



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

1 de 2

Neiva, \_\_\_\_\_ 6 de septiembre de 2023 \_\_\_\_\_

Señores

CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN

UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA

Ciudad

El (Los) suscrito(s):

CESAR AUGUSTO MONTILLA BERNAL \_\_\_\_\_, con C.C. No. 1110602583 \_\_\_\_\_,

MARTIN FELIPE CASAS RAMOS \_\_\_\_\_, con C.C. No. 1070606442 \_\_\_\_\_,

\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,

\_\_\_\_\_, con C.C. No. \_\_\_\_\_,

Autor(es) de la tesis y/o trabajo de grado o \_\_\_\_\_

Titulado: AVANCES TECNOLÓGICOS, APLICACIONES Y EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN COLOMBIA \_\_\_\_\_

presentado y aprobado en el año 2023 como requisito para optar al título de

INGENIERO DE PETROLEOS \_\_\_\_\_;

Autorizo (amos) al CENTRO DE INFORMACIÓN Y DOCUMENTACIÓN de la Universidad Surcolombiana para que, con fines académicos, muestre al país y el exterior la producción intelectual de la Universidad Surcolombiana, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera:

- Los usuarios puedan consultar el contenido de este trabajo de grado en los sitios web que administra la Universidad, en bases de datos, repositorio digital, catálogos y en otros sitios web, redes y sistemas de información nacionales e internacionales “open access” y en las redes de información con las cuales tenga convenio la Institución.
- Permita la consulta, la reproducción y préstamo a los usuarios interesados en el contenido de este trabajo, para todos los usos que tengan finalidad académica, ya sea en formato Cd-Rom o digital desde internet, intranet, etc., y en general para cualquier formato conocido o por conocer, dentro de los términos establecidos en la Ley 23 de 1982, Ley 44 de 1993, Decisión Andina 351 de 1993, Decreto 460 de 1995 y demás normas generales sobre la materia.
- Continúo conservando los correspondientes derechos sin modificación o restricción alguna; puesto que, de acuerdo con la legislación colombiana aplicable, el presente es un acuerdo jurídico que en ningún caso conlleva la enajenación del derecho de autor y sus conexos.

Vigilada Mineducación

La versión vigente y controlada de este documento, solo podrá ser consultada a través del sitio web Institucional [www.usco.edu.co](http://www.usco.edu.co), link Sistema Gestión de Calidad. La copia o impresión diferente a la publicada, será considerada como documento no controlado y su uso indebido no es de responsabilidad de la Universidad Surcolombiana.



CARTA DE AUTORIZACIÓN

CÓDIGO

AP-BIB-FO-06

VERSIÓN

1

VIGENCIA

2014

PÁGINA

2 de 2

De conformidad con lo establecido en el artículo 30 de la Ley 23 de 1982 y el artículo 11 de la Decisión Andina 351 de 1993, “Los derechos morales sobre el trabajo son propiedad de los autores” , los cuales son irrenunciables, imprescriptibles, inembargables e inalienables.

EL AUTOR/ESTUDIANTE: MARTIN FELIPE CASAS RAMOS

Firma: Martin C.

EL AUTOR/ESTUDIANTE: CESAR AUGUSTO MONTILLA BERNAL

Firma: Cesar LB



TÍTULO COMPLETO DEL TRABAJO: AVANCES TECNOLÓGICOS, APLICACIONES Y EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN COLOMBIA

**AUTOR O AUTORES:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
CASAS RAMOS	MARTIN FELIPE
MONTILLA BERNAL	CÉSAR AUGUSTO

**DIRECTOR Y CODIRECTOR TESIS:**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre
GALINDO	JOSE MIGUEL

**ASESOR (ES):**

Primero y Segundo Apellido	Primero y Segundo Nombre

**PARA OPTAR AL TÍTULO DE: INGENIERO DE PETROLEOS**

**FACULTAD: INGENIERIA**

**PROGRAMA O POSGRADO: PETROLEOS**

**CIUDAD: NEIVA**

**AÑO DE PRESENTACIÓN: 2023 NÚMERO DE PÁGINAS: 78**

**TIPO DE ILUSTRACIONES (Marcar con una X):**



Diagramas X Fotografías \_\_\_ Grabaciones en discos \_\_\_ Ilustraciones en general X Grabados \_\_\_ Láminas \_\_\_ Litografías \_\_\_ Mapas \_\_\_ Música impresa \_\_\_ Planos \_\_\_ Retratos \_\_\_ Sin ilustraciones \_\_\_ Tablas o Cuadros X

SOFTWARE requerido y/o especializado para la lectura del documento: N/A

MATERIAL ANEXO: N/A

PREMIO O DISTINCIÓN (En caso de ser LAUREADAS o Meritoria): N/A

**PALABRAS CLAVES EN ESPAÑOL E INGLÉS:**

<u>Español</u>	<u>Inglés</u>	<u>Español</u>	<u>Inglés</u>
1. <u>GEOTERMIA</u>	<u>GEOTHERMAL</u>	6. <u>ENERGIA</u>	<u>ENERGY</u>
2. <u>YACIMIENTO</u>	<u>FIELD</u>	7. <u>TERMALES</u>	<u>THERMALS</u>
3. <u>RECURSOS</u>	<u>RESOURCES</u>	8. <u>TEGNOLOGIA</u>	<u>TECHNOLOGY</u>
4. <u>RENOVABLE</u>	<u>RENEWABLE</u>	9. <u>GEOGRAFIA</u>	<u>GEOGRAPHY</u>
5. <u>GRADIENTE</u>	<u>GRADIENT</u>	10. <u>VOLCÁNES</u>	<u>VOLCANOS</u>

