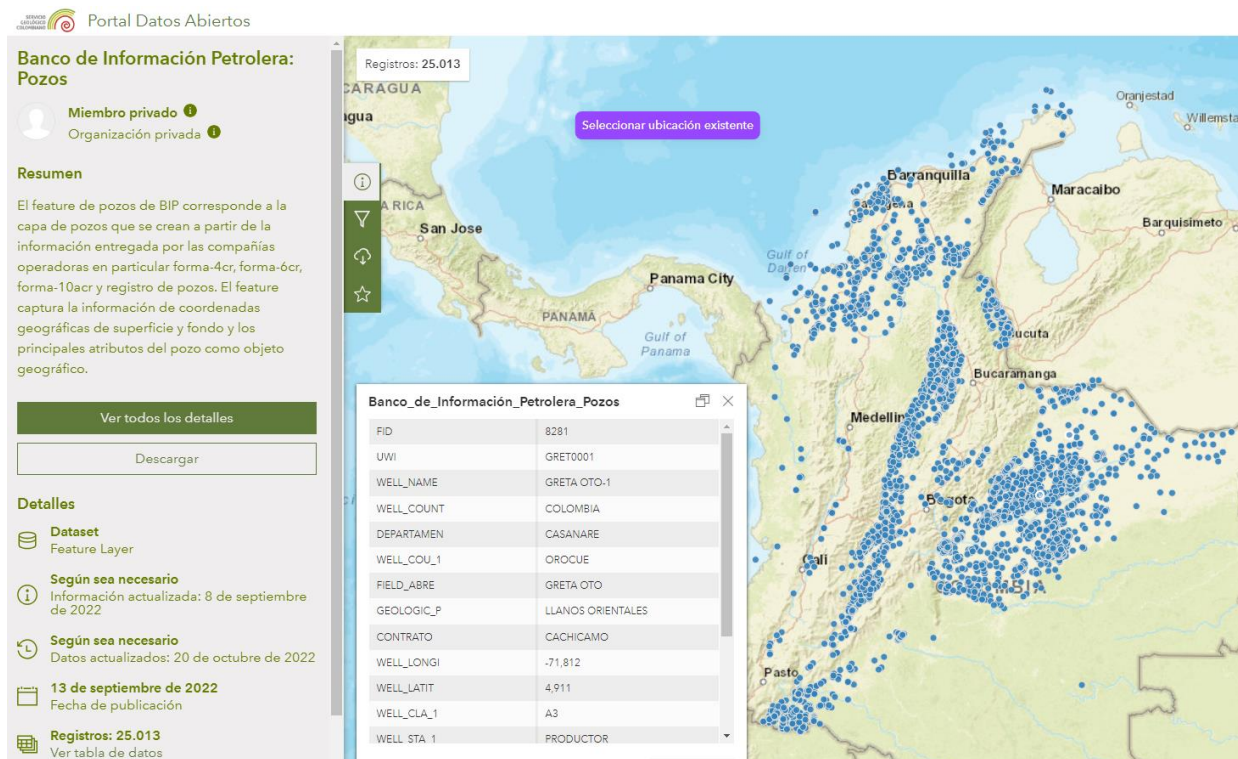
La geología de subsuelo se puede conocer a través de la perforación de pozos exploratorios y de avanzada, por medio de las muestras de zanja, registros eléctricos, muestras de pared entre otros. En el Banco de Información Petrolera se consigue la información entregada por las compañías operadoras en particular: formas 4CR, forma-6CR, Forma-10 ACR y registros de pozo<sup>8</sup>. En la figura 8, se puede identificar la información del feature layer: UWI, nombre, coordenadas geográficas de superficie y de fondo, a que campo corresponde, tipo de desviación, estado final y

<sup>14</sup>[https://datos.sgc.gov.co/datasets/cc3fdb59c91f4351ab2d5ecd943c0f6b\\_0/explore?location=6.498556%2C-74.063710%2C6.59](https://datos.sgc.gov.co/datasets/cc3fdb59c91f4351ab2d5ecd943c0f6b_0/explore?location=6.498556%2C-74.063710%2C6.59)

clasificación Lahee, entre los datos más relevantes. Cabe destacar, que la data de pozo nos proporciona información directa del subsuelo por medio de los registros eléctricos, registros de imágenes, muestras de roca o muestras de fluido entre otros que son una herramienta concluyente para la evaluación de yacimientos de hidrocarburo.

**Figura 9.**

*Información de pozo<sup>15</sup>*



<sup>15</sup> [https://datos.sgc.gov.co/datasets/55f871d861624b9996e865349ef67253\\_0/about](https://datos.sgc.gov.co/datasets/55f871d861624b9996e865349ef67253_0/about)

#### **4.1.6 Informes técnicos**

Con respecto a los informes técnicos, son una herramienta que permiten conocer el proceso y resultado de un proyecto, investigación o actividad de un tema específico o interdisciplinario; en el cual se agrupan las evidencias, se analizan y generan conclusiones y recomendaciones, por esta razón aportan información relevante sobre un tema que en nuestro caso permite disminuir el riesgo en alguna de las variables del análisis de prospectos de hidrocarburos. En consecuencia, son la base para la evaluación de un área prospectiva.

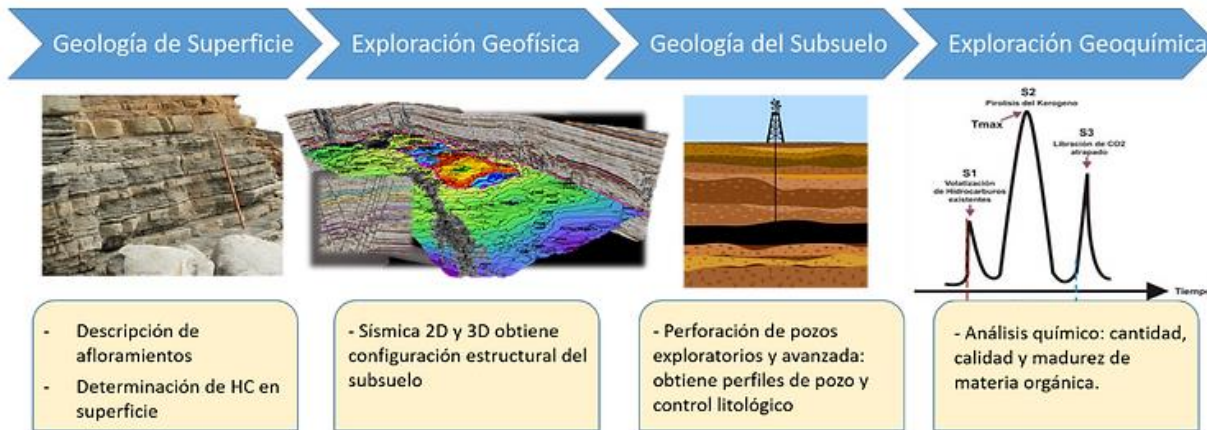
Al realizar una evaluación integral de toda la información disponible del área se puede concluir dos cosas: primero, la presencia de uno o varios prospectos, los cuales fueron identificados por medio de diversos factores como son: geológicos, geofísicos y de ingeniería y segundo, la necesidad de disminuir el riesgo de incertidumbre por medio de la adquisición de nueva información técnica que nos permita precisar la existencia, tamaño y calidad del prospecto identificado.

#### **4.2 Adquisición de Información**

Es importante considerar que la adquisición de información debe ser limitada a nuestro objetivo, en otras palabras, que las dudas o incertidumbres que se posean de una variable realmente se puedan resolver con el método seleccionado.

**Figura 10.**

*Técnicas de Geología de exploración en Hidrocarburos* <sup>16</sup>



El Análisis Geológico comprende la geología regional y local, eso quiere decir, conocer la historia geológica de la región, los eventos tectónicos, las características estructurales y/o sedimentarias. Identificar las trampas geológicas, si son de tipo estructural o sedimentario, conocer la roca fuente y el reservorio, tanto en su extensión, calidad, así como son sus propiedades físicas (permeabilidad, porosidad y saturación de fluidos, entre otras), como es el sello y sus características, el ambiente de formación y como fue la migración.

Por medio de los métodos geofísicos se puede identificar estructuras geológicas, definir cuerpos y como se encuentran las capas en subsuelo, a través de principios físicos como son:

- la **gravedad** donde el objetivo principal es medir anomalías en el campo gravitatorio de la tierra causadas por cambios en la densidad entre diferentes materiales.
- el **magnetismo**, investiga la geología de subsuelo partiendo de las anomalías en el campo magnético de la tierra como resultado de las propiedades magnéticas de las rocas

<sup>16</sup> <https://www.petroenergia.info/post/t%C3%A9cnicas-de-geolog%C3%ADa-de-campos-para-la-optimizaci%C3%B3n-operacional-en-la-industria-petrolera>

suprayacentes, esto es la diferencia que existe entre el valor del campo magnético en un sitio determinado y su valor teórico.

- *la electricidad*, el método de prospección geoelectrica consiste en la medición de resistividades aparentes de los materiales de subsuelo. Principalmente, se ha utilizado para la identificación de fluidos y la detección de acuíferos.
- *Las ondas sísmicas*, el método sísmico, trabaja con las propiedades elásticas de las rocas, se basa en la distribución de velocidades sísmicas originadas por una fuente controlada (explosión o vibradores), tales ondas se propagan en las capas del subsuelo y son reflejadas hacia la superficie por las discontinuidades encontradas, y son registradas por geófonos, la velocidad sísmica aumentara en aquellos materiales de mayor densidad permitiendo distinguir entre distintos tipos de materiales en contacto.

Otro instrumento para conocer el subsuelo es la geoquímica, ella permite estudiar la composición química de la tierra y los procesos químicos que ocurren en ella, desde el punto de vista de exploración, identifica la concentración de elementos químicos en las rocas y minerales, aporta información sobre la formación de las rocas, los procesos geológicos que las afectan y las condiciones ambientales en el tiempo geológico, tanto para la roca fuente, la roca reservorio como el sello.

### 4.3 Interpretación

Con base a todo a la información disponible, se realiza la integración e interpretación de datos con el objetivo de efectuar la caracterización de un sistema petrolífero, eso quiere decir, se identifican la roca madre, el reservorio, la roca sello y la trampa; adicionalmente, debe existir

migración de fluidos y timing. Como resultado de este análisis, se obtiene una geometría espacial del prospecto y se determinan sus reservas. Finalmente, se realiza un cálculo del riesgo geológico en Inglés (Probability of success – POS), en la cual se evalúa la probabilidad de éxito de cada una de las variables anteriormente nombradas.

Tabla 1.

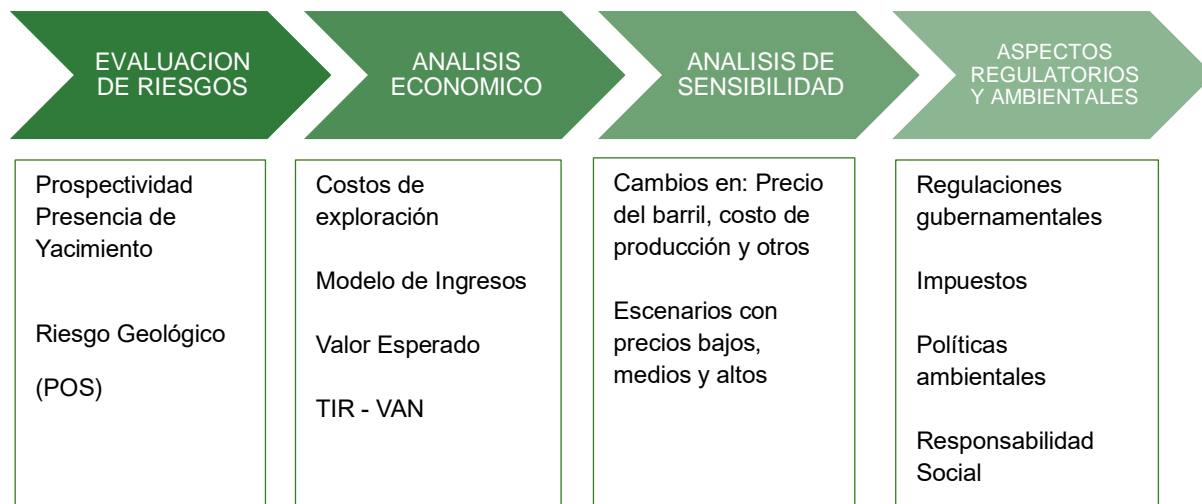
Riesgo Geológico para evaluación de un prospecto

| BLOQUE _____ (Cuenca _____)   |   |  |                            |   |
|---|---|--|----------------------------|---|
| RESUMEN PARA EVALUACION CONJUNTA DEL RIESGO GEOLOGICO   |   |  |                            |   |
| RESUMEN POZO _____  |   |  |                            |   |
| Este prospecto tiene como objetivo _____  |   |  |                            |   |
| El proyecto está cubierto con sísmica _____   |   |  |                            |   |
| Respecto a sistema petrolífero _____  |   |  |                            |   |
| Esta estructura está localizada _____   |   |  |                            |   |
| ELEMENTOS GEOLÓGICOS  | COMPONENTES   |  | CALIFICACION I, P, F, B, E | PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL ELEMENTO |
|   |   |  |                            | 0,1 a 1,0                               |
| ROCA RESERVORIO (R)   | 1. Suficiente espesor neto con características de reservorio.<br>2. Porosidad y permeabilidad efectivas.                                    |  |                            |   |
| TRAMPA (T)  | 1. Confabilidad en la existencia de trampa.<br>2. Presencia de un mecanismo efectivo de sello   |  |                            |   |
| CARGA DE HIDROCARBUROS (C)  | 1. Suficiente volumen de roca generadora madura para el llenado de estructuras.<br>2. Ocurrencia de migración en timing hacia el prospecto. |  |                            |   |
| RETENCION Y CALIDAD DE LA ACUMULACION (R1)  | 1. Preservación del hidrocarburo de la estructura en el tiempo<br>2. Calidad del hidrocarburo   |  |                            |   |
| PROBABILIDAD DE HALLAZGO (POS)  | $P_h = P_{(R)} \times P_{(T)} \times P_{(C)} \times P_{(R1)}$   |  |                            | 0.00                                    |
| <p>** El componente más débil determina la probabilidad de existencia del elemento</p> <p>(Excelente) 0,88 a 1,0 La información directa confirma la existencia del elemento; datos excelentes.</p> <p>(Buena) 0,68 a 0,85 Interpretación muy probable. La calidad de los datos de control es buena.</p> <p>(Favorable) 0,48 a 0,65 Condición posible. Interpretación favorable; datos limitados, concepto válido.</p> <p>(Pobre) 0,28 a 0,45 Datos de control pobres a regulares; concepto válido pero datos disponibles no son concluyentes.</p> <p>(Improbable) 0,1 a 0,25 La información confirma la ausencia de un elemento, o se conoce que este no existe en el área.</p> |   |  |                            |   |

#### 4.4 Análisis Económico

El análisis económico es uno de los pilares más importantes en la exploración de hidrocarburos, debido a que evalúa la viabilidad y rentabilidad de un proyecto, es allí donde se realiza el análisis de costos, evalúan riesgos y se contemplan los beneficios que se obtiene si el proyecto es exitoso.

**Figura 11.** *Etapas en un análisis Económico*



#### 4.5 Perforación Pozo exploratorio

La perforación del pozo exploratorio es una operación fundamental después de la obtención del prospecto por medio de la interpretación de la información del área y de la evaluación económica del proyecto; uno de los resultados aportados por él, es manifestar la presencia de hidrocarburos y evaluar el potencial de producción de petróleo o gas del área. Podemos concluir, que esta etapa abre las puertas del desarrollo a un área geográfica específica.

En esta operación se aplican diferentes fases a nivel técnicos con sus respectivos análisis económico, los más relevantes son:

**Figura 12.**

*Fases perforación de Pozo*



Así mismo, es importante tener en cuenta los permisos y licencias gubernamentales que permiten la perforación de pozos en Colombia. El estudio de Impacto ambiental (EIA), tiene como principal objetivo evaluar los efectos ambientales, sociales y económicos de un proyecto en un área del territorio, en nuestro caso, la perforación de un pozo; allí se encuentra información precisa y relevante del impacto ambiental que se generaría y las propuestas para la mitigación de este impacto y a su vez permite conocer y ejecutar los impactos positivos del proyecto. Es decir, este estudio permite realizar la operación de una forma responsable y sostenible minimizando el impacto negativo con el medio ambiente y las comunidades.

#### **4.6 Análisis de Ingeniería**

Después de la evaluación del pozo exploratorio se continua con un análisis exhaustivo donde el objetivo primordial es implementar el mejor sistema de producción para los pozos de avanzada y desarrollo, teniendo en cuenta lo siguiente: el yacimiento encontrado y el tipo de hidrocarburo a producir, con base en las pruebas de formación, análisis a los datos aportados por el pozo durante su perforación y completamiento.

Adicionalmente, se optimiza la perforación tanto desde el punto de vista operativo como es: la selección del equipo, diseño de pozo, tubería entre otros y desde el punto de vista económico, planteamiento de campañas, desde su localización hasta los costos en diversos servicios durante la operación tanto para la perforación, completamiento y fase de producción y el análisis de rentabilidad.

De igual forma, se tiene en cuenta la implementación de los permisos ambientales para el desarrollo de la operación, así como las normativas legales tanto locales como regionales desde ese punto de vista de seguridad, salud y ambiental.

Teniendo en cuenta todo lo anterior expuesto, esta fase es uno de los pilares de la exploración que permite garantizar la producción de hidrocarburo de una forma segura, eficiente y rentable, que continuamente está en monitoreo, evaluación y actualización para cumplir sus objetivos.

#### **4.7 Evaluación Económica**

Es el ultimo pilar de la fase de exploración, mediante el cual se determina si los resultados del pozo, la información del prospecto: tipo de yacimiento, tamaño y calidad y la evaluación de

ingeniería indican si el proyecto es viable desde el punto de vista económico, es decir, si las ganancias generadas justifican los costos de la inversión.

Los aspectos para tener en cuenta son los siguientes:

- A. Estimación de Reservas
- B. Costos de Perforación-Producción
- C. Precios del mercado (BRENT-WTI)
- D. Tazas de producción y declinación
- E. Evaluación de Riesgo
- F. Métricas de Evolución Económica
  - i. Valor presente Neto (VPN)
  - ii. Tasa Interna de retorno (TIR)
  - iii. Periodo de recuperación de la inversión (PRI)
  - iv. Índice de Rentabilidad (IR)

En conclusión, el proceso de exploración de hidrocarburos es fundamental para descubrir y evaluar nuevas áreas prospectivas en una región determinada. Para obtener los resultados esperados es necesario la interacción de diferentes profesionales que permitan fortalecer cada pilar, se deben considerar múltiples variables y riesgos que intervienen en la ejecución de cada una de estas etapas descritas y permitan tomar decisiones asertivas para el correcto desarrollo del proyecto desde el punto de vista seguro, eficiente y rentable, para ello es recomendable realizar monitoreos y una continua estimación a cada fase del proyecto tanto técnico como económica.