**RESUMEN DEL CONTENIDO:** (Máximo 250 palabras)

En los últimos años, Las energías renovables son parte de las tendencias futuras de eficiencia y cuestiones medioambientales sostenibles (Bozgeyik, et al, 2022). El proyecto "AVANCES TECNOLÓGICOS, APLICACIONES Y EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN COLOMBIA" reúne información sobre la energía Geotérmica, como parte de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), debido a que en el país no se encuentran ampliamente utilizadas, sin embargo, la perspectiva es grande para iniciar la transición energética de los métodos convencionales no renovables, a renovables, haciendo uso de las nuevas tecnologías, y cumpliendo con los lineamientos y requisitos legales que se han añadido recientemente al gobierno Colombiano. Colombia es un territorio con gran capacidad para la explotación de potencia geotérmica, adecuado a su prontitud volcánica generada por la subducción de la placa tectónica de Nazca bajo la placa sudamericana (Rendon et al, 2020) y su posición geográfica en el cinturón de fuego del pacífico. Consecuente a la energía geotérmica tiene gran potencial el cual se ha recopilado en este documento comparando sus ventajas y desventajas con visión a futuro para su aplicación en el país.



**ABSTRACT:** (Máximo 250 palabras)

In recent years, renewable energies are part of future trends in efficiency and sustainable environmental issues (Bozgeyik, 2022). The project "TECHNOLOGICAL ADVANCES, APPLICATIONS AND EXPLORATION OF GEOTHERMIC FIELDS IN COLOMBIA" gathers information about Geothermal energy, as part of the non-conventional renewable energy sources (FNCER), because they are not widely used in the country, however, the perspective is great to start the energy transition from conventional non-renewable methods, to renewable, making use of new technologies, and complying with the guidelines and legal requirements that have been recently added to the Colombian government. Colombia is a territory with great capacity for the exploitation of geothermal power, adequate to its volcanic proneness generated by the subduction of the Nazca tectonic plate under the South American plate (Rendon et al, 2020) and its geographical position in the Pacific Ring of Fire. Consequently, geothermal energy has great potential, which has been compiled in this document comparing its advantages and disadvantages with a future vision for its application in the country.

**APROBACION DE LA TESIS**

Nombre presidente Jurado:

Firma:

Nombre Jurado: INGRID NATALIA MUÑOZ QUIJANO

Firma:

Nombre Jurado: ROBERTO VARGAS CUERVO

Firma:

**AVANCES TECNOLÓGICOS, APLICACIONES Y EXPLORACIÓN DE  
YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN COLOMBIA**



**CESAR AUGUSTO MONTILLA BERNAL  
MARTIN FELIPE CASAS RAMOS**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
NEIVA – 2023**

**AVANCES TECNOLÓGICOS, APLICACIONES Y EXPLORACIÓN DE  
YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN COLOMBIA**



**CESAR AUGUSTO MONTILLA BERNAL  
MARTIN FELIPE CASAS RAMOS**

**Trabajo de grado presentado como requisito académico para optar al título de  
Ingeniero de Petróleos**

**Director:  
MSC. JOSÉ MIGUEL GALINDO SÁNCHEZ  
Ingeniero de Petróleos**

**UNIVERSIDAD SURCOLOMBIANA  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
NEIVA – 2023**

**AVANCES TECNOLÓGICOS, APLICACIONES Y EXPLORACIÓN DE  
YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN COLOMBIA**

**Nota de Aceptación**

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

**Director** \_\_\_\_\_  
**Msc. JOSE MIGUEL GALINDO**

**Jurado** \_\_\_\_\_  
**Dr. INGRID NATALIA MUÑOZ QUIJANO**

**Jurado** \_\_\_\_\_  
**Msc. ROBERTO VARGAS CUERVO**

**Neiva,** \_\_\_\_\_

## DEDICATORIA

*¡¡¡Dedico esta tesis!!!*

*A mi compadre con el cual se compartió grupo de trabajo, de tesis, de bebas, de farras y demás, por su gran amistad y que sea por más años. Cesar.*

*Al profe Roberto por la paciencia que me tuvo y sobre todo la oportunidad que me dio de poder compartir con él en el medio laboral.*

*A la profe Matilde que me dio el secreto, para no errar en ninguna entrevista de trabajo.*

*A mi familia por el apoyo incondicional en este proceso de formación académica.*

*A la profe luz por nunca decirme no a mis ideas, ya que esa es la función de un profesor, apoyar y proyectarlo a uno para que uno crezca.*

*Gracias.*

**Martin Felipe Casas**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi familia por su constante apoyo y comprensión a pesar de las dificultades la manera de solucionar cada uno y superar cada obstáculo apoyándome en todo momento.*

*Agradecimientos al Ing. Jose Miguel Galindo, tutor de este proyecto, por su guía y apoyo, colaboración durante el desarrollo de este trabajo, y gran aporte al estudiantado para una excelente preparación como ingenieros.*

*Agradecimientos al Ing. Ervin Aranda , por su guía y apoyo, y gran aporte al estudiantado para una excelente preparación como ingenieros.*

*A la Universidad Surcolombiana, Institución educativa que me permitió formarme comoprofesional.*

*Gracias ¡!*

**Martin Felipe Casas**

## DEDICATORIA

*¡¡¡Dedico esta tesis, A mi familia el motor que me mueve cada día!!!*

*Gracias a DIOS.*

*Mi Pollo Loco por siempre creer en mí, ser mi amiga, pollo aventurero, donde sea que este siempre llegara blanquita 2.*

*A Papas Cochás por su comprensión y continuo apoyo en mis proyectos de vida y locuras de ideas.*

*A mi oso por ser mi compañera de vida y apoyo en esta meta y las que vendrán.*

*A Tincho por su gran amistad, y apoyo en esta meta y las que vendrán.*

*Y todos aquellos amigos que fueron motivos de alegrías, durante mi paso por la Universidad Surcolombiana.*

*Gracias.*

**Cesar Augusto Montilla Bernal**

## **AGRADECIMIENTOS**

*A mi familia por su constante apoyo y comprensión a pesar de las dificultades la manera de solucionar cada uno y superar cada obstáculo apoyándome en todo momento.*

*Agradecimientos al Ing. Jose Miguel Galindo, tutor de este proyecto, por su guía y apoyo, colaboración durante el desarrollo de este trabajo, y gran aporte al estudiantado para una excelente preparación como ingenieros.*

*Agradecimientos al Ing. Ervin Aranda , por su guía y apoyo, y gran aporte al estudiantado para una excelente preparación como ingenieros.*

*A la Universidad Surcolombiana, Institución educativa que me permitió formarme como profesional.*

*Gracias ¡!*

**Cesar Augusto Montilla Bernal**

# CONTENIDO

RESUMEN .....	13
ABSTRACT .....	15
1. INTRODUCCION .....	17
1.1 OBJETIVOS .....	19
1.1.1 OBJETIVO GENERAL .....	19
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
1.2 ANTECEDENTES .....	21
2. MARCO TEORICO .....	24
2.1 QUE SON LAS ENERGIAS RENOVABLES? .....	24
2.3 GEOTERMIA.....	27
3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA.....	31
3.1 TÉCNICAS GEOLÓGICAS .....	35
3.2 TÉCNICAS GEOFÍSICAS .....	36
3.3 TÉCNICAS GEOQUÍMICAS .....	39
3.4 TÉCNICAS TERMOMÉTRICAS.....	40
3.5 OTRAS TECNOLOGÍAS DE EXPLORACIÓN .....	41
4. CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	44
5. APLICACIONES DE LA ENERGIA GEOTERMICA .....	47
5.1 USOS DIRECTOS.....	47

5.2	BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS .....	48
5.3	ROCA CALIENTE SECA ( <i>HOT DRY ROCK</i> ) /SISTEMAS GEOTÉRMICOS ESTIMULADOS (EGS).....	48
6.	POTENCIAL GEOTÉRMICO EN EL MUNDO .....	51
7.	TECNOLOGÍAS EN PLANTAS GEOTÉRMICAS .....	53
A.	FLASH.....	54
B.	BINARIA .....	54
C.	TURBINAS DE CONTRAPRESIÓN .....	54
D.	TURBINAS DE CONDENSACIÓN .....	55
7.1	CENTRALES ELÉCTRICAS DE VAPOR DE FLASH SIMPLE .....	55
7.2	ENERGÍA GEOTÉRMICA EN SISTEMAS COMBINADOS DE CALOR Y ELECTRICIDAD (CHP), KAKKONDA-SHIZUKUISHI, HONSHU, JAPÓN .....	57
7.3	ESTUDIO DE CASO: COMBINACIÓN DE UN SISTEMA BASADO EN ENERGÍA SOLAR Y GEOTÉRMICA.....	59
7.4	CENTRALES ELÉCTRICAS DE VAPOR DE DOBLE FLASH .....	61
8.	POTENCIAL GEOTERMICO EN COLOMBIA .....	63
8.1	PILOTOS CON GEOTERMIA, PEQUEÑAS INSTALACIONES QUE UTILIZAN FLUIDOS COPRODUCIDOS DE OPERACIONES PETROLERAS .....	67
A)	PILOTOS CON GEOTERMIA, CASANARE .....	67
B)	PILOTOS CON GEOTERMIA, META .....	68
8.2	AVANCE EN LOS PROYECTOS DE ENERGÍA GEOTÉRMICA PARQUE NACIONAL NATURAL DE LOS NEVADOS Y GEOTÉRMICO BINACIONAL	