## 5. GEOTERMIA

### 5.1 Definiciones

*La geotermia* es una forma de energía renovable, que puede definirse como el calor que es producido internamente en la tierra y se transfiere a la superficie (Marzolf, 2014). A medida que se profundiza hacia el interior de la tierra se encuentran temperaturas más altas. Esto se puede observar, por ejemplo, cuando hay agua caliente o vapor de agua en la superficie, como geiser o las fuentes termales y cuando se observan las variaciones de temperatura en los procesos de perforación de pozos de hidrocarburos.

Etimológicamente, Geotermia es una palabra de origen griego donde GEO (tierra) y THERMOS (Calor), literalmente el calor de la tierra. Además, se relaciona con la ciencia que estudia las anomalías de temperatura en el interior de la tierra.

*Gradiente Geotérmico*: el termino se refiere a como varia la temperatura con relación a la profundidad y se expresa en °C/Km. También se ha descrito como el incremento de temperatura al interior de la tierra.

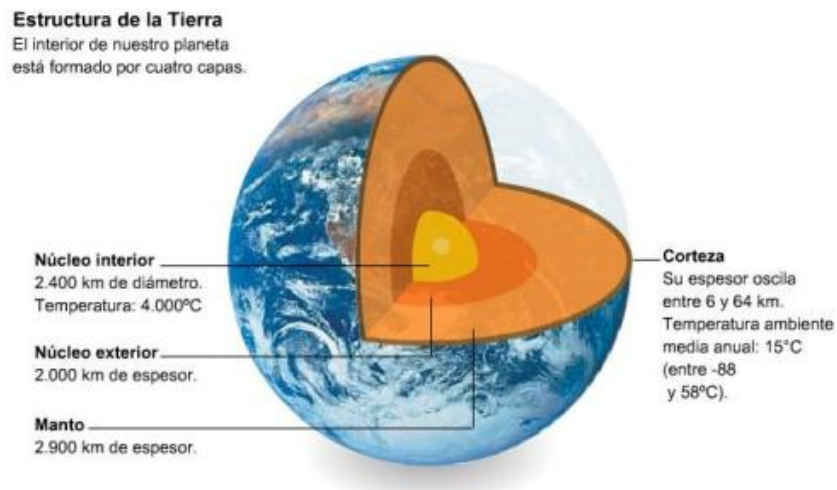
Al analizar la capa más externa del globo – La Corteza- se aprecia el incremento de temperatura que se experimenta al penetrar hacia las partes más interiores de la misma debido al calor que la Tierra desprende hacia su exterior. Se ha observado en la mayor parte del globo y es de 2.5 – 3 °C por cada cien metros, es decir, este incremento es de 25 a 30 °C por cada mil metros

de profundidad; a veces este valor se ve aumentado cuando se encuentra cerca de zonas volcánicas (IDAE & IGME, 2008).

En la siguiente figura se observan tres partes que constituyen el globo terrestre: núcleo, manto y corteza. La parte más interna el Núcleo, se ha determinado que está formada fundamentalmente por hierro fundido y su temperatura supera los 4000 °C. El manto, que es la zona intermedia, de aproximadamente 2900 Km de espesor, está formado por silicatos de hierro y magnesio y su temperatura varía desde 800 – 1000 °C en su parte exterior y los 4000 °C en el contacto con el núcleo. Finalmente, la zona más externa de la tierra, la Corteza, a la que tenemos acceso directamente, de espesor variable entre 5 – 35 Km aproximadamente, está formada por silicatos aluminicos y magnésicos. Su temperatura va desde 15 – 20°C de la superficie hasta 600 – 800 °C en el contacto con el manto (ESMAP, 2012).

**Figura 13.**

*Esquema de la estructura de la tierra y rangos de temperatura<sup>17</sup>*



<sup>17</sup> <https://www.mem.gob.gt/wp-content/uploads/2012/04/Catalogo-final...versi%C3%B3n-DER-12032015.pdf>

Zonas geológicamente activas como son las zonas de creación de corteza o dorsales oceánicas y las zonas de desaparición de corteza o subducción donde se produce terremotos, erupciones volcánicas y fracturas que son señales de la tectónica del globo, originada por los flujos de calor desde el interior de este. En estas zonas los valores de flujo geotérmico son notablemente anómalos y constituyen zonas de gran interés geotérmico (IDAE & IGME, 2008)

Por medio de la figura 14, se puede concluir que hay dos tipos de flujo de calor y estos son debidos a su origen y están relacionados con la tectónica de placas.

**Figura 14.**

*Estructura interna de la tierra y repartición de flujos caloríficos*<sup>18</sup>



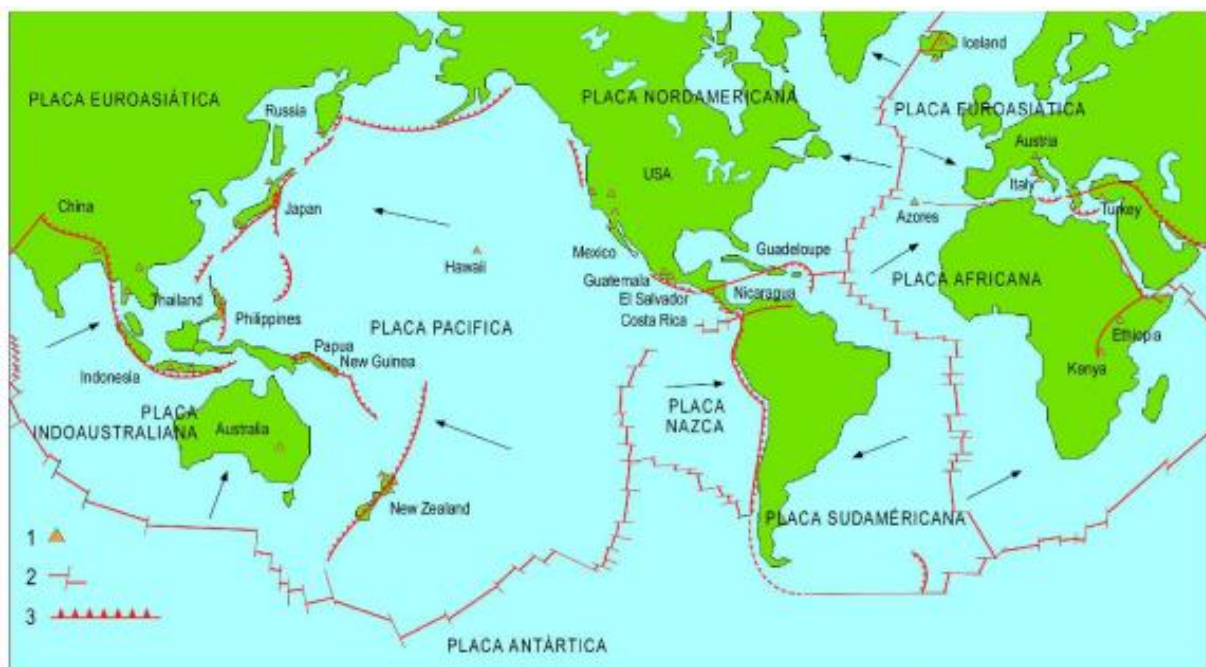
<sup>18</sup> <https://www.igme.es/geotermia/La%20energ%EDa%20geot%E9rmica.htm>

Los márgenes de las placas corresponden a zonas de corteza débiles y densamente fracturadas, caracterizadas por una intensa sismicidad, por un gran número de volcanes y por un alto flujo de calórico terrestre, debido al ascenso de materiales muy calientes hacia la superficie.

En la siguiente figura se observan las áreas geotermiales más importantes, estas se ubican alrededor de los márgenes de placas; las flechas muestran dirección del movimiento de las placas hacia las zonas de subducción, los triángulos simbolizan campos geotérmicos que producen electricidad; Dorsales meso-oceánicas cruzadas por fallas transcurrentes y por ultimo las zonas de subducción, donde la placa subducida se inclina hacia abajo y se funde en la astenosfera.

**Figura 15.**

*Placas litosféricas, dorsales oceánicas, fosas oceánicas y zonas de subducción<sup>19</sup>*



<sup>19</sup> [http://www.lis.edu.es/uploads/812fe7d1\\_d505\\_4825\\_9db3\\_8438d78a406c.pdf](http://www.lis.edu.es/uploads/812fe7d1_d505_4825_9db3_8438d78a406c.pdf)

**La conductividad térmica** es una propiedad característica de cada material que indica su capacidad para conducir calor. Se expresa en  $W/m^{\circ}C$ .

**El flujo de calor** se describe como el movimiento de calor (energía desde el interior de la tierra a la superficie. Se calcula multiplicando el gradiente geotérmico por la conductividad térmica de las rocas. es decir flujo de energía en forma de calor, por unidad de superficie y por unidad de tiempo y se expresa  $W/m^2$ .

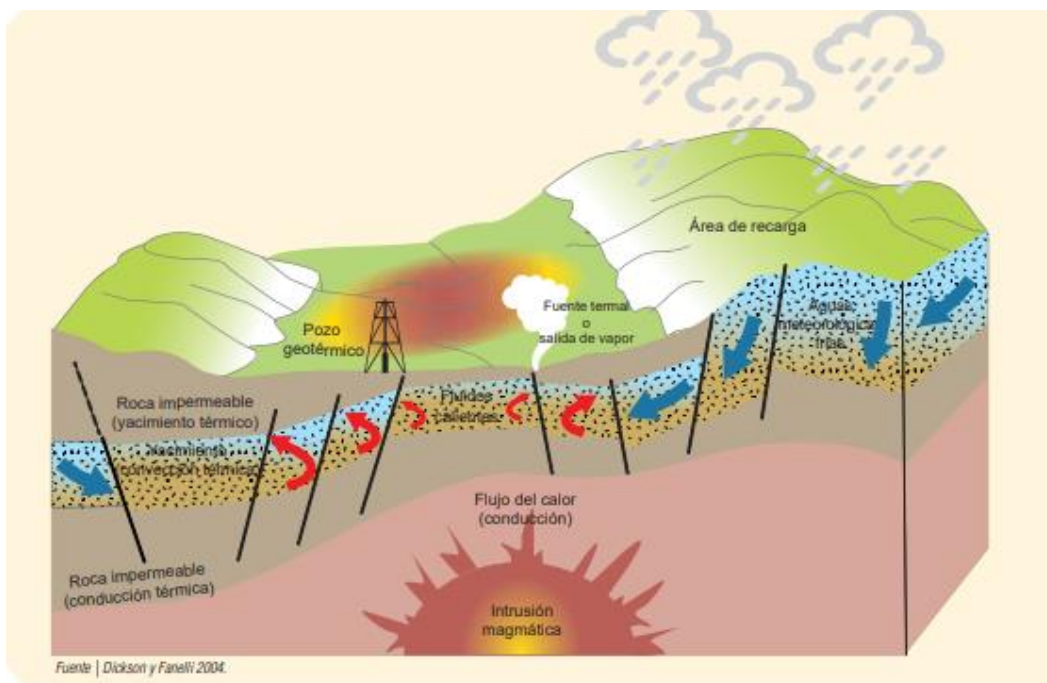
**Los sistemas geotérmicos** son un conjunto de elementos naturales que se pueden presentar en una misma área o campo geotérmico y de la cual se pueden extraer fluidos geotérmicos con diferentes fines (ver figura 16). Los principales componentes de estos sistemas según Marzolf, (2014) son los siguientes:

- A. Fuente de calor: puede ser; una roca caliente que ha incrementado su temperatura por contacto con un cuerpo volcánico intrusivo; una cámara magmática o gases calientes de origen magmático. Generalmente la fuente de calor presenta temperaturas mayores a los  $600^{\circ}C$ . Estas fuentes se pueden encontrar a diferentes profundidades, mayores a dos kilómetros.
- B. Reservorio geotérmico: formación de rocas permeables, donde circula el fluido geotérmico a profundidades económicamente explotables. Conocido también como yacimiento geotérmico.
- C. Sistema de suministro de agua: sistema de fallas o diaclasas en las rocas que permiten la recarga del reservorio geotérmico con el agua que se infiltra en el subsuelo. Este flujo reemplaza los fluidos que salen del reservorio en forma de manantiales termales o aquellos que son extraídos a través de pozos.

- D. Capa sello: estrato impermeable, generalmente compuesto por arcillas (esmectita o montmorillonita) producto de la alteración de las rocas por alta temperatura, que cubre el reservorio, lo contiene y evita la pérdida de agua y vapor.
- E. Fluido geotérmico: se denomina así al agua, en su fase líquida, de vapor o en combinación, que se encuentra en el reservorio geotérmico y que puede aflorar a la superficie de manera natural mediante manantiales de aguas termales o pozos geotérmicos. Estos fluidos a menudo contienen sustancias químicas disueltas como cloruros (Cl), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), sulfatos (SO<sub>4</sub>) y sales minerales.

**Figura 16.**

*Esquema de un sistema geotérmico ideal<sup>20</sup>*



<sup>20</sup> Dickson, M.H. y Fanelli, M Geothermal Energy.

En la figura 16 se representa un modelo conceptual de un sistema geotérmico hidrotermal, el cual involucra una fuente de calor primaria, que en la mayoría de los campos geotérmicos de origen magmático es una cámara magmática, en la cual el magma proviene del manto y no alcanza a llegar a la superficie, quedando alojado a profundidades entre 5 y 10 km, en donde se calientan grandes volúmenes de roca y los fluidos confinados en el reservorio (principalmente fluidos pluviales y magmáticos), los cuales dan origen a la formación de los sistemas geotérmicos con temperaturas mayores a los 200°C (Dickson, M y Fanelli M, 2005).

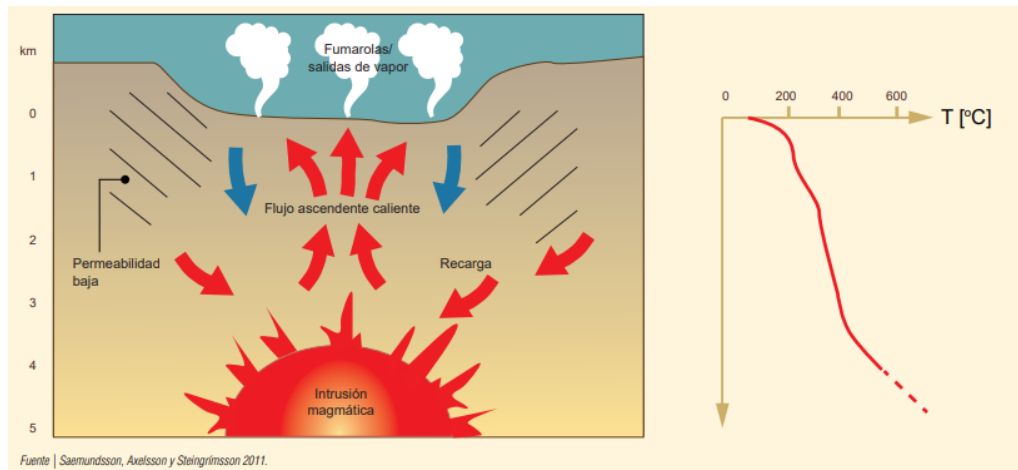
## 5.2 Clasificación de los sistemas geotérmico

Esta se realiza de acuerdo con la fuente de calor, el tipo de transferencia de calor, la temperatura del yacimiento, el estado físico, la utilización y el escenario geológico y las categorías son las siguientes (ESMAP, 2012):

- I. Sistema geotérmico volcánico: Este está asociado a la actividad volcánica, las fuentes de calor son instrucciones calientes o magma, con mayor frecuencia se les sitúa dentro o cerca de complejos volcánicos, tales como calderas, límites de placas.

**Figura 17.**

*Modelo conceptual de un campo de alta temperatura dentro de un sistema de cordillera volcánica<sup>21</sup>*

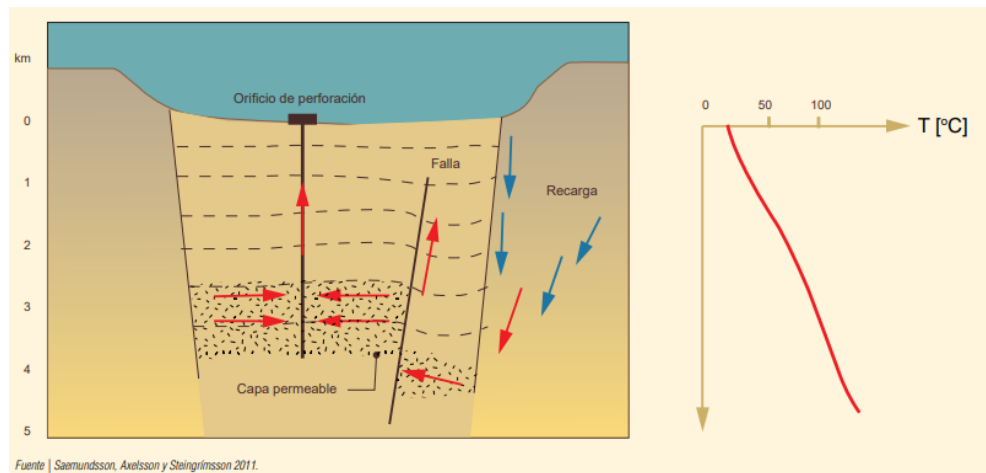


- II. En sistemas convectivos de fracturas controladas la fuente de calor es la costra caliente a profundidad en las áreas tectónicamente activas, con flujo de calor por encima del promedio. Aquí el agua geotérmica ha circulado hasta una profundidad considerable (> 1 km), la mayoría a través de fracturas verticales, para “cosechar” el calor de las rocas.
  
- III. Los sistemas geotérmicos sedimentarios se encuentran en muchas de las principales cuencas sedimentarias del mundo. Estos sistemas le deben su existencia a la formación de capas sedimentarias permeables a grandes profundidades (> 1 km) y gradientes geotérmicos arriba del promedio (> 30 °C/km). Estos sistemas son conductivos en naturaleza más bien que convectivos, aun cuando las fracturas y fallas desempeñen un papel en algunos casos., como se observa en la siguiente figura:

<sup>21</sup> [https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP\\_GEOTHERMAL\\_Spanish\\_book\\_Optimized.pdf](https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP_GEOTHERMAL_Spanish_book_Optimized.pdf)

**Figura 18.**

*Figura Esquemática de una cuenca sedimentaria con Yacimiento geotérmico a una Prof. de 2 a 4 Km<sup>22</sup>*



IV. Los sistemas geopresurizados son análogos a yacimientos de petróleo y gas geopresurizados en los que el fluido atrapado en trampas estratigráficas puede tener presiones cercanas a los valores litostáticos. Este tipo de yacimientos se ha conocido debido a las explotaciones petrolíferas en cuencas sedimentarias con un gradiente geotérmico normal, donde la temperatura del agua subterránea es superior a 150°C y se encuentra a una profundidad por sobre los 6.000 m. Estos yacimientos son característicos en cuanto a que el agua del acuífero está sometida a presiones entre 40 a 90% por sobre la presión hidrostática que correspondería a la profundidad que se encuentran. De igual manera presentan grandes cantidades de metano disuelto en el agua subterránea. Estos yacimientos ofrecen tres tipos de energía: Térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluidos a muy alta presión) (Sánchez, et al. 2011).

<sup>22</sup> [https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP\\_GEOTHERMAL\\_Spanish\\_book\\_Optimized.pdf](https://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP_GEOTHERMAL_Spanish_book_Optimized.pdf)

- V. Los sistemas geotérmicos de roca seca caliente (HDR) o mejorados (con diseño de ingeniería) (EGS) consisten en volúmenes de roca que se han calentado mediante volcanismo o flujo de calor anormalmente alto (es decir hay proximidad de cámaras magmáticas en áreas volcánicas), pero que tienen baja impermeabilidad o son prácticamente impermeables y mediante técnicas de fracturación artificial e inyección de fluido se consigue establecer un circuito geotérmico con inyección de agua y extracción de vapor que es utilizado para la generación de electricidad (Sánchez, et al. 2011).

### 5.3 Clasificación de Yacimientos Geotérmicos

Dickson & Fanelli (2005) indican que el criterio más común para clasificar los recursos geotérmicos es, sin embargo, el basado en la **entalpía** de los fluidos geotermiales que actúan como medio de transporte desde las rocas calientes en profundidad hasta la superficie. La entalpía, puede considerarse más o menos proporcional a la temperatura, este término se utiliza para expresar el contenido de calor (energía térmica) de los fluidos y da una idea de su “valor”. Técnicamente esta descrita como la cantidad de energía térmica que un fluido o un objeto, puede intercambiar con su entorno. Se expresa en KJ/Kg o en Kcal/Kg.

Los recursos geotérmicos se dividen en baja, media y alta entalpía (o temperatura), de acuerdo con criterios basados generalmente en la energía contenida en los fluidos y en sus posibles formas de utilización. En la siguiente tabla se resume lo propuesto por diversos autores:

**Tabla 2.**

*Clasificación de fuentes geotermales basada en temperatura °C. Tomado de Dickson & Fanelli (2005)*

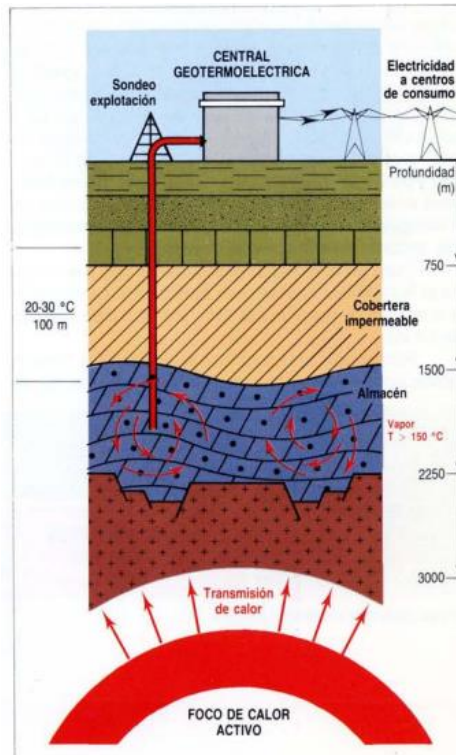
|                                    | Muffler and<br>Cataldi (1978) | Hochstein<br>(1990) | Benderitter and<br>Cormy (1990) | Nicholson<br>(1993) | Axelsson and<br>Gunnaugsson (2000) |
|------------------------------------|-------------------------------|---------------------|---------------------------------|---------------------|------------------------------------|
| Low enthalpy<br>resources          | <90                           | <125                | <100                            | ≤150                | ≤190                               |
| Intermediate<br>enthalpy resources | 90–150                        | 125–225             | 100–200                         | —                   | —                                  |
| High enthalpy<br>resources         | >150                          | >225                | >200                            | >150                | >190                               |

Con base a la anterior tabla y los conceptos aplicados por estos autores, se describen así:

**Yacimientos de alta temperatura** se encuentran en zonas activas de la corteza, la temperatura se encuentra en rangos de 150 y 400°C. Se debe tener una capa superior compuesta por una cobertura de rocas impermeables (sello), un acuífero o depósito de permeabilidad elevada entre 0.3 y 3 Km de profundidad; un suelo fracturado que permite una circulación de fluidos de convección, y por lo tanto la transferencia de calor de la fuente a la superficie y una fuente de calor magmático, entre 3 y 15 Km de profundidad a 500 – 600 °C. (Sauders, 2014)

**Figura 19.**

*Yacimiento geotérmico de alta entalpia<sup>23</sup>*



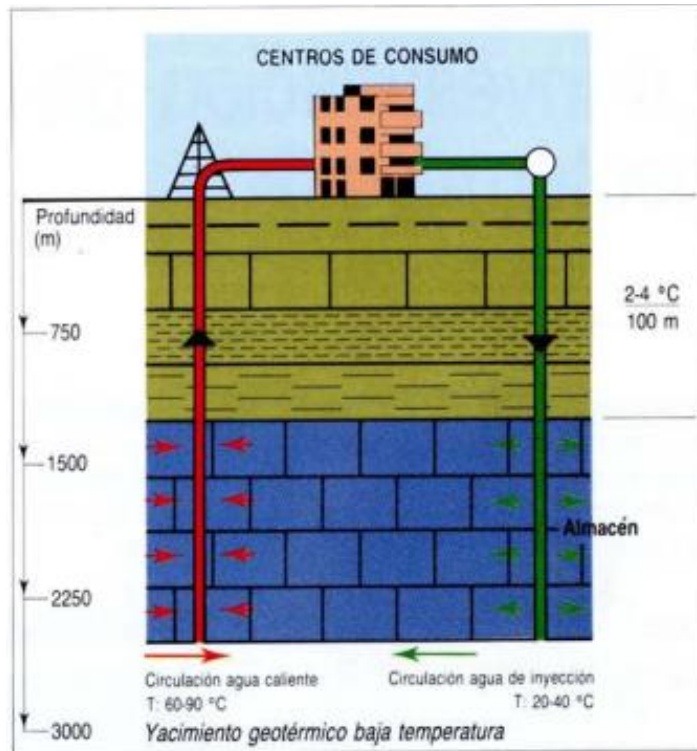
**Los yacimientos de media temperatura**, son aquellas en que los fluidos de los acuíferos están a temperaturas menos elevadas, normalmente entre 70 y 150 °C. Por consiguiente, la conversión vapor - electricidad se realiza con un rendimiento menor, y debe explotarse por medio de un fluido volátil (Sauders, 2014).

**Los yacimientos de baja temperatura**, es aprovechable en zonas más amplias que las anteriores; por ejemplo, en todas las cuencas sedimentarias. Es debida al gradiente geotérmico. Los fluidos están a temperaturas de 50 a 70 °C. (Sauders, 2014).

<sup>23</sup> La energía geotérmica (IGME,2006)

**Figura 20.**

*Yacimiento geotérmico de baja entalpia<sup>24</sup>*



Los yacimientos de muy baja temperatura se consideran cuando los fluidos se calientan a temperaturas comprendidas entre 20 y 50 °C. Esta energía se utiliza para necesidades domésticas, urbanas o agrícolas, como la climatización geotérmica (bomba de calor geotérmica). (Sauders, 2014).

<sup>24</sup> La energía geotérmica (IGME,2006)

Sánchez J et al (2011) indica que un yacimiento Geotérmico, es el espacio físico en el interior de la corteza terrestre con unas determinadas condiciones geológicas, en que se sitúa un recurso geotérmico cuya explotación es económicamente viable.

#### **5.4 Historia de la Geotermia**

Para la humanidad la energía siempre ha sido una necesidad importante por resolver, por lo que, desde los primeros siglos, se han explorado diversas formas de generar energía para el beneficio de la sociedad.

Uno de los campos más avanzados es la generación de energía a partir de los combustibles fósiles, la cual ha evolucionado a pasos agigantados en el último siglo, esto ha permitido hoy en día tener una industria muy robusta, la cual genera más del 80 % de energía primaria a nivel mundial. Sin embargo, este progreso también ha generado consecuencias lamentables como es la contaminación derivada de la emisión de gases que ayudan al efecto invernadero. Uno de los contaminantes más perjudiciales que más afecta al planeta es la emisión de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Este sistema energético es el más consumido en el planeta, pero también es el que más contamina, aporta casi dos tercios de las emisiones globales de CO<sub>2</sub>, sin olvidar que la explotación de hidrocarburos contribuye significativamente a la contaminación ambiental.

Ante esta situación, ahora el mundo coloca sus ojos en las energías renovables las cuales tiene como principal objetivo reducir la contaminación. En este contexto, la energía Geotérmica ha tomado gran importancia en las últimas décadas a nivel mundial, considerándose una fuente de

energía sostenible y respetuosa con el medio ambiente. Esto ha impulsado su investigación, conocimiento y aplicabilidad en numerosos países.

La energía geotérmica no es un concepto nuevo para la sociedad; desde las antiguas civilizaciones, por ejemplo, los romanos la han aprovechado. Estos utilizaban las aguas termales y los geiseres para cocinar y construir baños en zonas de actividad geotérmica y también desarrollaron el sistema de calefacción subterránea.

Según los registros históricos, fue a principios del siglo XIX cuando se empezó a utilizar la energía geotérmica para la generación de electricidad. En 1904, el príncipe Piero Ginori Conti probó la primera central geotérmica en el mismo Larderello, Italia, con la que pudo iluminar cinco bombillas, producía electricidad utilizando el vapor proveniente de yacimientos geotérmicos.<sup>25</sup>

Desde entonces y a lo largo del siglo XX y XXI, se ha observado un gran crecimiento y desarrollo en la utilización de la energía geotérmica para la generación de electricidad a una escala mundial. En 1942, la capacidad geotermoeléctrica instalada alcanzó los 127.650 kW pronto, varios países siguieron el ejemplo de Italia; en 1919 los primeros pozos geotermiales de Japón fueron perforados en Beppu, seguidos en 1921 por pozos perforados The Geysir, California, USA, y en el Tatio, Chile.<sup>20</sup>

En 1958, entró en operación una pequeña planta geotermoeléctrica en Nueva Zelandia, en 1959 otra en México, en 1960 en USA. Posteriormente, otros países en los años siguientes comenzaron a desarrollar proyectos similares. Estas plantas aprovechan el calor del subsuelo para generar vapor que, a su vez, mueven turbinas para generar electricidad. Además, se popularizó el uso de bombas de calor geotérmicas para calefacción y refrigeración de edificios, estos sistemas

---

<sup>25</sup> La energía geotérmica (IGME,2006)

fueron más eficientes y mostraron que reducen significante las emisiones de gases de efecto invernadero.<sup>26</sup>

Es evidente que en el último siglo el uso de la energía geotérmica ha experimentado un crecimiento a nivel mundial, lo cual se refleja en el aumento en el número de países que la utilizan de forma directa como una energía sostenible. Además, se debe mencionar que los avances tecnológicos han permitido mejorar la eficiencia en la generación de electricidad, así como ampliar su campo de aplicabilidad.

## 5.5 Geotermia en el mundo

La geotermia se ha convertido en un pilar importante en el suministro energético del mundo, la cual se ha posicionado allí, gracias a su continua evolución con el pasar de los años y por ser una fuente de energía sostenible y amigable con el medio ambiente. Actualmente, se utiliza para generar electricidad, calefacción y refrigeración, sobre todo en los países que poseen estaciones bien definidas. En invierno, se emplea para calentar mientras que, en verano para refrigerar, lo que ha permitido reducir el consumo hidrocarburos y, en consecuencia, disminuir las emisiones de dióxido de carbono a la atmosfera.

Hay dos términos claves al y hablar sobre energía geotérmica, ellos son: **capacidad instalada** y **el uso**. La capacidad instalada se expresa en megavatios (MWt) o Gigavatios (GWt), indica la cantidad máxima de energía que una planta geotérmica puede producir en un momento dado. El uso, por otro lado, se mide en Tera julios (TJ) por año, es decir refleja la cantidad de

---

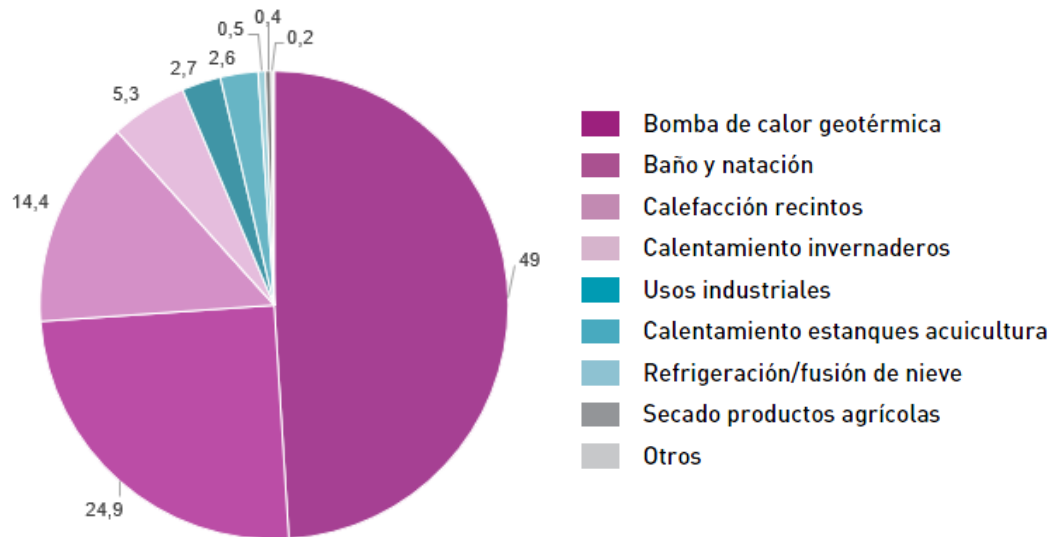
<sup>26</sup> <https://estudiarenergiasrenovablesonline.es/historia-de-la-energia-geotermica/>

energía geotérmica aprovechada en un periodo de tiempo determinado. Esta métrica es crucial para comprender la contribución total de energía geotérmica a la matriz energética de un país, ya sea en la generación de electricidad, calefacción u otra aplicación.

Sánchez et al (2011), describen como se encuentra el panorama para la geotermia en el mundo según los datos disponibles a finales del 2009 con base al reporte de Lund J. W., Freeston, D.H. y Boyd. T.H (2010). El número de países que hacían uso de la energía geotérmica era de 78, con una capacidad instalada de 50.583 MWt. Esta última cifra sufrió un incremento de 78.9% respecto a los datos aportados en el 2005, lo cual mostraba un incremento anual medio de 12.33%. La energía térmica utilizada fue de 121.696 GWh/hora (438.071 TJ/año), lo que significa un 60.2% más que en el 2005, también se debe mencionar la bomba de calor geotérmica represento el 49% de los usos térmicos de esta energía, mientras el 24.9% se destina para usos balnearios y de calentamiento de piscinas y un 14.4 % calentamiento de recintos, en la siguiente figura se puede apreciar esta relación:

**Figura 21.**

*Modificada Energía Geotérmica utilizada en usos directos en el mundo (2010)<sup>27</sup>*



En lo referente a los diferentes usos de la energía Sánchez et al (2011), describen en la tabla 3 y tabla 4, un resumen para cada uno de ellos, de los valores de la capacidad instalada y energía térmica utilizada respectivamente durante los últimos 15 años. Es importante destacar que la generalización del uso de la bomba de calor geotérmica ha abierto la posibilidad de que esta energía pueda aprovecharse casi en cualquier lugar, tanto para calefacción como para refrigeración. De igual modo, su uso está siendo fomentado por la utilización de recursos de baja y media temperatura en centrales de generación combinada de electricidad y calor, donde aguas de temperatura inferior a 100 °C se hacen circular primero, a través de un ciclo binario (Rankine) para

<sup>27</sup> Evaluación del potencial de energía geotérmica 2010

producir electricidad y posteriormente, son empleadas como fuente de calor para diferentes aplicaciones.

**Tabla 3.**

*Evolución de la capacidad Instalada entre 1995 - 2010*<sup>20</sup>

| Usos                                | Capacidad instalada (MWt) |               |               |               |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------|---------------|---------------|
|                                     | 1995                      | 2000          | 2005          | 2010          |
| Bomba de calor geotérmica           | 1.854                     | 5.275         | 15.384        | 35.236        |
| Calefacción de recintos             | 2.579                     | 3.263         | 4.366         | 5.391         |
| Calentamiento invernaderos          | 1.085                     | 1.246         | 1.404         | 1.544         |
| Calentamiento estanques acuicultura | 1.097                     | 605           | 616           | 653           |
| Secado productos agrícolas          | 67                        | 74            | 157           | 127           |
| Usos industriales                   | 544                       | 474           | 484           | 533           |
| Baño y natación                     | 1.085                     | 3.957         | 5.401         | 6.689         |
| Refrigeración/fusión de nieve       | 115                       | 114           | 371           | 368           |
| Otros                               | 238                       | 137           | 86            | 41            |
| <b>Total</b>                        | <b>8.664</b>              | <b>15.145</b> | <b>28.269</b> | <b>50.583</b> |

**Tabla 4.**

*Evolución de la energía térmica utilizada <sup>20</sup>*

| Usos                                | Utilización (TJ/año) |                |                |                |
|-------------------------------------|----------------------|----------------|----------------|----------------|
|                                     | 1995                 | 2000           | 2005           | 2010           |
| Bomba de calor geotérmica           | 14.617               | 23.275         | 87.503         | 214.782        |
| Calefacción de recintos             | 3.823                | 42.926         | 55.256         | 62.984         |
| Calentamiento invernaderos          | 15.742               | 17.864         | 20.661         | 23.264         |
| Calentamiento estanques acuicultura | 13.493               | 11.733         | 10.976         | 11.521         |
| Secado productos agrícolas          | 1.124                | 1.038          | 2.013          | 1.662          |
| Usos industriales                   | 1.012                | 1.022          | 10.868         | 11.746         |
| Baño y natación                     | 15.742               | 79.546         | 83.018         | 109.032        |
| Refrigeración/fusión de nieve       | 1.124                | 1.063          | 2.032          | 2.126          |
| Otros                               | 2.249                | 3.034          | 1.045          | 956            |
| <b>Total</b>                        | <b>112.441</b>       | <b>190.699</b> | <b>273.372</b> | <b>438.071</b> |

Adicionalmente, en el estudio de Sánchez et al (2011) explica que se reportan 78 países que tienen usos directos de la energía geotérmica, los cuales se encuentran en la tabla 5. en orden alfabético. Se debe resaltar que son cinco los países que cuentan con la mayor capacidad instalada hasta el 2010, son: **Estados Unidos, China, Suecia, Noruega y Alemania** que, en conjunto, representan el 62,8% de la capacidad mundial, y el 37.2 % está representado por los otros 73 países. En lo que respecta a la energía utilizada, las cinco primeras posiciones están ocupadas por **China, Estados Unidos, Suecia, Turquía y Japón**, en este caso con un 54,7% del total mundial.