TUFIÑO – CHILES – CERRO NEGRO.....	68
9. CONCLUSIONES.....	72
10. REFERENCIAS.....	74

# FIGURAS

FIGURA 1. FORMAS DE LIBERACIÓN DE LA ENERGÍA INTERNA DE LA TIERRA.	27
FIGURA 2. YACIMIENTO GEOTÉRMICO .....	28
FIGURA 3. GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA, ROCA CON ALTA TEMPERATURA. .....	29
FIGURA 4. CLASIFICACIÓN DE LOS YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS, SEGÚN SU TEMPERATURA. ....	30
FIGURA 5. FASES DEL DESARROLLO DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO.....	34
FIGURA 6. DELIMITACIÓN DE ZONAS CON POTENCIAL GEOTÉRMICO. ....	43
FIGURA 7. APROVECHAMIENTO ECONÓMICO DE UN YACIMIENTO GEOTÉRMICO. ...	44
FIGURA 8. COMPARACIÓN DE EMISIONES DE CO <sub>2</sub> .....	46
FIGURA 9. ESQUEMA DE UN YACIMIENTO GEOTÉRMICO DE ROCA SECA CALIENTE. .....	49
FIGURA 10. MAPA PLANTAS GEOTÉRMICAS EN EL MUNDO .....	50
FIGURA 11. TIPOS DE PLANTAS GEOTERMOELÉCTRICAS, CONDENSACIÓN, BINARIA. ....	54
FIGURA 12. ENERGÍA PRODUCIDA POR UN SOLO FLASH. ....	55
FIGURA 13. DIAGRAMA DE FLUJO DE CHP DE KAKKONDA-SHIZUKUISHI. ....	57
FIGURA 14. ESQUEMA DEL SISTEMA MULTIGENERACIÓN.....	59
FIGURA 15. COMPARACIÓN DE EFICIENCIAS ENERGÉTICAS Y EXERGÉTICAS DE SISTEMAS MULTIGENERACIÓN.....	60

FIGURA 16. PLANTA DE ENERGÍA GEOTÉRMICA DE DOBLE FLASH CON UNA TURBINA DE DOBLE.....	62
FIGURA 17. MAPA PRELIMINAR DE GRADIENTES GEOTÉRMICOS DE COLOMBIA. ....	63
FIGURA 18. COLOMBIA TIENE CAPACIDAD POTENCIAL DE 1.170 MW DE GENERACIÓN A TRAVÉS DE GEOTERMIA .....	66

## TABLAS

TABLA 1. FASES DEL DESARROLLO DE UN PROYECTO GEOTÉRMICO.....	33
TABLA 2. MÉTODOS GEOFÍSICOS .....	36
TABLA 3. USOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA.....	48
TABLA 4. ESTIMACIONES DE POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA LOS AÑOS 2020, 2030 Y 2050 EN LOS PAÍSES DE LA UE E ISLANDIA, TURQUÍA Y SUIZA.....	51
TABLA 5. ESTIMACIONES DE POTENCIAL GEOTÉRMICO PARA LOS AÑOS 2020, 2030 Y 2050 EN LOS PAÍSES DE LA UE E ISLANDIA, TURQUÍA Y SUIZA.....	52
TABLA 6. CALOR ALMACENADO, Y POTENCIA ELÉCTRICA EN ÁREAS GEOTÉRMICAS DEFINIDAS, COLOMBIA. FUENTE: SGC, 2020.....	65
TABLA 7. CALOR ALMACENADO Y POTENCIA ELÉCTRICA EN ÁREAS DEFINIDAS, COLOMBIA. FUENTE: SGC, 2020.....	65
TABLA 8. DESARROLLO CRONOLÓGICO PROYECTO NEREIDAS .....	69

## RESUMEN

En los últimos años, ha cobrado una importancia significativa la disminución de la huella ecológica para tener una contribución positiva a la calidad ambiental. Las energías renovables son parte de las tendencias futuras de eficiencia y cuestiones medioambientales sostenibles (Bozgeyik, et al, 2022). El proyecto “AVANCES TECNOLÓGICOS, APLICACIONES Y EXPLORACIÓN DE YACIMIENTOS GEOTÉRMICOS EN COLOMBIA” reúne información sobre la energía Geotérmica, como parte de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER), debido a que en el país no se encuentran ampliamente utilizadas, sin embargo, la perspectiva es grande para iniciar la transición energética de los métodos convencionales no renovables, a renovables, haciendo uso de las nuevas tecnologías, y cumpliendo con los lineamientos y requisitos legales que se han añadido recientemente al gobierno Colombiano.

Colombia es un territorio con gran capacidad para la explotación de potencia geotérmica, adecuado a su prontitud volcánica generada por la subducción de la placa tectónica de Nazca bajo la placa sudamericana (Rendon et al, 2020) y su posición geográfica en el cinturón de fuego del pacífico. Consecuente a lo anterior, en el país se encuentra un escenario optimista frente a la potencia eléctrica total de las 21 áreas geotérmicas distribuidas en 80 clusters (fuentes termales individuales o agrupadas) áreas con un alto gradiente de calor. Los mayores recursos se encuentran en las áreas geotérmicas de San Diego, Santa Rosa, Cerro Machín y Nereidas-Botero Londoño, todas ellas se encuentran en el bloque norte de la Cordillera Central. Al sur se encuentran las zonas de Caldera del Paletará y Azufra (Alfaro et al., 2021).

Finalmente, un tema también expuesto son las expectativas que se han

generado dentro de la Industria de hidrocarburos, para aprovechar los pozos abandonados, con buen gradiente de temperatura para transformarlo en un aprovechamiento geotérmico (Santos et al., 2022).

## ABSTRACT

Over the last years, the reduction of the ecological footprint to have a positive impact on the quality of the environment has gained importance. Renewable energies are part of the future trends of efficiency and sustainable environmental concerns (Bozgeyik et al., 2022). The project "technological advances, operative features and exploration of geothermal reserves in Colombia" gathers information about geothermal energy, as part of the non-conventional sources of renewable energies (FNCER), due to the fact that these are not widely used in the country, however, there are big expectations to begin a transition from non-renewable conventional methods, to renewable ones, making use of new technologies, according to the guidelines and legal requirements added recently to the Colombian government.

Colombia is a country with a big potential for the exploitation of geothermal energy, due to its high volcanic activity powered by the subduction of the Nazca Plate under the South American Plate (Rendón et al., 2010) and its geographic position in the Ring of Fire. Due to this fact, there is an optimistic scenario in the country regarding the total electric power of the 21 geothermal areas spread throughout 80 clusters (individual or collective hot springs) with a high heat gradient. The largest concentration of resources are located in the geothermal areas of San Diego, Santa Rosa, Cerro Machín y Nereidas-Botero Londoño, all of them are placed in the northern block of the Central Ranges. To the south, the areas of Caldera del Paletará y Azufral are located (Alfaro et al., 2021).

Finally, a topic that will also be covered are the expectations created within the hydrocarbon industry, to efficiently use the abandoned wells, with an appropriate temperature gradient to transform it into a geothermal exploitation (Santos et al., 2022).

## 1. INTRODUCCION

Una Parte de la energía empleada hoy en el vida proviene de los combustibles fósiles, el postración sucesiva de estas fuentes tradicionales de combustible ha llevado a la mayoría de países del humanidad a atinar soluciones en energías que se aprovechan directamente de recursos considerados inagotables tal el sol, el viento, el agua , el medio ambiente o el calor del interior de la tierra, y que son conocidas tal energías alternativas o fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER).

Según la Unidad de Planeación Nacional Minero Energética (UPME), las energías renovables cubren actualmente cerca del 20% del consumo mundial de electricidad. De igual manera, la Agencia Internacional de Energía (AIE) comenta que o necesario de la vida humana moderna depende de un 80% del petróleo y va en aumento a medida que los países se industrializan y la población aumenta, también crece el consumo deenergía (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

La clasificación de las energías renovables se destaca principalmente en seis grupos: energía eólica, energía hidráulica, energía de los océanos, energía geotérmica, energía solar (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

Para esta investigación se profundiza en la documentación de la energía producida con el calor interior de la tierra, denominada Energía Geotérmica.

Con la finalidad de resaltar el objetivo actual de las empresas energéticas en satisfacer las cada vez mayores y más exigentes necesidades de la población, operando con compromiso, innovación y responsabilidad, implementando energías limpias y eficientes con sistemas amigables con el ambiente.

Es cierto que la transición energética tiene una larga trayectoria para su aplicación masiva, sin embargo, no se debe desconocer los actuales desarrollos que se están implementando a nivel mundial, como también en el territorio nacional.

Por tal razón en este documento se implementa la adquisición de datos y análisis de estudios más exhaustivos de flujo de calor, así como un mejor censo de acuíferos, presencia de termales y roca seca caliente (HDR: *Hot Dry Rock*), también conocidos métodos o sistemas geotérmicos mejorados (EGS: *Enhanced Geothermal Systems*) (Pulido et al., 2011), para tener una fuente bibliográfica robusta de la estimación actualizada del potencial geotérmico del país.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un documento, recolectando información de los avances y aplicaciones de la geotermia como parte de las fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER) en Colombia.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Analizar los recursos geotérmicos de roca seca caliente (HDR: *Hot Dry Rock*), también conocidos actualmente como sistemas geotérmicos mejorados (EGS: *Enhanced Geothermal Systems*), método que permite el desarrollo de la geotermia en lugares sin recursos geotérmicos convencionales.
- Realizar un estudio de las nuevas tecnologías aplicadas a nivel mundial en geotermia y su adaptabilidad en los procesos geotérmicos Colombianos.

- Aplicar los principios de la geología en la descripción de yacimientos geotérmicos su litología y su proyección a futuro.
- Describir los tipos de ambientes geológicos y recursos geotérmicos, su relación con la tectónica, e importancia del gradiente geotérmico para la generación de energía.
- Describir las aplicaciones directas e indirectas de la energía geotérmica en diferentes campos de acción e industrias.
- Apoyar a la industria de hidrocarburos con un documento que sirva como base teórica para la toma de decisiones en cuanto a la aplicación de otros campos de acción energética, como lo es la geotermia.
- Ampliar el conocimiento en cuanto a los yacimientos geotérmicos en Colombia, desarrollando un documento guía que recolecte información actual de los métodos geotérmicos como parte de los FNCER, resaltando su potencial geológico, consecuente a su posición geográfica en el cinturón de fuego del pacífico.
- Analizar los procesos de yacimientos geotérmicos, su importancia en la evaluación y producción de energía, su viabilidad técnica y económica como una fuente no convencional, ambientalmente sostenible.

## 1.2 ANTECEDENTES

La energía geotérmica, para Allahvirdizadeh (2020) es un área estratégica para desarrollar actividades relacionadas con la energía renovable y la investigación futura. Desde hace miles de millones de años, el núcleo de la Tierra produce y emite calor. El centro de la Tierra tiene una temperatura de 5500 °C, igual que la temperatura de la superficie del sol. Este flujo constante de calor a lo largo de miles de millones de años crea una fuente de energía fundamentalmente ilimitada y renovable

Además, dentro de la línea de investigación de recursos geotérmicos se encuentra uno en específico, descrito por, Pulido et al. (2011), como lo son los recursos geotérmicos de la roca seca caliente o por sus siglas en inglés (HDR: *Hot Dry Rock*), o también conocidos métodos o sistemas geotérmicos mejorados (EGS: *Enhanced Geothermal Systems*). Este método ha sido tema de investigación tiempo atrás. Los yacimientos que comúnmente son de mayor cantidad se encuentran a unos 5000 m de profundidad y estos se conforman principalmente por rocas impermeables que tienen una temperatura entre 150°C y 300°C, y no almacenan fluido alguno. Un criterio muy importante para la generación de energía eléctrica es que la temperatura del yacimiento supere los 200°.