**Tabla 5.**

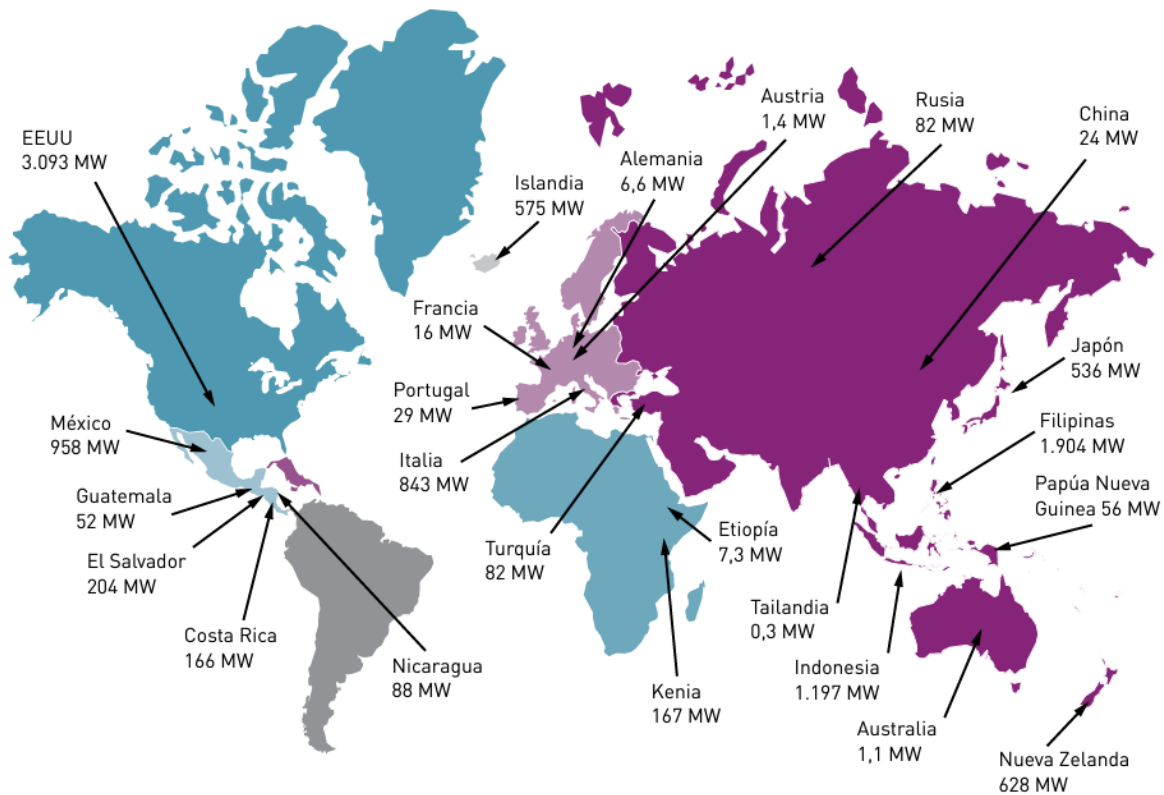
*Países que tiene uso directo de la energía geotérmica*

| AMERICA          | EUROPA      |                 | AFRICA    | ASIA          | Oceanía            |
|------------------|-------------|-----------------|-----------|---------------|--------------------|
| Argentina        | Albania     | Hungría         | Argelia   | Armenia       | Australia          |
| Brasil           | Alemania    | Irlanda         | Egipto    | China         | Nueva Zelanda      |
| Canadá           | Austria     | Islandia        | Etiopia   | Corea del Sur | Papua Nueva Guinea |
| Chile            | Bélgica     | Italia          | Kenia     | Filipinas     |                    |
| Colombia         | Bielorrusia | Letonia         | Marruecos | India         |                    |
| Costa Rica       | Bosnia      | Lituania        | Sudáfrica | Indonesia     |                    |
| Ecuador          | Bulgaria    | Macedonia       | Túnez     | Irán          |                    |
| El salvador      | Croacia     | Noruega         |           | Israel        |                    |
| Estados Unidos   | Dinamarca   | Polonia         |           | Japón         |                    |
| Guatemala        | Eslovaquia  | Portugal        |           | Jordania      |                    |
| Honduras         | Eslovenia   | Reino Unido     |           | Mongolia      |                    |
| Islas del caribe | España      | Republica Checa |           | Nepal         |                    |
| México           | Estonia     | Rumania         |           | Tailandia     |                    |
| Perú             | Finlandia   | Rusia           |           | Tayikistán    |                    |
| Venezuela        | Francia     | Serbia          |           | Turquía       |                    |
|                  | Georgia     | Suecia          |           | Vietnam       |                    |
|                  | Grecia      | Suiza           |           | Asia          |                    |
|                  | Holanda     | Ucrania         |           |               |                    |

Sánchez et al (2011), describen de una forma gráfica (figura 21) como se encuentra la capacidad instalada a nivel mundial en el 2010.

**Figura 22.**

*Capacidad Instalada en el 2010 (10.7 GWt)<sup>28</sup>*



De acuerdo con datos reportados, se concluye que Europa es el continente que tiene la mayor cantidad de países donde se ha implementado y desarrollado la instalación y el uso de este tipo de energía, sin embargo, cuando se evalúa a nivel país es Estados Unidos quien está ocupando la primera posición tanto en instalación como en uso de la Energía Geotérmica.

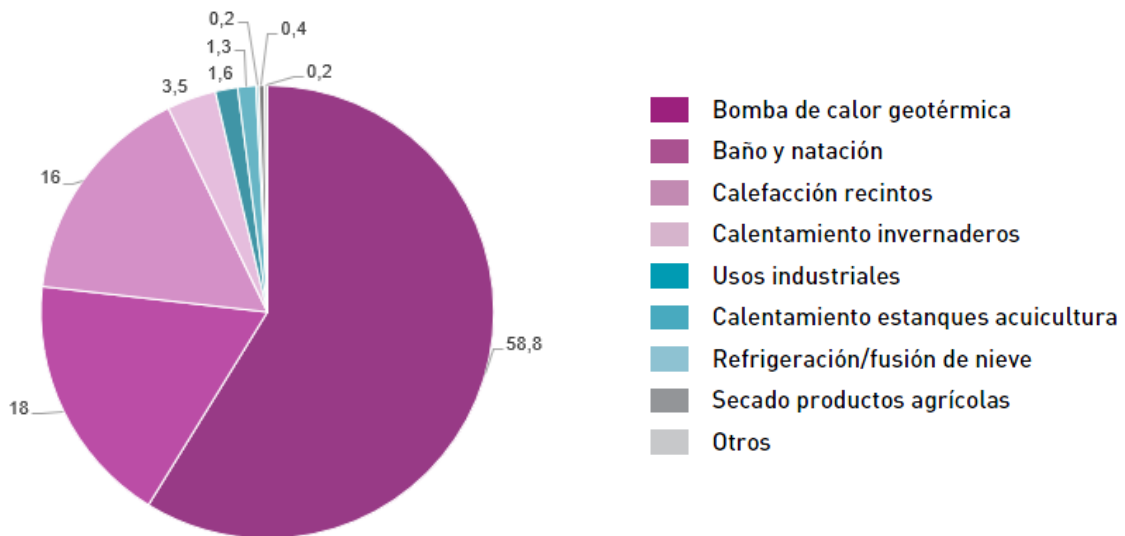
<sup>28</sup> Evaluación del potencial de energía geotérmica 2010

Posteriormente, Lund J y Toth A. (2020) en su artículo recopilan y comparan los datos presentados sobre energía Geotérmica publicados desde 1995 hasta 2015 en diferentes congresos de Geotermia a nivel mundial (WGC) y complementan la información hasta 2020 por medio de dos fuentes: primero, los datos oficiales aportados por más de 62 países y segundo, los aportados por los otros 26 países en otras fuentes de información.

Lund J y Toth A. (2020) mostraron que en el 2010 se conocían 78 países con actividad geotérmica, y para el 2020 se observó un incremento llegando hasta 88 países. Aunque esta es una estimación basada en la información aportada hasta 2019, se evidencio un incremento de 52% con respecto al año 2015 en valores corresponde a 107.727 MWt. La energía térmica utilizada fue de 283.580 GWh/año, es decir un 72.3% más que en el 2015, en la siguiente figura se observa la distribución de la energía térmica utilizada, categorizada de la misma forma que las evaluadas en el año 2010.

**Figura 23.**

*Modificada Energía geotérmica utilizada en usos directos en el mundo (2020)<sup>29</sup>*

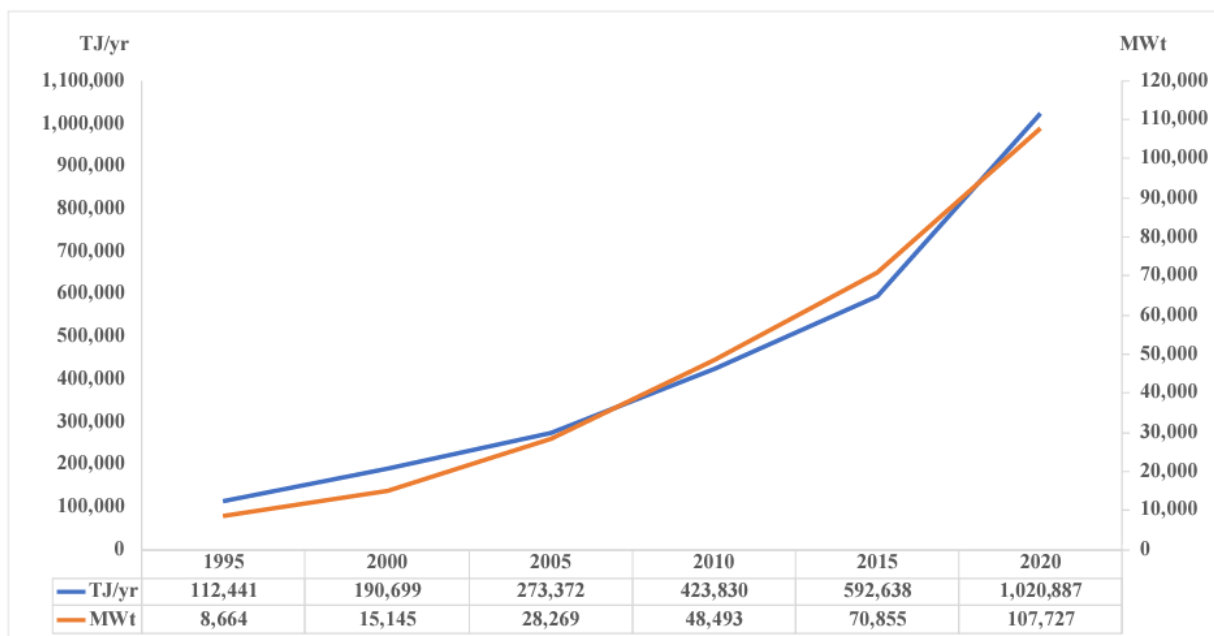


<sup>29</sup> Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review

En la figura 24 se observa las tasas de crecimiento de la capacidad instalada (MGt) y el uso anual de energía (TJ/Año) durante los últimos 30 años. Aquí se aprecian dos tipos de pendiente una suave entre 1995 y 2005, donde se observa que la capacidad y el consumo crecen a la par y el gasto de la población no supera los 300 TJ/año, lo cual contrasta con los valores presentados entre el 2010 al 2020, donde se tiene una pendiente más empinada y la capacidad y el consumo aumentan significativamente en más de tres veces, llegando a un consumo de 1.000.000 TJ/año, esto quiere decir que la energía geotérmica por medio de la generación de electricidad y calefacción ha ayudado a que la humanidad consuma más este recurso energético.

**Figura 24.**

*La capacidad geotérmica de uso directo instalada y la utilización anual desde 1992 hasta 2020<sup>30</sup>*



<sup>30</sup> Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review

Lund J y Toth A. (2020) describen en las tablas 6 y 7 los datos de 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 y 2020 entre los diversos usos en términos de capacidad (MWt) y utilización de energía (TJ/año) respectivamente. Adicionalmente, esta distribución también se puede ver como un gráfico de barras en la Figura 25 para los 6 usos energéticos principales. Intenta distinguir la calefacción individual de la calefacción urbana, pero a menudo esto resultó difícil, ya que los informes de cada país no siempre hacían esta distinción. La mejor estimación es que la calefacción urbana representa el 91% de la capacidad instalada y el 59% del uso anual de energía.

**Tabla 6.**

*Modificación de Resumen en MWt para varias categorías Capacidad instalada en el periodo 1995 – 2020<sup>31</sup>*

| Usos                                | Capacidad Instalada MWt |               |               |               |               |              |
|-------------------------------------|-------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
|                                     | 2020                    | 2015          | 2010          | 2005          | 2000          | 1995         |
| Bomba de calor geotérmica           | 77,547                  | 50,258        | 33,134        | 15,384        | 5,275         | 1,857        |
| Calefacción de recintos             | 12,768                  | 7,602         | 5,395         | 4,366         | 3,263         | 2,579        |
| Calentamiento de invernaderos       | 2,459                   | 1,972         | 1,544         | 1,404         | 1,246         | 1,085        |
| Calentamiento estanques acuicultura | 950                     | 696           | 653           | 616           | 604           | 1,097        |
| Secado productos agrícolas          | 257                     | 161           | 125           | 157           | 74            | 67           |
| Usos industriales                   | 852                     | 614           | 533           | 484           | 474           | 544          |
| Baño y Natación                     | 12,253                  | 9,143         | 6,7           | 5,401         | 3,957         | 1,085        |
| Refrigeración/fusión de nieve       | 435                     | 360           | 368           | 371           | 114           | 115          |
| Otros                               | 106                     | 79            | 42            | 86            | 137           | 238          |
| <b>Total</b>                        | <b>107,727</b>          | <b>70,885</b> | <b>48,493</b> | <b>28,269</b> | <b>15,145</b> | <b>8,664</b> |
| % incremento en 5 años              | 52                      | 46,2          | 71,5          | 86,7          | 74,8          |              |

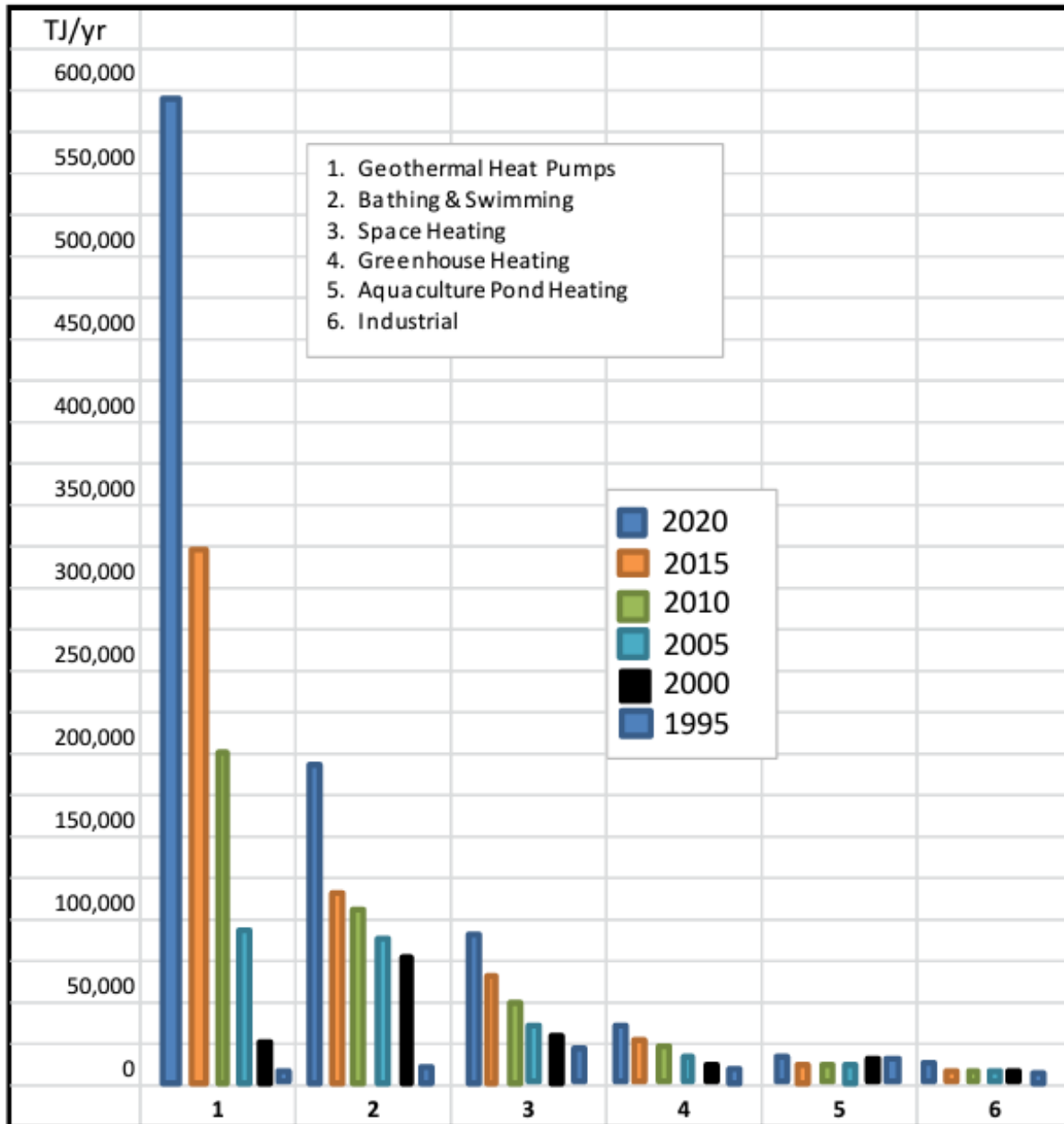
<sup>31</sup> Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review

**Tabla 7.**

*Modificación de Resumen en TJ/año para varias categorías uso directo en el periodo 1995 - 2020<sup>26</sup>*

| Usos                                | Utilización TJ/año |                |                |                |                |                |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
|                                     | 2020               | 2015           | 2010           | 2005           | 2000           | 1995           |
| Bomba de calor geotérmica           | 599,981            | 326,848        | 200,149        | 87,503         | 23,275         | 14,617         |
| Calefacción de recintos             | 162,979            | 88,668         | 63,025         | 55,256         | 42,926         | 38,230         |
| Calentamiento de invernaderos       | 35,826             | 29,038         | 23,264         | 20,661         | 17,864         | 15,742         |
| Calentamiento estanques acuicultura | 13,573             | 11,953         | 11,521         | 10,976         | 11,733         | 13,493         |
| Secado productos agrícolas          | 3,529              | 2,030          | 1,635          | 2,013          | 1,038          | 1,124          |
| Usos industriales                   | 16,390             | 10,454         | 11,745         | 10,868         | 10,220         | 10,120         |
| Baño y Natación                     | 184,070            | 119,611        | 109,410        | 83,018         | 79546,000      | 15,742         |
| Refrigeración/fusión de nieve       | 2,589              | 2,596          | 2,126          | 2,032          | 1,063          | 1,124          |
| Otros                               | 1,950              | 1,440          | 956            | 1,045          | 3,034          | 2,249          |
| <b>Total</b>                        | <b>1,020,887</b>   | <b>592,638</b> | <b>423,830</b> | <b>273,372</b> | <b>190,699</b> | <b>112,441</b> |
| % incremento en 5 años              | 72,3               | 39,8           | 55,0           | 43,4           | 69,6           |                |

**Figura 25.** Comparación mundial del uso directo de energía geotérmica en TJ/año de 1995,2000,2005, 2010, 2015 y 2020<sup>32</sup>



<sup>32</sup> Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review

Lund J y Toth A. (2020) también realizan un resumen por regiones y continentes la capacidad térmica instalada (MWt) y el uso anual de energía (TJ/año), las cuales se observan en la tabla 8 y en la figura 26 su distribución espacial.

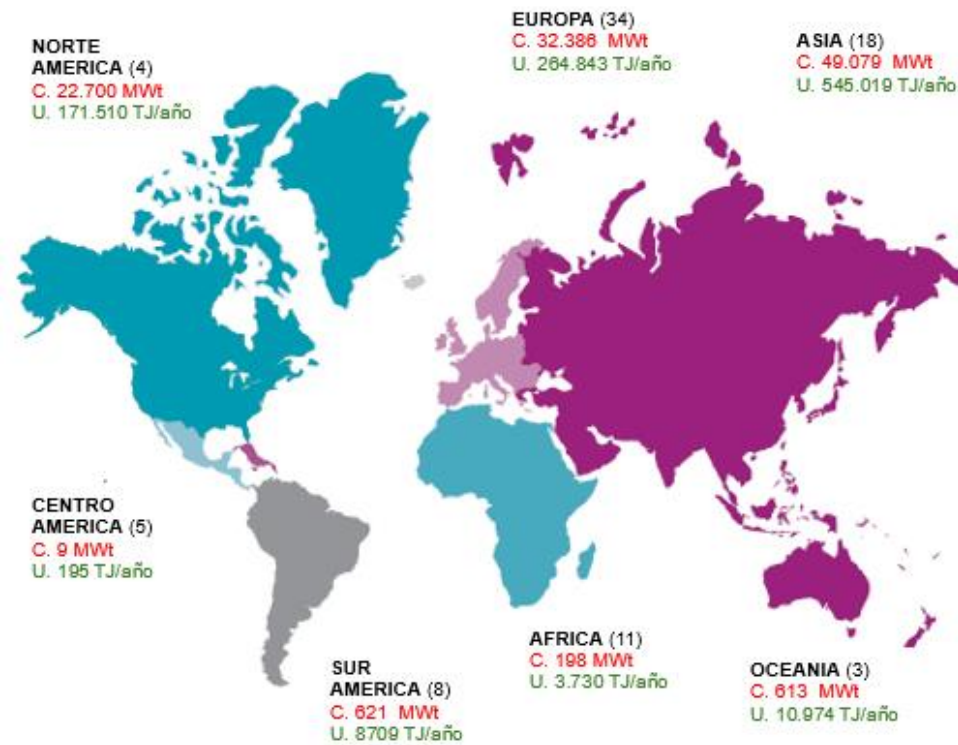
**Tabla 8.**

*Tomado de Resumen de datos de uso directo en todo el mundo por región/continente<sup>24</sup>*

| Región/Continente             | MWt            | TJ/año           |
|-------------------------------|----------------|------------------|
| <b>AFICA (11)</b>             | 198            | 3,730            |
| <b>AMERICAS (17)</b>          | 23,330         | 180,414          |
| América central y Caribe (5)  | 9              | 195,000          |
| Norte América (4)             | 22,700         | 171,510          |
| Sur América (8)               | 621            | 8,709            |
| <b>Asia (18)</b>              | 49,049         | 545,019          |
| <b>Estados independientes</b> | 2,121          | 15,907           |
| <b>Europa (34)</b>            | 32,386         | 264,843          |
| Central y Este de Europa (17) | 3,429          | 28,098           |
| Oeste y Norte de Europa (17)  | 29,947         | 236,745          |
| <b>Oceanía (3)</b>            | 613            | 11,0             |
| <b>Total (88)</b>             | <b>107,727</b> | <b>1,020,887</b> |

**Figura 26.**

*Capacidad Instalada y uso de energía en el 2019 <sup>24</sup>*



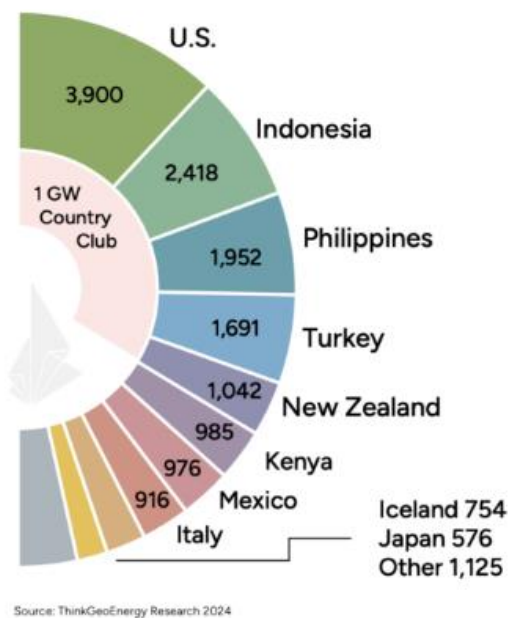
La capacidad instalada total, reportada a finales de 2019 para la utilización directa geotérmica en todo el mundo, es de 107.727 MWt, un aumento del 52,0% con respecto al WGC2015, creciendo a una tasa compuesta anual del 8,7%. El uso total anual de energía es de 1.020.887 TJ (283.580 GWh), lo que indica un aumento del 72,3% con respecto al WGC2015 y una tasa de crecimiento anual compuesta del 11,5%.

Con base a esta información se puede concluir que la energía geotérmica ha proporcionado un gran avance para la humanidad en su explotación e implementación, ya que siempre ha estado en un continuo crecimiento y ha desplazado la utilización de combustibles fósiles en varios campos en muchos países del mundo, es decir, es una fuente de energía renovable cada vez más fuerte y

sostenible, la cual produce muy bajas emisiones de gases como el CO<sub>2</sub> en comparación con otras fuentes de energía. Sin embargo, se debe resaltar que su viabilidad está condicionada a la ubicación geográfica, se puede implementar solo en lugares donde se encuentran recursos geotérmicos significativos. En la siguiente figura se observan los principales complejos geotérmicos del mundo.

**Figura 27.**

*Los 10 Países con Mayor Capacidad Geotérmica*<sup>33</sup>



**Los 10 Países con Mayor Capacidad MW por año TOTAL 16.335 MW.**

La capacidad total instalada de generación de energía geotérmica a finales de 2023 se incrementó a 16.335 MW. Durante 2023 se agregaron un total de 208 MW. Los 10 países principales representan hoy alrededor del 93% de la capacidad instalada total a nivel mundial, y 20 países adicionales contribuyen con 1.125 MW a las cifras globales.

<sup>33</sup> <https://www.piensageotermia.com/los-10-principales-paises-geotermicos-de-thinkgeoenergy-en-2023-capacidad-instalada-de-generacion-de-energia/>

## 6. EXPLORACION DE RECURSOS GEOTERMICOS

Los recursos geotérmicos aportan una fuente de energía limpia y confiable. Hoy en día la humanidad está cada vez más comprometida con la reducción del cambio climático y tener seguridad energética para el futuro. Para alcanzar este objetivo, es fundamental identificar y evaluar el potencial geotérmico de un área específica, lo que implica conocer muy bien los componentes que integran el modelo de un sistema geotérmico (ver figura 16), así como la cuantificación de cada una de las partes que lo componen, a fin de determinar la viabilidad técnica y económica del mismo.

Marzolf (2014), explica las etapas que se deben tener en cuenta en el desarrollo de un proyecto geotérmico, desde la concepción del modelo hasta la evaluación del yacimiento. En su documento, propone considerar las siguientes premisas para la exploración de un recurso geotérmico:

- a. Identificar el proceso geotérmico que está ocurriendo;
- b. Identificar si existe un campo geotérmico aprovechable;
- c. Estimar el tamaño del reservorio y la calidad del recurso disponible;
- d. Determinar el tipo de campo geotérmico;
- e. Localizar las zonas productivas y de recarga;
- f. Determinar el contenido calórico de los fluidos presentes en el reservorio;
- g. Determinar los parámetros ambientalmente relevantes, previo a la explotación;
- h. Compilar el mayor número de características del campo y planear su desarrollo y operación;

- i. Establecer las características técnicas y dimensionamiento de la planta de generación

En la siguiente figura se identifican de una forma gráfica las fases del proyecto geotérmico propuesta por Marzolf (2014), la cual sirvió como base para el Estudios de prefactibilidad para el campo geotérmico del Macizo Volcánico del Ruiz. Programa Estratégico de Investigación y Modelamiento del Sistema Hidrotermal Magmático. 2012. Por medio del convenio ISAGEN – BID/JG Colombia:

**Figura 28.**

*Fases del desarrollo de un proyecto geotérmico<sup>34</sup>*



<sup>34</sup> Empeñamiento de la energía geotérmica en Colombia

### 6.1 Fase 1. Reconocimiento

La primera evaluación, en donde se identifican las áreas viables que cumplen con las premisas explicadas anteriormente y se tienen claros los objetivos. Y paralelamente se evalúan la regulación técnica, ambiental y social que nos permite el desarrollo de un proyecto dentro de una zona específica en nuestro país. El resultado de esta etapa permite establecer la viabilidad del proyecto e iniciar los estudios de prefactibilidad y planeación.

### 6.2 Fase 2. Prefactibilidad

Esta fase inicia con la exploración superficial, la cual parte con la recopilación de información geológica necesaria para la realización del modelo geotérmico conceptual.

**Figura 29.**

*Etapa de Exploración Superficial*



Como se indica en la anterior figura, esta fase inicia con la recopilación de estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos que permiten conocer la superficie del terreno y delimitar nuestra área de interés.

Los estudios geológicos permiten conocer el contexto, la litología, la sucesión y edad de las capas, así como los cambios de facies y las estructuras tectónicas. Por otro lado, los estudios hidrogeológicos analizan los flujos de agua en el seno del acuífero y evalúan el recurso desde el punto de vista cuantitativo y cualitativo.

De otro lado, el trabajo de la geoquímica se enfoca en determinar la composición química, tanto de los flujos de agua como en las rocas. Esta información es clave para identificar el recorrido del fluido, su edad, su origen y las condiciones de carga y recarga del acuífero. Además, también es útil para estudiar tanto en las rocas superficiales como del reservorio y si este está relacionado con fuentes termales o gases presentes en el sistema; lo que ayuda a concluir características esenciales del sistema geotérmico, como son: origen, temperatura del reservorio, mezcla con aguas superficiales, conexión con el sistema magmático entre otras.

Por último, pero no menos importante, se encuentra la geofísica. Esta ciencia permite identificar: estructuras, fallas, anomalías en el subsuelo, dimensión del reservorio y características de las rocas como son: gravedad, magnetismo, etc. Para ello, se emplean diferentes herramientas como son: sensores remotos, gravimetría, geoeléctrica, magnetometría, información sísmica e información de pozo. Con esta información, es posible construir un modelo geotérmico teórico del área y plantear donde se tienen vacíos de datos y planificar nuevos sondeos de exploración para la adquisición de información más precisa, lo que ayuda a disminuir incertidumbres en variables relevantes del modelo.

Paralelamente a la realización de construcción del modelo geotérmico para el proyecto, es necesario realizar el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para exploración y el uso del recurso. El EIA, es un documento técnico que estima los efectos ambientales que pueden generarse durante la ejecución o desarrollo de un proyecto específico en el medio ambiente en un área delimitada. Además, este documento debe proponer acciones para prevenir, mitigar o compensar estos impactos sobre el área de interés. Todo esto se realiza dentro del marco legal establecido por la legislación colombiana.

### **6.3 Fase 3. Factibilidad**

Marzolf (2014) destaca en su estudio la importancia de esta fase, ya que es durante ella que se comprueba la existencia del recurso geotérmico, y evalúa su viabilidad técnica, en otras palabras, se determina la calidad y cantidad del recurso disponible para la generación de energía eléctrica. Asimismo, se consideran sus aspectos económicos y ambientales necesarios para el desarrollo de un proyecto geotérmico.

Esta fase, conocida como Exploración Profunda (ver figura 30), comienza con la evaluación del modelo geotérmico conceptual. Este modelo abarca tanto la geología de superficie como el modelo estructural de subsuelo del área de interés, he incluye aspectos clave como son: la fuente de calor, el reservorio geotérmico, el sello, las líneas de flujo de los fluidos y el sistema de recarga.

A partir de la evaluación del modelo, se seleccionan áreas para perforar pozos a diferentes profundidades con el objetivo de adquirir más información, verificar y dimensionar el yacimiento

geotérmico y determinar las características óptimas de los pozos para la explotación del fluido geotérmico.

El objetivo del modelo geotérmico es minimizar las incertidumbres técnicas de un proyecto de geotermia y asegurar la transición a la siguiente fase de desarrollo. Para lograrlo, es necesario responder las inquietudes planteadas en la fase de reconocimiento (Marzolf, 2014) y enriquecer el modelo con toda la información obtenida de las nuevas perforaciones incluyendo muestras de roca, fluido y registros eléctricos.

**Figura 30.**

*Etapa de Exploración Profunda*



Después de la perforación de los pozos exploratorios, se realiza la evaluación del yacimiento. Esto significa que, con los datos adquiridos, se puede corroborar las hipótesis planteadas en el modelo conceptual, así como, dimensionar el recurso geotérmico y analizar las características químicas y físicas del yacimiento. Adicionalmente, a través de estos pozos se pueden llevar a cabo pruebas de producción, con el objetivo de calcular reservas, simulaciones de producción y hacer análisis económicos.

Una vez confirmada la existencia y la calidad del yacimiento geotérmico, se deben realizar evaluaciones técnicas para determinar su capacidad de producción y la vida útil del yacimiento. Esto incluye, pruebas de inyección, análisis de interferencia entre pozos y simulaciones de flujo entre otras. Mediante la caracterización del yacimiento, evaluando propiedades como: porosidad, permeabilidad, temperatura y presión entre otras, se puede definir el potencial energético del campo y seleccionar el tipo de planta adecuada para su desarrollo, optimizando así su operación a largo plazo.

En esta fase también se evalúan aspectos como la localización de pozos de desarrollo, pozos de reinyección, facilidades de producción, construcción de planta seleccionada, vías de acceso, entre otros. Todas estas actividades están interrelacionadas con las evaluaciones económicas, considerando los costos de operación o construcción en relación con la capacidad del yacimiento y el análisis del mercado energético.

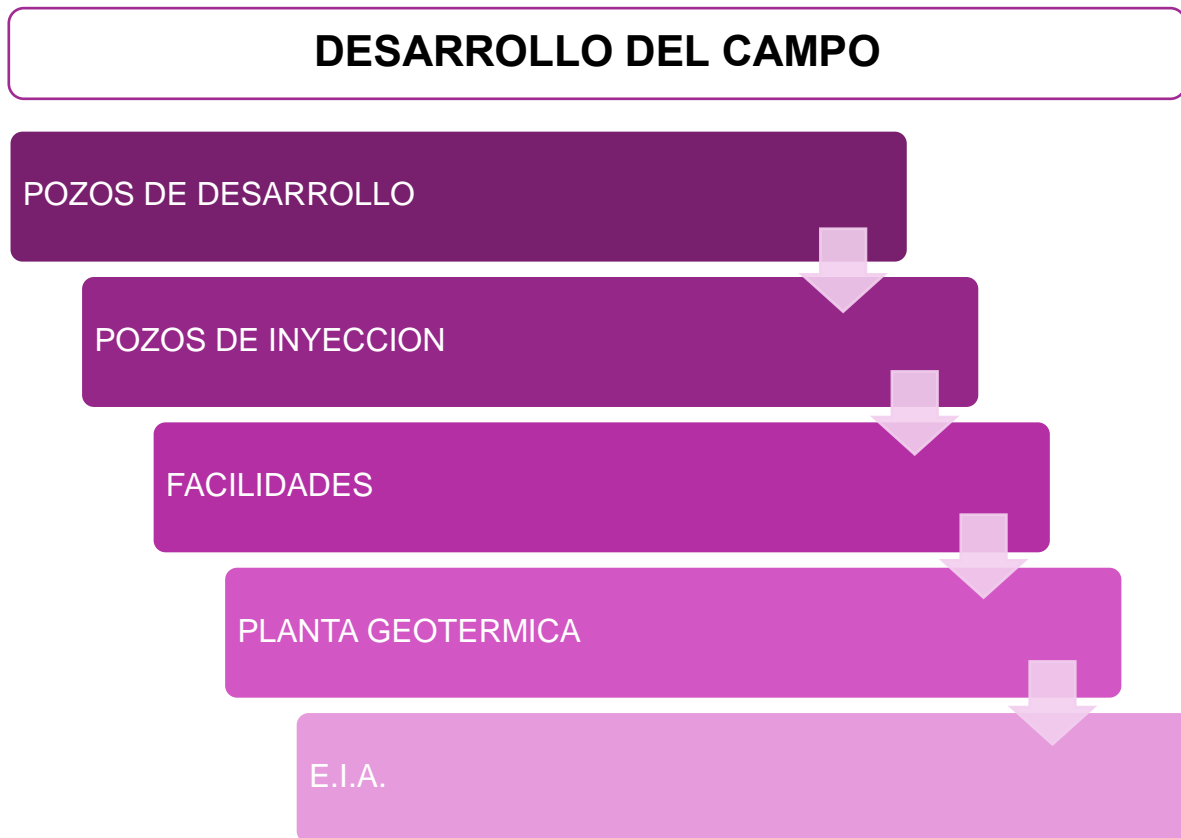
#### **6.4 Fase 4. Desarrollo**

Finalmente, después de comprobar la factibilidad del proyecto, es decir, su viabilidad técnica, económica y ambiental, se procede con el desarrollo del campo. En esta etapa, se inicia la

fase de explotación, que abarca desde el diseño de la planta, el plan de desarrollo del campo y las actividades relacionadas con la operación comercial. Paralelamente, se considera el impacto ambiental del proyecto y se aplican las medidas propuestas en el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para garantizar su sostenibilidad.

**Figura 31.**

*Etapa de Desarrollo*



## 7. COMPARATIVO TECNICAS UTILIZADAS EN LA FASE DE EXPLORACION DE HIDROCARBUROS EN RELACION CON UN PROYECTO GEOTERMICO.

La exploración de recursos naturales como los hidrocarburos y la geotermia, tienen fases bien definidas donde su principal objetivo es tener un proyecto exitoso, en el cual se encuentre el yacimiento y este sea comercial y explotable, asegurando una rentabilidad económica y una sostenibilidad con el medio ambiente.

Una vez explicados los conceptos técnicos en cada fase de la exploración de un proyecto de hidrocarburos y otro de geotermia, a continuación, se mostrará un análisis comparativo de cada fase y se resaltarán algunas similitudes debido a su enfoque, el cual es conocer e identificar un yacimiento en subsuelo, también se puede apreciar que existen unas diferencias en las técnicas y metodologías aplicadas en cada etapa debido a las características del recurso.