Zuffi et al. (2022), explica en su artículo de investigación como la geotermia es una energía renovable muy prometedora que, a diferencia de las energías renovables variables, es independiente de las condiciones externas/climáticas y puede cubrir tanta demanda de electricidad como de calor.

Sin embargo, a pesar de estas características ventajosas, las centrales geotérmicas tradicionales pueden tener impactos ambientales no despreciables: éstos

van desde las emisiones de contaminantes o gases de efecto invernadero hasta el uso relevante de productos químicos, energía y otros recursos durante el desarrollo de la planta (pozos), el funcionamiento y la construcción.

Por lo tanto, es de suma importancia proporcionar una metodología fiable para evaluar el rendimiento medioambiental de los sistemas geotérmicos, que también debería permitir la comparación de los efectos con otras energías renovables y con los combustibles fósiles tradicionales utilizados en el sector de la electricidad y el calor.

Para Rendon et al. (2020), Colombia goza de un gran potencial para la explotación de la energía geotérmica, esto se debe a que en su gran parte territorial es muy abundante su significativo aumento de la actividad volcánica, esto se genera por la subducción de la placa tectónica de Nazca bajo la placa sudamericana. Sin embargo, en el territorio nacional colombiano aún no se ha explotado este tipo de energía. La variable y vulnerable situación energética en Colombia en conjunto con la política de estado de promover e incentivar un cambio para el desarrollo sostenible de los territorios, ha logrado que a través de los años un ambiente favorable para la explotación de los recursos geotérmicos. Por tal motivo, aún existen barreras técnicas, de infraestructura, legales e institucionales que ralentizan el funcionamiento adecuado de estos proyectos existentes y con gran potencial.

Liu et al (2022), desarrolla un método robusto de evaluación de la energía geotérmica recuperable teniendo en cuenta los parámetros óptimos de desarrollo como lo son principalmente para aumentar la energía geotérmica que se puede recuperar y a su vez evitar desastres medioambientales y ambientales como lo son la reducción de la presión del yacimiento o generar un socavón en la superficie.

Justificando que la optimización de los parámetros de desarrollo utilizando el modelo de yacimiento termo-hidro-mecánico totalmente acoplado, el diseño experimental y el modelo proxy.

Argumentando que la energía geotérmica es recuperable, pero los parámetros óptimos de desarrollo para diferentes dobletes son diferentes debido a la complejidad de las estructuras geológicas y la heterogeneidad de los parámetros del yacimiento. Resaltando la importancia de una cuidadosa selección de los parámetros óptimos para el desarrollo de estos proyectos.

Alfaro et al. (2021) Aporta a la ciencia un artículo investigativo donde calcula el potencial geotérmico de Colombia a través del método volumétrico, considerando las dimensiones asignadas a las fuentes termales registradas en el territorio nacional, como fuentes termales individuales o agrupadas, las cuales se asumieron como los posibles reservorios. Donde muestra un escenario optimista, frente a la potencia eléctrica total de las 21 áreas geotérmicas distribuidas en 80 clusters (fuentes termales individuales o agrupadas) con un alto gradiente de calor. Los mayores recursos se encuentran en las áreas geotérmicas de San Diego, Santa Rosa, Cerro Machín y Nereidas-Botero Londoño, todas ellas se encuentran en el bloque norte de la Cordillera Central. Al sur se encuentran las zonas de Caldera del Paletará y Azufral.

Para Santos et al.(2022), un tema que ha generado expectativas dentro de la Industria de hidrocarburos, es aprovechar los pozos abandonados, con buen gradiente de temperatura para transformarlo en un aprovechamiento geotérmico. Para él, una solución viable es reutilizar esos pozos para la recuperación de energía geotérmica de baja calidad y, al mismo tiempo, producir un flujo de ingresos, frenar las emisiones fugitivas y mantener el compromiso de los trabajadores.

Así se evitan los grandes costes iniciales de la perforación y los importantes riesgos de los yacimientos no transmisivos, que siguen siendo los principales obstáculos para el desarrollo de la energía geotérmica.

De igual manera Peña et al (2015) nos apoya la posibilidad del anterior autor, con un texto de investigación donde evalúa la factibilidad técnica y económica del uso de un Ciclo Orgánico de Rankine para la generación de electricidad, esto generado a partir del uso de recurso geotérmico de baja temperatura disponible en varios campos de petróleo en Colombia.

## 2. MARCO TEORICO

### 2.1 ¿QUE SON LAS ENERGIAS RENOVABLES?

Las energías renovables se denominan así de acuerdo a que estas son generadas por los ciclos del planeta tierra, esto permite que se pueda disponer del recurso de manera permanente. Para obtener la energía de las fuentes no convencionales renovables, como energía eólica, solar, biomasa, hidráulica, de océanos o geotérmica, es necesario la utilización de diferentes tecnologías; transformando el recurso en forma de calor, y combustible, analizando los posibles impactos ambientales de estas energías para ser implementadas en la matriz energética del país (López, 2020).