### Tabla 9.

*Tabla descriptiva de la información requerida para el desarrollo de un proyecto de exploración de hidrocarburo y un proyecto de geotermia.*

|                                    | HIDROCARBUROS  | GEOTERMIA  |
|------------------------------------|--|--|
| <b>Recopilación de información</b> | <p>En Colombia contamos con múltiples fuentes tanto Públicas como privadas y con más de 100 años de historia.</p> <p>La información se puede consultar en Servicio Geológico de Colombia, Agencia Nacional de Hidrocarburos, La litoteca, entre otros.</p> | <p>Es más reciente su implementación en Colombia, los últimos 50 años, contamos con fuentes tanto públicas como privadas.</p> <p>Debido a las grandes expectativas del país en este tema y la transición energética que vive el mundo en estos</p> |

|                               |  |  |
|-------------------------------|--|--|
|                               | <p>El aporte de la academia es muy importante, hay múltiples universidades que investigan continuamente sobre los hidrocarburos.</p>   | <p>tiempos, esta rama de la generación de energía esta continua investigación y desarrollo tanto desde las universidades, como los entes regulatorios y la industria privada.</p>  |
| <b>Geología de Superficie</b> | <p>Mapa geológico, mapa de cuencas, mapa de oilseeps, mapa de geoquímica, etc.</p> <p>Con Geología de superficie se puede identificar: formaciones importantes (roca madre, reservorio, sello), fallas u otros rasgos estructurales que favorecen en la acumulación de HC en subsuelo. Además, filtraciones de gases, HC o rezumaderos.</p> <p>Este estudio nos da una idea inicial del posible prospecto de hidrocarburos en subsuelo, pero para su confirmación es necesario realizar estudios más detallados del subsuelo.</p>  | <p>Mapa Geológico permite identificar zonas de actividad volcánica, fallas geológicas o estructuras asociadas a fuentes de calor subterráneo.</p> <p>Con la geología de superficie se identifican aguas termales, fumarolas y áreas alteradas por actividad hidrotermal.</p> <p>Con estos estudios se pueden identificar zonas potenciales con gradiente geotérmico o zonas de alto flujo geotérmico.</p>  |
| <b>Información geofísica</b>  | <p>La sísmica de reflexión, tanto 2D como 3D, la magnetometría y gravimetría, ayudan a identificar estructuras en subsuelo viables para la acumulación de hidrocarburos.</p> <p>Por medio de estos métodos se puede identificar estructuras en subsuelo, cuantificarlas y delimitar el yacimiento. Gravimetría y la magnetometría son estudios regionales permiten identificar densidades y anomalías magnéticas respectivamente, mientras que con la reflexión sísmica es posible realizar estudios más detallados para la caracterización de los yacimientos en subsuelo,</p> <p>Además, son estudios muy necesarios para objetivos de gran profundidad.</p> | <p>Se usan métodos como la gravimetría, magnetometría, magnetotelúrica para identificar zonas de alta conductividad térmica, fallas permeables que permiten el flujo de fluidos térmicos y además determina el gradiente geotérmico.</p> <p>Por medio de la sísmica se pueden identificar estructuras y fallas que permitan la circulación de fluidos calientes.</p> <p>Con la magnetotelúrica mapea resistividades en el subsuelo, útiles para identificar estructuras profundas y zonas de fluido.</p> |
| <b>Información geoquímica</b> | <p>Los análisis geoquímicos de las rocas, gases o aguas subterráneas son</p>   | <p>Los análisis geoquímicos son fundamentales, ya que permiten</p>   |

|                             |   |   |
|-----------------------------|---|---|
|                             | <p>fundamentales para identificar depósitos de petróleo o gas en subsuelo.</p> <p>Por medio de estos estudios, se comprenden los procesos de migración de hidrocarburo a través de fracturas y fallas, aportando información clave para la dinámica de los yacimientos.</p> <p>Adicionalmente, se puede realizar un análisis cualitativo relevante para la evaluación de la presencia de HC en subsuelo. La evaluación de la roca madre y su grado de madurez es importante para conocer el potencial del yacimiento.</p> <p>Estos análisis se utilizan en las primeras etapas de exploración para delimitar áreas prometedoras.</p>  | <p>determinad la composición de los fluidos hidrotermales e identifican posibles fuentes geotérmicas.</p> <p>A través de estos estudios, se puede identificar actividad geotérmica profunda, así, como si su origen es volcánico in situ o fallas activas.</p> <p>La evaluación de los fluidos hidrotermales proporciona información relevante sobre temperatura y condiciones químicas del reservorio geotérmico.</p> <p>Este tipo de estudio es uno de los estudios más importante ya que permite identificar temperatura y composición del reservorio, y ello da las bases para la viabilidad de un proyecto geotérmico.</p>   |
| <p><b>Hidrogeología</b></p> | <p>Es importante evaluar el comportamiento de los fluidos subterráneos ya que esto permite viabiliza el desarrollo de un proyecto, en este caso los HC.</p> <p>Los estudios de hidrogeología permiten comprender el comportamiento de los acuíferos y ayudan a identificar las zonas de migración de los fluidos. También, se observa su interacción con el reservorio, lo cual fundamental para la producción en un campo de HC.</p> <p>Además, se realizan monitoreos de calidad del agua subterránea y análisis hidráulicos, para obtener datos sobre la permeabilidad, porosidad y gradientes de presión.</p> <p>El comportamiento de los acuíferos es clave para determinar el potencial de producción de un campo de HC. Es decir, se observan diferencias en un acuífero confinado con un acuífero activo.</p> | <p>Los estudios de hidrogeología evalúan la permeabilidad y circulación del agua subterránea, se puede determinar su capacidad para transportar calor desde su origen hasta la superficie.</p> <p>Estos estudios son esenciales para identificar fuentes geotérmicas asociadas con acuíferos calientes en subsuelo, áreas de recarga y descarga. Además, se realizan Mediciones de permeabilidad, presiones, gradientes térmicos, entre otros</p> <p>Ayudan a comprender los sistemas de recarga y descarga de un sistema geotérmico.</p> <p>A través, de los mapas de flujo se puede representar como circulan los fluidos, lo cual es fundamental en el diseño del proyecto de geotermia.</p> |

|   |   |  |
|---|---|--|
| <p><b>Gradiente geotérmico</b></p>        | <p>El gradiente geotérmico es importante ya que es factor clave en la generación de HC.</p> <p>Este estudio permite identificar el grado de madurez de la roca madre., es decir, reconoce si las condiciones de temperatura fueron suficientes para convertir la materia orgánica en petróleo o gas.</p>  | <p>El gradiente geotérmico es un factor determinante en la viabilidad de los proyectos geotérmicos. Debido a que uno de los objetivos es tener altas temperaturas para la generación de energía geotérmica.</p> <p>Las anomalías térmicas, son indicadores de fuentes cercanas de calor como es la actividad volcánica o fracturas profundas y Estas son ideales para la explotación de energía geotérmica.</p>  |
| <p><b>Interpretaciones geológicas</b></p> | <p>Con toda la información recopilada de diferentes áreas, se realiza la interpretación, enfocada en la exploración de Hidrocarburos, mediante la identificación de estructuras geológicas, las cuales pueden ser estructurales o estratigráficas que permiten el entrapamiento de los hidrocarburos.</p> <p>En esta etapa se implementa la elaboración de modelos, que buscan asemejar lo que se encuentran en subsuelo, partiendo de toda la información técnica recopilad. Estos modelos van desde lo más regional, como son las estructuras, hasta la lo más detallado como es la caracterización del yacimiento, lo que permite tomar decisiones sobre las mejores localizaciones para los siguientes pozos del campo.</p> | <p>La interpretación de la información recopilada tiene por objetivo identificar tres componentes claves para la identificación de un recurso geotérmico: una fuente de calor accesible, un reservorio permeable que retenga el fluido térmico y un acuífero. Estas características físicas permiten evaluar un recurso geotérmico para conocer su vialidad de explotación.</p> <p>Por medio de la elaboración de modelos se puede representar lo que se encuentra en subsuelo, como fuentes de calor magmático o zonas de actividad tectónica, facturas y fallas que permiten la circulación de fluidos, así como zonas de recarga y descarga del agua subterránea.</p> <p>En estos modelos permiten identificar áreas donde el gradiente geotérmico sea elevado y rocas con buena permeabilidad que permitan la extracción de calor.</p> |
| <p><b>Perforación exploratoria</b></p>    | <p>El objetivo principal es encontrar hidrocarburos, conocer las características de las rocas tanto del reservorio como del sello, y determinar los fluidos qué están contenidos en ellas.</p>  | <p>El objetivo es acceder a fuentes de calor subterráneas para la generación de energía eléctrica o térmica.</p> <p>Generalmente, estos pozos son más someros que los de hidrocarburos.</p>  |

|  |  |  |
|--|--|--|
|  | <p>Las profundidades son variables, dependen del objetivo de interés. Y se emplean diferentes técnicas de perforación, en algunos casos muy especiales debido a factores de presión y temperatura.</p> <p>Un factor muy importante para considerar es el tema de riesgos ambientales. Dado que se trata de una operación compleja, se realiza una evaluación continua desde su planeación hasta la finalización de la perforación, con el fin de minimizar los posibles incidentes que puedan afectar al medio ambiente</p>  | <p>Se realizan en áreas de actividad geotérmica, como zonas volcánicas o cerca de fallas geológicas, donde se registran altas temperaturas.</p> <p>Se evalúan los fluidos del yacimiento, debido a que en algunos casos son muy corrosivos.</p> <p>Con respecto al tema ambiental, se ejerce un estricto control sobre los gases, como CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S, debido a su potencial para generar contaminación.</p>  |
| <p><b>Pruebas de pozo</b></p>                | <p>Estas pruebas a pozos exploratorios exitosos, además que nos confirmar la existencia de HC en subsuelo, nos permiten determinar la cantidad recuperable de HC y evaluar la calidad del reservorio.</p> <p>Adicionalmente se conocer las características del fluido, las presiones del reservorio y la capacidad de producción.</p> <p>Algunas de las pruebas son: Pruebas de formación, Pruebas de flujo, pruebas de presión y pruebas de producción extendida.</p> <p>Los parámetros evaluados son: presión de reservorio, permeabilidad, porosidad, tasa de flujo y composición del fluido entre otros.</p> <p>La duración de las pruebas puede ser de algunas horas y días o extensas de varios meses.</p> | <p>Estas pruebas son importantes ya que además de indicar la viabilidad del recurso, en el caso de un proyecto geotérmico determina la cantidad y, calidad del reservorio, así como su permeabilidad. También se evalúa si el fluido (agua o vapor) que serán extraídos es suficiente para generar energía.</p> <p>Algunas de las pruebas que se realizan son: pruebas de flujo y presión, pruebas de infectividad, pruebas de interferencia térmica y pruebas de entalpia (energía térmica).</p> <p>Los parámetros más importantes que se consideran son: temperatura, tasa de flujo del fluido, permeabilidad, composición química del fluido y entalpia.</p> <p>La duración de las pruebas puede durar varios días o semanas, para observar cómo responde el sistema geotérmico a diferentes escenarios operativos.</p> |
| <p><b>Análisis de viabilidad técnica</b></p> | <p>La viabilidad técnica en la exploración de un prospecto de HC, se basa en determinar si la cantidad de hidrocarburo (petróleo o gas) a extraer</p>  | <p>La viabilidad técnica en los proyectos de Geotermia tiene como prioridad evaluar si el calor almacenado en el subsuelo puede ser extraído a superficie</p>  |

|  |  |   |
|--|--|---|
|  | <p>es rentable y segura. Para ello se evalúan todas las características del reservorio y la infraestructura necesaria.</p> <p>Los factores claves en las características del reservorio son: Extensión y espesor, porosidad y permeabilidad, presión del reservorio, y composición de los fluidos.</p> <p>Además, se evalúa cual es el mejor método de extracción. Algunos, ejemplos son: tipo de perforación direccional o horizontal, fracturamiento hidráulico, sistemas de levantamiento entre otros.</p> <p>La infraestructura es fundamental, ya que además de permitir el desarrollo del campo va directamente relacionada con los costos del proyecto.</p> <p>Análisis de riesgos, tanto geológicos como técnicos, es esencial para anticipar los resultados del pozo y/o los posibles inconvenientes que se puedan desarrollar durante las operaciones en campo.</p> <p>Finalmente, la protección al medio ambiente se logra mediante la aplicación de buenas prácticas antes y durante la perforación. También se deben implementar las acciones propuestas en el EIA para prevenir, mitigar o compensar algún impacto sobre el área de interés.</p> | <p>y utilizado para generar energía eléctrica o térmica de manera sostenible y a largo plazo.</p> <p>La evaluación técnica se enfoca en los siguientes factores: temperatura, conductiva térmica. Tipos de fluidos, permeabilidad.</p> <p>Un factor determinante es la tecnología para la perforación, teniendo en cuenta que estos pozos se realizan en zonas con altas temperaturas y con fluido altamente corrosivos. Otras variables relevantes son: si los reservorios son de baja entalpia y se deben usar ciclos binarios o se debe realizar reinyección de fluidos y los gases que se encuentran disueltos dentro de los fluidos.</p> <p>Respecto a la infraestructura, la viabilidad técnica debe incluir el diseño de la planta geotérmica que permita convertir el calor en electricidad. Esta planta está determinada por las características del yacimiento geotérmico.</p> <p>También, se realiza evaluación de riesgos geológicos como son temperaturas más bajas de lo esperado, baja permeabilidad del reservorio. Con respecto a los técnicos, la composición química de los fluidos geotérmicos, la precipitación de minerales. Todos estos factores pueden repercutir en la producción de energía geotérmica.</p> |
| <p><b>Análisis de viabilidad Económica</b></p> | <p>En la viabilidad económica se evalúa si la producción de petróleo o gas es rentable, y esta variable se relaciona con los costos de exploración, perforación, producción, transporte y comercialización.</p> <p>En los análisis financieros se evalúan los siguientes ítems: Valor presente neto, Tasa interna de retorno y análisis de sensibilidad, en donde se tienen en</p>   | <p>En los proyectos de geotermia se evalúa la viabilidad económica teniendo en cuenta la generación de energía eléctrica o térmica, su duración en el tiempo, también se debe relacionar, con los costos de exploración, perforación, instalación de plantas operación y mantenimiento de infraestructura.</p> <p>Adicionalmente, se realizan análisis financieros, donde se evalúan los</p>  |

|  |   |   |
|--|---|---|
|  | <p>cuenta los precios del barril en el mercado y los gastos inesperados.</p> <p>Actualmente, la regulación y la política interna de un país impactan significativamente el desarrollo de los proyectos de exploración de hidrocarburos.</p> | <p>siguientes ítems: Valor presente neto, Tasa interna de retorno y análisis de escenarios en donde se evalúan precios de la energía.</p> <p>Asimismo, la regulación y las políticas energéticas impactan directamente en la viabilidad de los proyectos.</p> |
|--|---|---|

Como se pudo observar en la tabla 9., tanto la exploración de Hidrocarburos como la de realización de un proyecto de geotermia comparten ciertas técnicas a la hora de adquirir información tanto de superficie como de subsuelo y posteriormente realizar la integración de esta, para obtener un modelo del área de interés. En algunos casos, utilizan las mismas herramientas y tecnologías como son: las fotografías aéreas, las imágenes de satélite, la sísmica, la gravimetría, y la magnetometría, la hidrogeología y la geoquímica. Sin embargo, siempre es necesario enfocar y hacer énfasis en estas técnicas según el objetivo que se está buscando.

La principal diferencia en los dos tipos de exploración, se encuentran de acuerdo con su objetivo principal, es decir, el recurso que se están buscando, en el primer caso se relaciona con la acumulación y entrapamiento del hidrocarburo sea este petróleo o gas y en el segundo caso se requiere una fuente de calor subterráneo y un reservorio permeable que permita la circulación de fluidos calientes.

**Tabla 10.**

*Tabla resumen comparación de las técnicas de exploración de hidrocarburos y un proyecto de geotermia*

| TECNICA                  | SIMILITUDES  | DIFERENCIAS   |   |
|--------------------------|--|---|---|
|                          |  | HIDROCARBUROS   | GEOTERMIA   |
| Objetivo                 | Encontrar recursos energéticos                                       | Identificar acumulación de Hidrocarburos (gas o petróleo)                                   | Identificar fuentes de calor y zonas permeables   |
| Geología de superficie   | Mapas geológicos   | Identificación de estructuras y fallas  | Identificación de fracturas y fuentes de calor  |
| Geofísica                | Imágenes de subsuelo   | Identificas Trampas estructurales y/o estratigráficas, reservorios                          | Mapear zonas de fracturas y fuentes térmicas.   |
| Geoquímica               | Análisis químicos de rocas, gases y fluidos de superficie y subsuelo | Análisis a gases de hidrocarburos ligeros   | Análisis de gases térmicos (CO <sub>2</sub> y H <sub>2</sub> S) y elementos isotópicos. |
| Hidrogeología            | Análisis de los fluidos del subsuelo                                 | Análisis acuíferos subterráneos y migración de hidrocarburos                                | Evaluar la recarga de los acuíferos y la circulación de los fluidos.                    |
| Interpretación Geológica | Generar modelos con la información de subsuelo.                      | Identificar un sistema petrolífero  | Identificar u sistema geotérmico.   |
| Gradiente geotérmico     | Medición de temperaturas en profundidad                              | Evaluación de la roca madre   | Seleccionar áreas con potencial térmico   |
| Pozos exploratorios      | Identificar presencia del recurso energético                         | Comprobar la presencia y acumulación de hidrocarburos. Adquirir información del reservorio. | Comprobar el modelo geotérmico, y conocer la productividad del fluido geotérmico.       |

## **8. AREAS DE CONOCIMIENTO DE LA EXPLORACION DE HIDROCARBUROS QUE PUEDEN APLICARSE A UN PROYECTO DE GEOTERMIA.**

La exploración de hidrocarburos ha sido uno de los pilares más importantes en el desarrollo energético del mundo. Sus inicios fueron muy empíricos, basándose en la observación y descripción de lo que se encontraba en la superficie. Con el paso de los años, se realizaron avances tecnológicos que abrieron un abanico de técnicas diversas para conocer el subsuelo; primero con rasgos muy generales, luego yacimientos más profundos y en zonas más complejas. Actualmente, se logra realizar la caracterización de un yacimiento en un modelo 3D, integrando todas las técnicas disponibles con el objetivo de optimizar la producción, conservar el yacimiento, reducir riesgos y minimizar los impactos ambientales, entre otros aspectos.

Teniendo en cuenta que tanto la exploración de hidrocarburos como la geotermia tiene como objetivo la búsqueda de un recurso energético, se pueden utilizar las mismas técnicas y herramientas. Lo importante es enfocar e interpretar adecuadamente estos datos para cumplir con el objetivo de identificar y desarrollar un recurso geotérmico.

A continuación, se describen algunas de las áreas específicas que pueden aplicarse a un proyecto de geotermia:

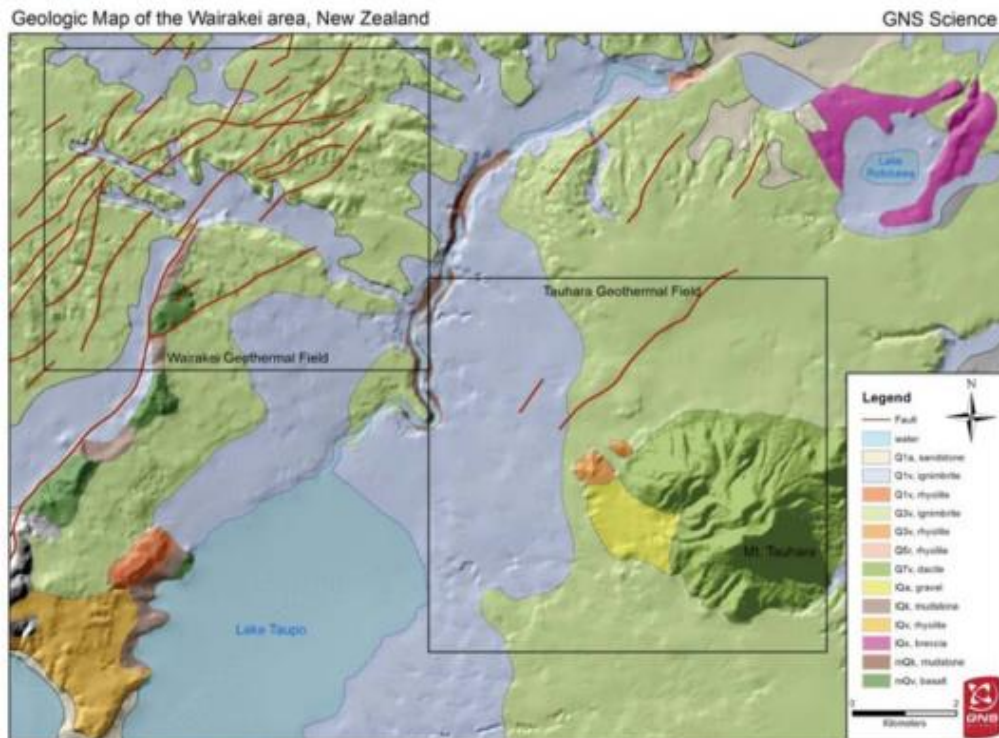
### **8.1 Geología y Geofísica**

La interpretación de estructuras geológicas, como fallas, pliegues y fracturas son muy importante para la exploración de un recurso geotérmico. Estas características permiten identificar

áreas donde el calor se puede concentrar y donde las fracturas pueden servir como vías para la circulación de fluidos térmicos. Aunque las zonas con actividad volcánica son las áreas más prosperas para encontrar recursos geotérmicos, también se ha evidenciado sistemas geotérmicos en cuencas sedimentarias. En estos casos, el recurso geotérmico es de tipo de entalpia intermedia a baja, pero, gracias a tecnologías especiales son viables para la generación de electricidad.

Un ejemplo puede ser el mapa geológico una zona volcánica geotérmicamente activa de Taupo en Nueva Zelanda que se muestra en la siguiente figura.

**Figura 32.** Mapa geológico de un prospecto geotermal<sup>35</sup>

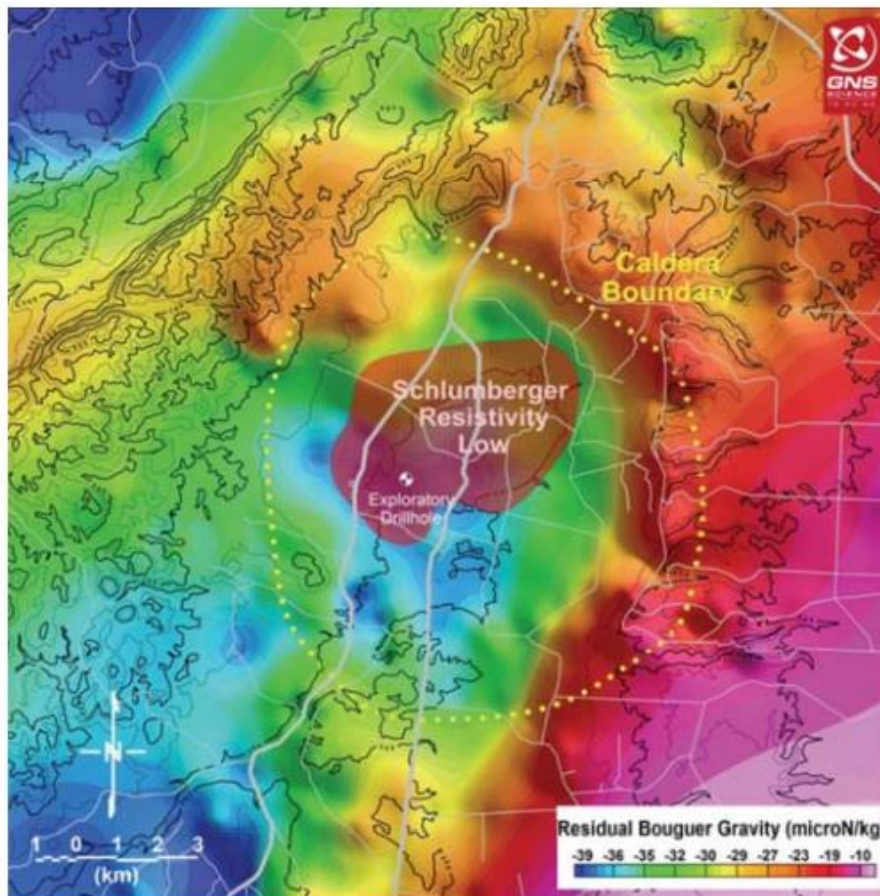


<sup>35</sup> Geothermal Exploration best practices 2nd edicion

Los estudios de gravimetría y magnetometría son técnicas que permiten identificar estructuras de subsuelo y su geometría a gran escala. Un ejemplo de esto se observa, en la figura 32. Donde se representa un mapa de Bouger en Nueva Zelanda, el cual identifica una anomalía de baja gravedad en el centro del mapa.

**Figura 33.**

*Mapa de datos de gravedad<sup>36</sup>*

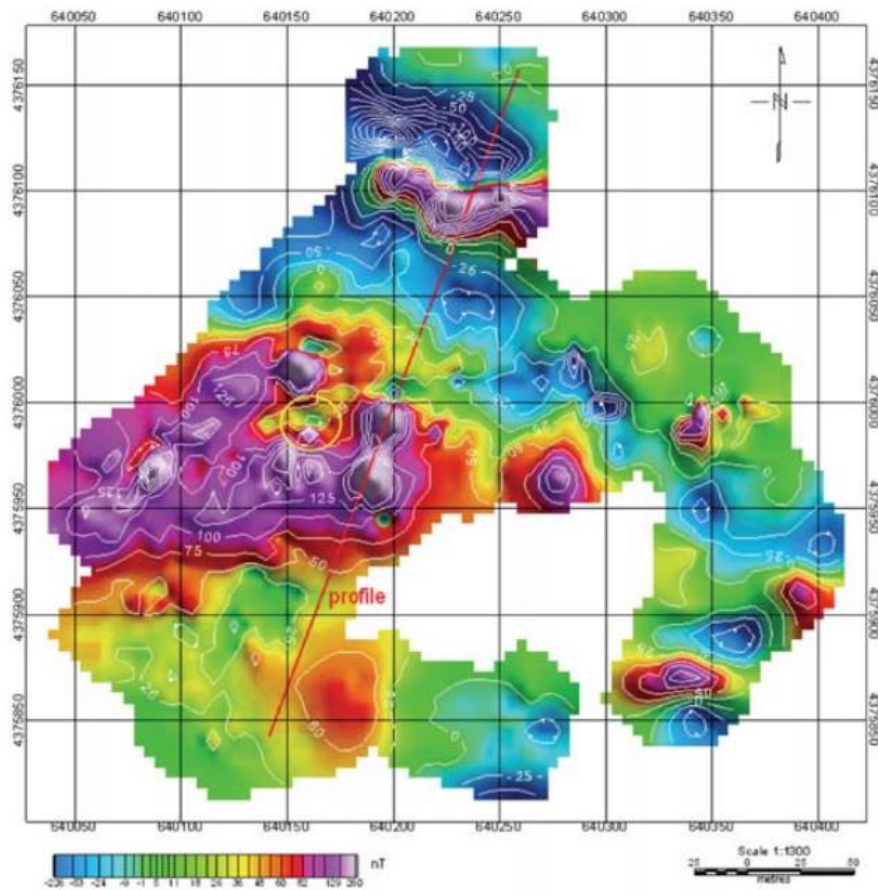


<sup>36</sup> Geothermal Exploration best practices 2nd edicion

De manera similar, se puede obtener un mapa mediante el análisis de variaciones en las propiedades magnéticas del subsuelo, lo que ayuda a identificar estructuras potenciales para la exploración de un recurso geotérmico, un ejemplo de ello se muestra en la figura 33.

**Figura 34.**

*Mapa de anomalía Magnética.*<sup>37</sup>



<sup>37</sup> Geothermal Exploration best practices 2nd edicion

La interpretación de información sísmica en 2D-3D y 4D es una herramienta fundamental para la detección y caracterización de recursos geotérmicos. Identificar estructuras, fallas, y fracturas, las cuales ayudan a comprender como es la circulación de fluidos geotérmicos en el subsuelo. En áreas con actividad volcánica y presencia de fallas, el calor fluye más fácilmente desde el interior de la tierra hasta la superficie.

Esta técnica también comprueba la presencia de fluidos en subsuelo, característicos de los reservorios geotérmicos, que contienen agua caliente o vapor. Estos fluidos tienen una respuesta particular cuando las ondas sísmicas que los atraviesan. Además, también estiman las profundidades a las que se encuentran las fuentes de calor.

Crosby y Calman, 1996., explican como las técnicas de reflexión sísmica pueden adaptarse para investigar áreas geotérmicas incluso en geología compleja y campos dominados por vapor. Asimismo, Mackowski et al, 2019., Indican Parámetros como la profundidad hasta la superficie superior del yacimiento, su espesor y volumétrica se pueden interpretar a partir de datos sísmicos. La geometría de los reservorios geotérmicos y la ubicación de las fallas ayudan a estimar la temperatura del agua y predecir las rutas de migración del agua geotérmica.

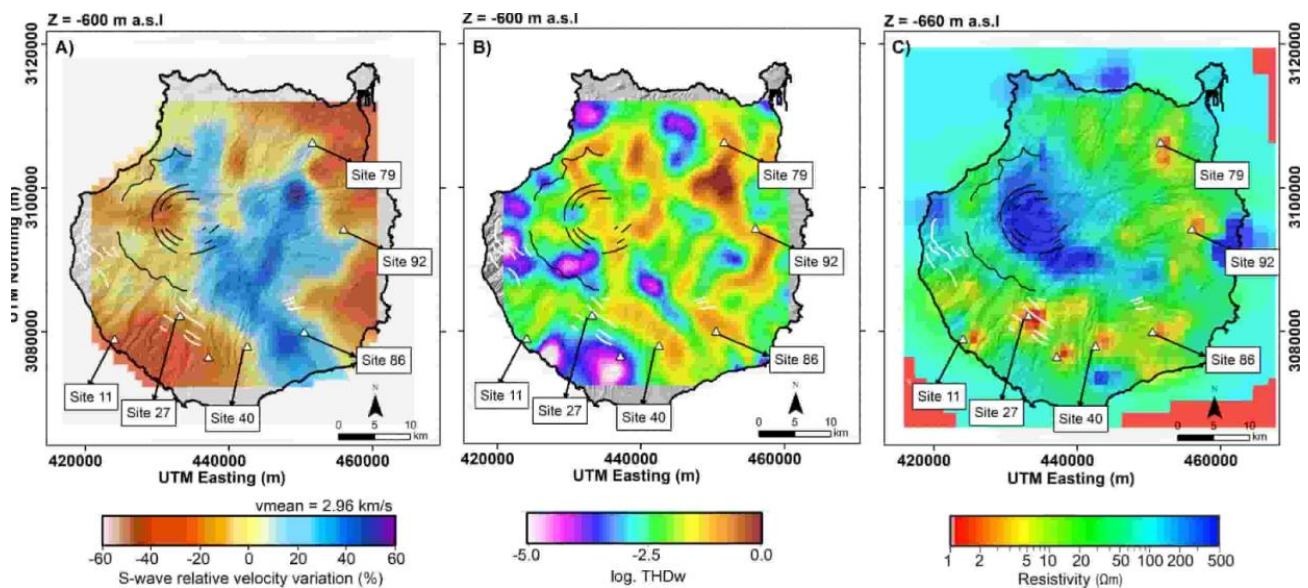
Un avance importante en este campo es la tomografía sísmica, la cual proporciona imágenes tridimensionales del subsuelo, mediante el análisis de las ondas sísmicas. El comportamiento de estas ondas a través del subsuelo puede dar información sobre la composición y propiedades térmicas de las rocas. Por ejemplo, las velocidades bajas sugieren rocas fracturadas, saturadas con fluidos o áreas de alta temperatura, mientras que las altas velocidades están relacionadas a rocas macizas, frías y no fracturadas.

Este método también permite Identificar zonas de fractura, que facilitan la circulación de fluidos calientes, así como capas impermeables que atrapan estos fluidos calientes y posibles

intrusiones magmáticas o cámaras de magma. Además, los mapas térmicos obtenidos permiten reconocer la distribución del calor y con ello evaluar el potencial de un campo geotérmico. Las anomalías sísmicas brindan datos como porosidad y permeabilidad del reservorio, información clave para la caracterización del yacimiento y su explotación.

Esta técnica es un instrumento clave que permite tener una imagen detallada del recurso en subsuelo. Un ejemplo es la tomografía realizada en Islas Canarias, la cual se enfocó en la valoración del potencial geotérmico que tiene la Isla. Y se observa en la siguiente figura.

Figura 35. Gradiente de velocidad horizontal.<sup>38</sup>



<sup>38</sup> Ambient noise tomography of Canary Island (Canary Islands) for geothermal exploration

## 8.2 Análisis hidrológicos.

Los análisis hidrológicos permiten conocer el comportamiento de los fluidos en el subsuelo. En el campo de los hidrocarburos, estos análisis son aplicables para la identificación de sello, interacción del agua con los hidrocarburos (presión del agua, desplazamiento de fluidos), así como para aprender cómo es el movimiento de los fluidos dentro de las fracturas en yacimientos naturalmente fracturados. Además, puede identificar los acuíferos, tanto superficiales como profundos, con el objetivo de diseñar estrategias para que no se contaminen durante la fase de perforación tanto de los pozos exploratorios como de desarrollo.

En el área de geotermia se pueden aplicar los análisis anteriormente descritos, pero con el enfoque de que la información aportada permita mejorar la extracción de agua caliente o vapor que es el fluido que se extrae a través de una roca permeable o de un área que tenga fracturas conectadas y permita la movilidad del él.

Las pruebas de bombeo permiten evaluar la capacidad del reservorio de soportar la extracción continua de fluidos. Tanto en hidrocarburos como en geotermia, son la base de una evaluación técnica-económica de un proyecto. Aunque su objetivo es similar, en cuanto a medición de caudal y presión, así como conocer otras propiedades del reservorio, las diferencias se deben al tipo de fluido evaluado, por tal motivo los resultados de los análisis obtenidos también serán interpretados de manera distinta. Estas pruebas en geotermia además de revisar el caudal también aportan información de temperatura y la sostenibilidad del flujo térmico a través del tiempo.

### 8.3 Modelación Geológica

La generación de modelos geológicos son claves para comprender el desarrollo de un yacimiento tanto un sistema petrolífero como para un sistema geotérmico. Este tipo de modelado conceptual se basa en la integración de diferentes fuentes de datos: información geológica, tanto de superficie como de subsuelo, datos geofísicos en todas sus ramas, es decir, interpretaciones sísmicas, mapas de magnetometría, mapas de gravimetría, mapas de gradiente geotérmico, estudios de hidrogeología, así como la información aportada por los pozos: registros eléctricos, análisis químicos de muestras de roca y fluidos adquiridos durante la perforación, y datos de presión y temperatura entre otros. El objetivo es modelar la estructura, extensión y calidad del reservorio y así identificar las mejores zonas para la perforación de pozos de desarrollo.

Por medio del modelamiento se puede obtener la siguiente información esencial para el proyecto, como:

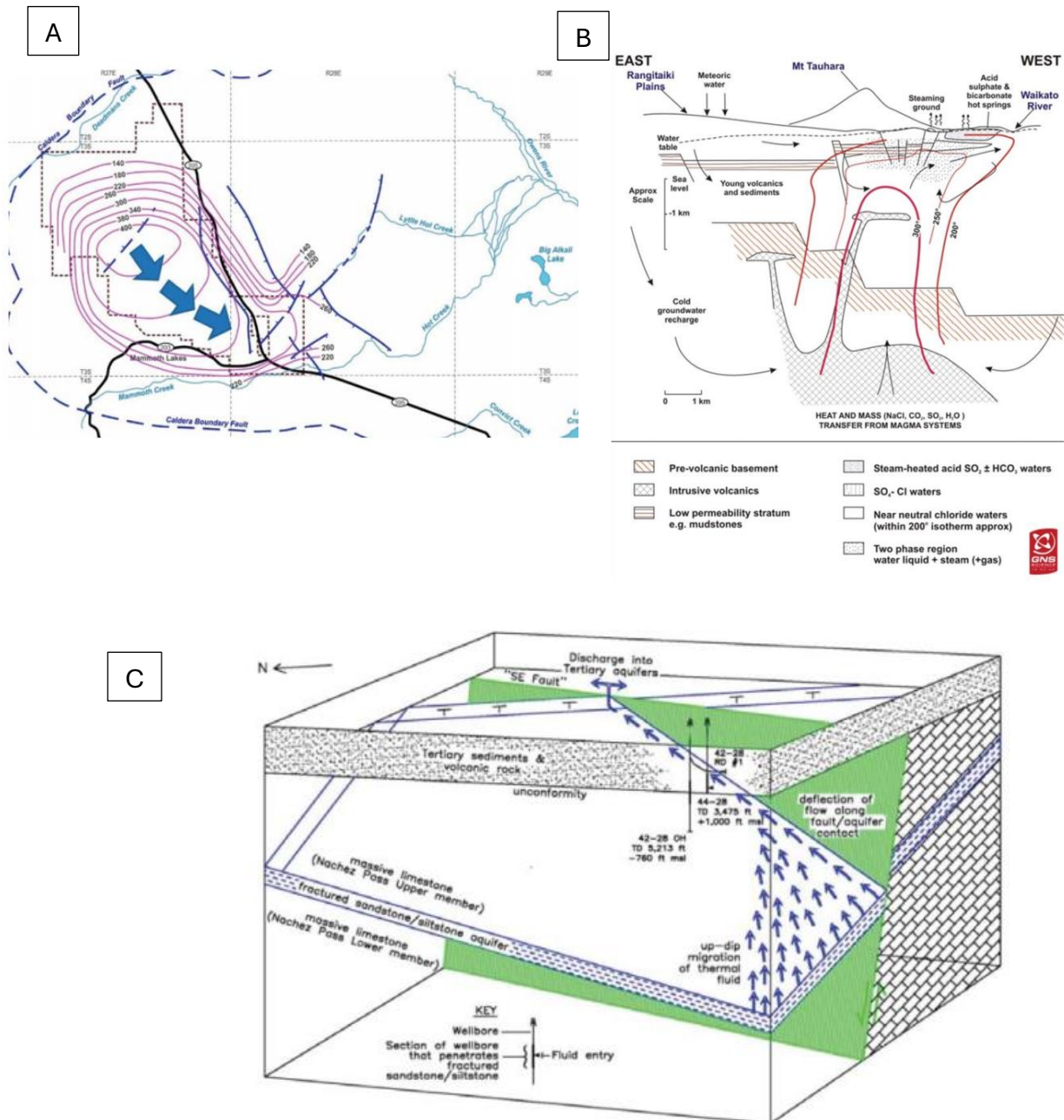
- a. Distribución de la temperatura y gradientes geotérmicos, esto permite reconocer cuales son las zonas más optimas, es decir, las más calientes y adecuadas para la extracción de energía.
- b. Simulación del flujo de fluidos, muestras como se mueven los fluidos geotérmicos (agua caliente o vapor) a través de fracturas o poros del reservorio.
- c. Estimación de porosidad y permeabilidad, estas características físicas del reservorio permiten evaluar su capacidad de producción.