En el territorio Nacional, la energía renovable que se usa de forma más amplia es la producción de energía primaria hidroeléctrica, consecuente a la abundancia de agua en la mayoría de regiones del país, de igual manera no renovables como los combustibles fósiles como: petróleo, gas y carbón, por su gran eficiencia. Sin embargo, existe una proyección a una transición de fósiles a energías limpias y sostenibles. Consecuente a este objetivo, el Gobierno Nacional ha invertido en el desarrollo y aplicación de tecnologías alternativas de producción de energía, que funcionen con recursos renovables, aportando soluciones al problema de la crisis energética mundial y contribuyendo a un medio ambiente más limpio (Área Metropolitana del Valle de Aburrá, 2019).

## 2.2 MARCO NORMATIVO PARA LAS ENERGÍAS RENOVABLES

Se registra la necesidad de tener una normativa ambiental que garantice la conservación y protección de los recursos naturales propios del territorio Colombiano; en consecuencia, se implementa regulaciones a nivel legislativo enfocadas en la optimización técnica y uso eficiente de dichos recursos.

**Decreto - Ley 2811 de 1974:** Reglamenta el código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente (Función Pública, 2023).

**Constitución Política de Colombia 1991:** Pauta los derechos colectivos y del ambiente. Según la (Función Pública, 2023), el referente constitucional ambiental se encuentra enmarcado en los artículos 79 y 80 tal como se indica a continuación:

**Artículo 79:** Reglamenta que el Estado, debe proteger la diversidad e integridad del ambiente, además de conservar las áreas de especial importancia ecológica, fomentando la educación para el logro de estos fines.

**Artículo 80:** El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para certificar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución. Además de garantizar la prevención y control de los factores de deterioro ambiental, imponiendo las sanciones legales pertinentes para la reparación de los daños causados. De igual manera, cooperará con otras naciones en la protección de los ecosistemas situados en las zonas fronterizas.

**Ley 1715/2014:** que regula la integración de las energías renovables no convencionales en el Sistema Energético Nacional

**Decreto 2143/2015 del Ministerio de Minas y Energía:** define los lineamientos para la aplicación de los incentivos establecidos en la ley 1715 de 2014 (Función Pública, 2023).

**Decreto 1543/2017 del Ministerio de Minas y Energía:** Regula un fondo de gestión energética no convencional y eficiente, FENOGE (Función Pública, 2023).

**La ley 2099/2021:** Regula las condiciones de transición energética, dinamización del mercado, reactivación económica y registro geotérmico.

**Decreto 1318 de 2022:** Este decreto se encuentra relacionado con el desarrollo de actividades orientadas a la generación de energía eléctrica a través de geotermia (Función Pública, 2023).

**Resolución 40302 de 2022:** Establece los requisitos técnicos que regirán el Registro Geotérmico y los Permisos de exploración y explotación del Recurso Geotérmico con fines de generación de energía eléctrica (ANLA, 2020).

## **2.3 GEOTERMIA**

Un yacimiento geotérmico hace referencia al calor contenido en el interior de la tierra, con posibilidad de un aprovechamiento económico, es más común en las zonas activas de la corteza terrestre, a cierta profundidad la capa superior del manto se compone por magma, cabe recalcar que a mayor profundidad mayor es la temperatura esto es conocido como gradiente geotérmico, cada vez que se profundiza en la tierra 100 metros el valor geotérmico sube de 15°- 30°C a modo de ejemplo si profundizamos alrededor de 2 km podemos obtener temperaturas de alrededor de 200°-300°C (López, et al, 2013).

Para lograr con éxito la extracción del calor del subsuelo se es importante contar con un fluido en subsuelo y también lograr una perforación a gran profundidad para poder aprovechar el aumento del gradiente geotérmico (ICGC, 2022).

En determinados puntos de la tierra el flujo de calor puede variar, llegando a alcanzar valores de hasta diez y veinte veces el flujo medio. Estas áreas con flujo elevado están relacionadas con fenómenos geológicos singulares, como una actividad sísmica elevada, zonas de subducción de placas y una actividad volcánica actual o muy reciente. Estos fenómenos geológicos representan distintas formas de liberación de la energía interna de la Tierra, véase (Figura 1. Formas de liberación de la energía interna de la Tierra.Figura 1), (López, et al, 2013).