- d. Comportamiento de la presión, Este parámetro cambia con el tiempo y está directamente relacionado con la extracción de los fluidos, por lo cual es importante, realizar un buen seguimiento para no dañar el yacimiento.
- e. Estimación de potencial energético, por medio de los modelos se puede calcular cuanta energía se puede extraer de manera segura del yacimiento, mediante cálculos de cantidad de calor disponible, tasas de extracción y la duración del proyecto
- f. Inyección de fluidos. En algunos campos geotérmicos, se inyecta agua al subsuelo para mantener la presión y el volumen en el sistema, asegurando que no se dañe el reservorio.
- g. Identificación de las zonas óptimas para realizar la perforación de nuevos pozos basándose en el comportamiento de los fluidos y las mejores temperaturas del reservorio.
- h. Predicción de posibles problemas, si la extracción de los fluidos puede generar algún proceso de subsidencia u otro problema al campo.

El modelamiento de los reservorios es una herramienta relevante para conocer el yacimiento, predecir su comportamiento a lo largo del tiempo y realizar una explotación segura y eficiente, así como, para evaluar la rentabilidad del proyecto. En la siguiente figura se observa un modelo conceptual generado para geotermia en diferentes lugares del mundo.

Figura 36.

Modelo Conceptual A. Mapa de Superficie en Nueva Zelanda B. Sección vertical a través de un sistema geotérmico en Nueva Zelanda y C. Un Modelo en tres dimensiones de California<sup>39</sup>



<sup>39</sup> Geothermal Exploration best practices 2nd edicion

### 8.4 Evaluación del riesgo geológico

La evaluación de los riesgos es uno de los pilares fundamentales en la exploración de hidrocarburos, y se evalúa por medio de la probabilidad de éxito (POS, según sus siglas en Ingles) de cada uno de los factores involucrados durante la exploración, como son: roca madre, reservorio, trampa y migración de fluidos. Partiendo de este concepto, se puede acondicionar a proyectos geotérmicos, debido a que este también tiene factores críticos como son: fuente de calor, reservorios permeables, calidad de los fluidos térmico, sistema de fallas y carga del sistema.

Tabla 11.

Riesgo Geológico para evaluación de un prospecto

| PROYECTO GEOTERMICO   |   |                            |   |
|---|---|----------------------------|---|
| RESUMEN DE LA EVALUACION CONJUNTA DEL RIESGO GEOLOGICO  |   |                            |   |
| NOMBRE DEL POZO _____   |   |                            |   |
| ELEMENTOS GEOLÓGICOS  | COMPONENTES   | CALIFICACION I, P, F, B, E | CALIFICACION DOMINANTE ** I, P, F, B, E |
|   | PROBABILIDAD DE OCURRENCIA DEL ELEMENTO 0,1 a 1,0                 |                            |   |
| FUENTE DE CALOR   | 1. Fuente de calor  |                            |   |
|   | 2. Gradiente Geotermico   |                            |   |
| RESERVORIO GEOTERMICO (R)   | 1. Suficiente espesor neto con características de reservorio.     |                            |   |
|   | 2. Porosidad y permeabilidad efectivas.                           |                            |   |
| FLUIDOS GEOTERMICOS   | 1. Agua caliente o Gas  |                            |   |
|   | 2. Carga - descarga   |                            |   |
| ROCA SELLO  | 1. Rocas Impermeables   |                            |   |
|   | 2. Eficiencia de las Fallas                                       |                            |   |
| ESTRUCTURA  | 1. Fallas   |                            |   |
|   | 2. Sistema de fracturas   |                            |   |
| PROBABILIDAD DE HALLAZGO  | $P_h = P(F) \times P(R) \times P(F_1) \times P(F_2) \times P(ES)$ |                            |   |
| <p>** El componente más débil determina la probabilidad de existencia del elemento</p> <p>(Excelente) 0,86 a 1,0 La información directa confirma la existencia del elemento; datos excelentes.<br/>           (Buena) 0,66 a 0,85 Interpretación muy probable, La calidad de los datos de control es buena.<br/>           (Favorable) 0,46 a 0,65 Condición posible; interpretación favorable; datos limitados, concepto válido.<br/>           (Pobre) 0,26 a 0,45 Datos de control pobres a regulares; concepto válido pero datos disponibles no son convincentes.</p> |   |                            |   |

Por medio de la evaluación de riesgo geológico en el proyecto se desea conocerlas probabilidades de los factores involucrados en un sistema geotérmico, y saber su grado de conocimientos del recurso con el objetivo de minimizar las incertidumbres, mitigar los riesgos geológicos y así poder viabilizar técnicamente el proyecto.

## **8.5 Perforación y completamiento de Pozos**

La ejecución de las fases preliminares en la exploración, como la recolección, integración e interpretación de información geológica, geofísica, geotérmico e hidrológico es fundamental para la identificación de un recurso en subsuelo, dando como resultado, la localización de los pozos exploratorios. Estos pozos tienen gran importancia, ya que permiten comprobar la existencia del recurso y a su vez proporcionan datos adicionales del subsuelo, tanto de las formaciones perforadas como del reservorio. Esta información mejora el modelo conceptual, caracteriza de forma directa el yacimiento y optimiza su desarrollo.

Por esta razón, las técnicas de perforación y completamiento de pozos también han experimentado avances significativos durante la fase de exploración de hidrocarburos en las últimas décadas. Estos avances, han perfeccionado el diseño de pozos, las herramientas empleadas y su ejecución, logrando operaciones cada vez más rápidas, eficientes y con mejores tecnologías, con el objetivo de llegar al reservorio minimizando los inconvenientes operativos y reduciendo el impacto al medio ambiente.

Estos avances son ampliamente aplicables en la exploración de recursos geotérmicos, teniendo en cuenta que el objetivo de estos recursos es acceder a zonas con altas temperaturas y fluidos calientes (agua o vapor). La experiencia adquirida en la exploración de hidrocarburos,

especialmente en pozos profundos en condiciones con alta temperatura y presión es muy importante para la geotermia. Además, de las técnicas de perforación direccional, diseño de tuberías de revestimiento y técnicas de completamiento, teniendo en cuenta las características de los reservorios geotérmicos, pueden optimizar la exploración de recursos geotérmicos.

## 9. CONCLUSIONES

- La energía geotérmica se ha posicionada como una de las mejores fuentes renovables en las últimas décadas. Y es por esta razón, que muchos países han vuelto sus ojos a ella obteniendo grandes resultados, tanto a nivel de generación de energía (capacidad Instalada) y su uso como son: Estados Unidos con 3.900 MW, Indonesia 2.418 MW. Filipinas con 1.952 MW y Turquía 1.691 MW entre lo más importantes. Este avance ha contribuido directamente con un menor consumo de combustibles fósiles y así disminuyendo la contaminación al medio ambiente.
- Un proyecto de geotermia es comparable con un proyecto de exploración de hidrocarburos, ya que ambos comparten el objetivo principal la búsqueda de un recurso en subsuelo. Asu vez, se observan similitudes en sus etapas iniciales, es decir, ambas utilizan métodos de recolección de datos (geológicos, geofísicos, geoquímicos e hidrogeológicos), con el fin de generar un modelo geológico del subsuelo. Además, se pueden apreciar similitudes en la necesidad de perforar pozos de exploración para conocer la extensión del recurso y poder determinar su capacidad de producción. Estos también ayudan a establecer las necesidades de infraestructura para la extracción del recurso, las cuales dependerán de las características del fluido extraído.

- La generación de modelos geológicos es un producto importante tanto para un proyecto de Hidrocarburos como para un proyecto geotérmico. Estos modelos permiten visualizar en tres dimensiones el subsuelo, mediante la integración de todas las técnicas posibles y así obtener un conocimiento detallado del yacimiento. Por ejemplo, la interacción de la información sísmica 3D y los estudios hidrogeológicos pueden determinar donde se encuentran atrapados los recursos o como puede ser los movimientos de los fluidos dentro del yacimiento y ello permite la localización de los pozos de producción, favoreciendo el buen desarrollo del campo tanto desde el punto de vista técnico como económico.
- Aunque existen similitudes en la exploración de hidrocarburos y exploración de geotermia, su viabilidad técnica presenta diferencias. Una de ellas, es la infraestructura la cual depende de las particularidades del reservorio, en el caso de los hidrocarburos depende si es hidrocarburo o gas, para ello se necesita: tipo de bomba, instalaciones de almacenamiento insitu, separadores, oleoductos o gaseoductos, entre otros. En el caso de geotermia, corresponde las temperaturas y características de los fluidos geotérmicos para ellos es necesario: plantas de generación de electricidad (si el objetivo es generar electricidad insitu), sistemas de distribución de calor (si el objetivo es calor directo), tuberías que resistan el transporte de agua caliente o vapor y contar con sistemas de reinyección (esto permite inyectar agua fría al subsuelo) para mantener el ciclo de producción térmica.
- La exploración de hidrocarburos ha tenido un gran desarrollo durante las últimas décadas, específicamente en las técnicas de adquisición de información, que hoy en día son más precisas y avanzadas tecnológicamente para la búsqueda de los recursos que se encuentran

entrampados en subsuelo. Una de las técnicas más utilizadas es la adquisición de datos sísmicos en 3D-4D, la cual genera imágenes más precisas del subsuelo, permitiendo identificar estructuras geológicas más complejas del subsuelo, fallas y fracturas, dimensionar yacimientos, y con el tiempo, permite determinar movimientos de los fluidos optimizando así el desarrollo del reservorio.

- Varias de las competencias técnicas desarrolladas por la industria de hidrocarburos pueden ser aplicables al desarrollo de proyectos de geotermia, lo que permite que la curva de aprendizaje sea más acelerada en este sector. La técnica de adquisición de datos geológicos, geoquímicos, geofísicos e hidrogeológicos, utilizados para conocer e identificar un reservorio en subsuelo. En cuanto a la perforación de pozos e infraestructura, se pueden adaptar fácilmente las técnicas de: diseño, ejecución, completamiento de pozos y construcción de infraestructuras de acuerdo con las necesidades del yacimiento geotérmico.

- La evaluación de riesgo geológico puede ser implementada en la evaluación de proyectos geotérmicos. Esta herramienta permite viabilizar los proyectos mediante una evaluación detallada de todos los factores involucrados en un sistema geotérmico, así como la y visualización de las incertidumbres asociadas.

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS (2024) Glosario. Recuperado de:  
<https://www.anh.gov.co/es/atenci%C3%B3n-y-servicios-a-la-ciudadan%C3%ADa/glosario/>
- Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Vargas, C., & Briceño, L. A. (2009). Mapa Preliminar De Gradientes Geotérmicos De Colombia Ministerio De Minas Y Energía Instituto Colombiano De Geología Y Minería INGEOMINAS Instituto Colombiano De Geología Y Minería INGEOMINAS Agencia Nacional De Hidrocarburos Proyecto Mapa Geotérmico De C. Arias, G., & Acevedo A (2017). *Estado Actual de la Producción de Energía Geotérmica en Colombia. Manizales*. Tesis de Pregrado. Recuperado de:  
<http://stadium.unad.edu.co/preview/UNAD.php?url=/bitstream/10596/13221/1/1087995573.pdf>
- Aragón-Aguilar A., Izquierdo-Montalvo G., Aragón-Gaspar D., Barreto-Rivera D., (2019) Stages of a Integral Geothermal Project. <https://www.intechopen.com/chapters/64027>
- Cabrera-Pérez I., Soubestre J., D’Auria L., Martínez van Dorth D., Ledo J., Piña-Varas P., Cervigón-Tomico G., Padilla G., Barrancos J., Pérez N., Ambient noise tomography of Gran Canaria island (Canary Islands) for geothermal exploration, *Geothermics*, Volume 108, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102609>.
- Crosby D, and Calman I, (1996) *Seismic Techniques in Geothermal Areas*. 18<sup>th</sup> NZ Geothermal Workshop. Proceedings
- Cruz Heranadez, S., (2019) Instituto politécnico Nacional. Tesis. Tomografía sísmica tridimensional de doble diferencia en el campo Geotermico los Humeros, Puebla.

<https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/28517/1/Tomograf%C3%ADa%20s%C3%ADmica%20tridimensional%20de%20doble%20diferencia%20en%20el%20campo%20geot%C3%A9rmico%20Los%20Humeros%2C%20Puebla.pdf>

Dickson H. Mary & Fanelli Mario (2005) Geothermal Energy: Utilization and technology, Traducción al español: Alfredo Lahsen Universidad de Santiago, Chile. Recuperado de: [http://www.lis.edu.es/uploads/812fe7d1\\_d505\\_4825\\_9db3\\_8438d78a406c.pdf](http://www.lis.edu.es/uploads/812fe7d1_d505_4825_9db3_8438d78a406c.pdf)

ENERGY SECTOR MANAGEMENT ASSISTANCE PROGRAM (ESMAP) (2012) Manual De Geotermia: Como Planificar Y Financiar La Generación De Electricidad. Recuperado de: [www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP\\_GEOTHERMAL\\_Spanish\\_book\\_Optimized.pdf](http://www.esmap.org/sites/default/files/esmap-files/ESMAP_GEOTHERMAL_Spanish_book_Optimized.pdf)

Gil Gonzales, A. M., (2019). Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Tesis. La Energía Geotérmica Como Fuente Alternativa De Abastecimiento Para La Demanda De Colombia. Recuperado de:

<https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/26919/%20amgilg.pdf;jsessionid=DFE60DE850EA9E6A4F80792F580228EF.jvm1?sequence=1>

Hervey C., Beardsmore, G., Moeck, I., Ruter, H., Bauer, Stefan. Best practices guide for geothermal exploration (English). Washington, D.C. World Bank Group.

<http://documents.worldbank.org/curated/en/190071480069890732/Best-practices-guide-for-geothermal-exploration>

INSTITUTO DE ESTUDIOS AMBIENTALES – IDEA Sede Manizales La geotermia: alternativa energética renovable y amigable.

[https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines\\_ambientales/boletin\\_189.pdf](https://idea.manizales.unal.edu.co/publicaciones/boletines_ambientales/boletin_189.pdf)

INSTITUTO GEOLOGICO Y MINERO DE ESPANA (IGME) La Energía Geotérmica (2015) Disponible

<https://www.igme.es/geotermia/Ficheros%20PDF/MasInfor/Folleto%20color.pdf>

INSTITUTO DE PARA LA DIVERSIFICACIÓN Y AHORRO DE ENERGÍA (IDAE) e INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (IGME) (2008), Manual de Geotermia. Disponible

[https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones\\_idae/10952\\_manual\\_geotermia\\_a2008.pdf](https://www.idae.es/sites/default/files/documentos/publicaciones_idae/10952_manual_geotermia_a2008.pdf)

Lund J y Toth A. (2020) Direct Utilization of Geothermal Energy 2020 Worldwide Review, Proceedings World Geothermal Congress 2020. Oregon Institute of Technology, USA Ana-Geo Ltd., Hungary

[www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf](http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/2020/01018.pdf)

Llopis G. y Angulo V., (2008) Guía de la Energía Geotérmica, FUNDACIÓN DE LA ENERGÍA DE LA COMUNIDAD DE MADRID (FECM).

Mackowski T., Sowizdzal A., and Wachowcz-Pyzik A. (2019) *Seismic Methods in Geothermal Water Resource Exploration: Case study from the Lodz Trough, Central Part of Poland*, Geofluids <https://doi.org/10.1155/2019/3052806>

Marzolf, Natacha. (2014). Emprendimiento De La Energía Geotérmica En Colombia, BANCO INTERAMERICANO DEL DESARROLLO. ISAGEN. Disponible

[www.madrid.org/bvirtual/BVCM005842.pdf](http://www.madrid.org/bvirtual/BVCM005842.pdf)

Moreno-Rendón, D. A., López-Sánchez, J., & Blessent, D. (2020). Geothermal Energy in Colombia as of 2018. *Ingeniería y Universidad*, 24(1). Disponible

<https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu24.geic>

Otis R. and Schneidermann N., (1997). A process for evaluating Exploration Prospects. AAPG Bulletin V.81 N 7 P 1087-1109

Pita Moreno, W, Artunduaga Paris, M y Rincón Barrera, L. (2021). Estudio de factibilidad del desarrollo de un proyecto de energía geotérmica de media - baja entalpía a partir de la infraestructura presente en campos petroleros maduros en la cuenca de los Llanos

Orientales de Colombia. Universidad de los Andes. Disponible en:  
<http://hdl.handle.net/1992/56526>

Salazar, S.S., Muñoz, Y. & Ospino, A. Analysis Of Geothermal Energy As An Alternative Source For Electricity In Colombia. *Geotherm Energy* 5, 27 (2017).  
<https://doi.org/10.1186/s40517-017-0084>.

Sanchez, J, Sanz L, & Ocaña L. (2011) Evaluación Del Potencial de Energía Geotérmica. INSTITUTO PARA LA DIVERSIFICACION Y AHORRO DE ENERGIA. Madrid.  
[www.idae.es/uploads/documentos/documentos\\_11227\\_e9\\_geotermia\\_A\\_db72b0ac.pdf](http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11227_e9_geotermia_A_db72b0ac.pdf)

Saunders Ananely (2014), La Energía Geotermica, CENTRO DE GESTIÓN DE LA INFORMACIÓN Y DESARROLLO DE LA ENERGÍA (Cubaenergía).  
[https://www.researchgate.net/publication/337744582\\_La\\_Energia\\_Geotermica](https://www.researchgate.net/publication/337744582_La_Energia_Geotermica)

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO (2021) Estándar geográfico para información Geotérmica. [https://www2.sgc.gov.co/sgc/ide-geocientifica/Documents/Estandares-geocientificos/EstandarGeotermia\\_final.pdf](https://www2.sgc.gov.co/sgc/ide-geocientifica/Documents/Estandares-geocientificos/EstandarGeotermia_final.pdf)

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO (2019) Que es exploración geotérmica  
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Geotermia-exploracion.pdf>

SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO (2019) Geotermia en Colombia  
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf>

Vásquez C., H. (2012). Revista Universidad EAFIT. LA HISTORIA DEL PETRÓLEO EN COLOMBIA., Vol. 30 Núm. 93 (1994), 99–109. Recuperado a partir de <https://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/revista-universidad-eafit/article/view/1418>

White D., (1993) Geological Risking Guide for prospects and plays. AAPG-1993. Bulletin V.77 N – 12 P 2048 – 2060.