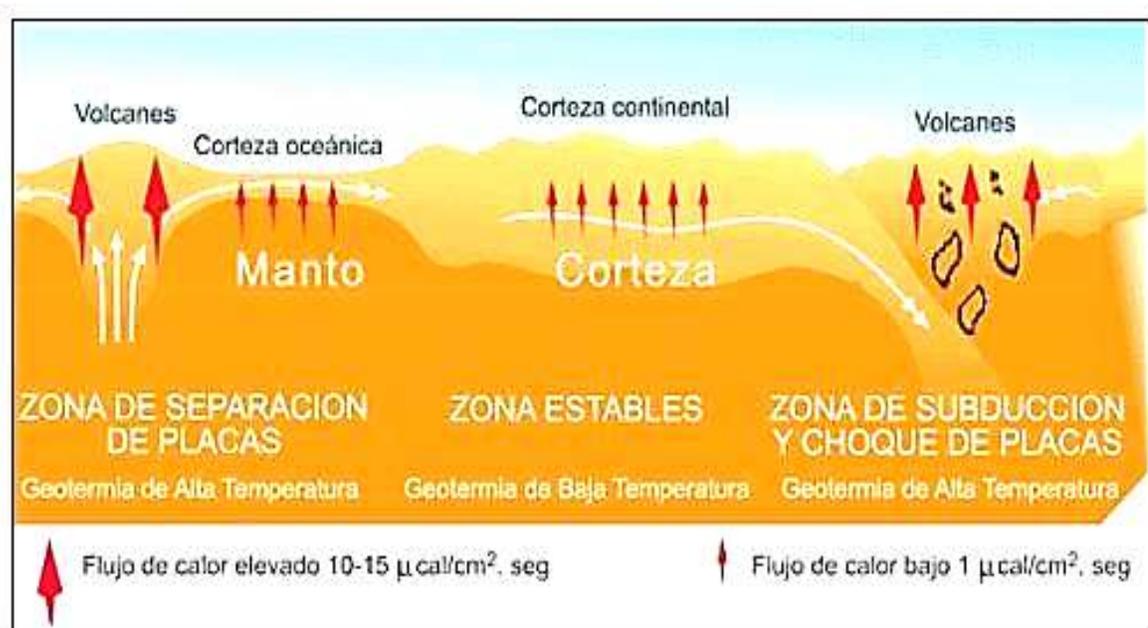


Figura 1. Formas de liberación de la energía interna de la Tierra.

Fuente: (López, et al, 2013).

A diferencia de otras energías sostenibles como la eólica, solar, hidroeléctrica, la energía geotérmica no depende de las condiciones climáticas; requiere de perforaciones profundas en el subsuelo esto con el objetivo de obtener del subsuelo vapor caliente y este a su vez encontrar un aprovechamiento de generación de energía hasta los 365 días del año.

Y más aún no se requiere de detener la planta en temas de mantenimiento y de más ya que su factor de capacidad neta sería el más alto esto comparado con las demás energías renovables (petroquimex, 2022).

Sin embargo, a pesar de estas ventajas, las plantas de energía geotérmica tradicionales pueden tener impactos ambientales no despreciables: estos van desde emisiones de contaminantes o gases de efecto invernadero hasta el uso relevante de productos químicos, energía y otros recursos durante el desarrollo de la planta (pozos), operación y construcción. Por lo tanto, es de suma importancia implementar una metodología confiable para evaluar el desempeño ambiental de los sistemas geotérmicos, véase (Figura 2), que también debería permitir una comparación de los efectos con otras energías renovables y con los combustibles fósiles tradicionales utilizados en el sector de la energía y el calor (Zuffi et al., 2022).

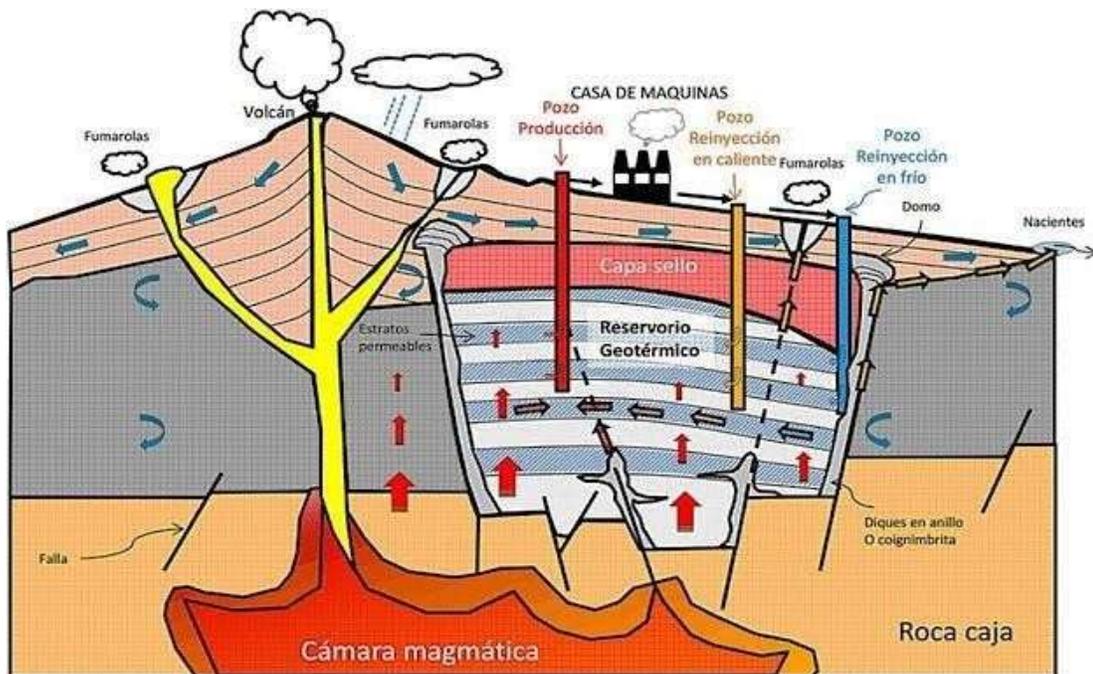


Figura 2. Yacimiento Geotérmico

Fuente: (eje21, 2022)

Los recursos geotérmicos pueden ser: vapor, agua caliente, rocas secas calientes (*hot dry rock*), rocas geopresionadas, es decir rocas porosas que contienen en su interior mezcla de agua y gases a una presión y temperatura elevada, y rocas fundidas (magma), véase (*Figura 3*).

En años anteriores por razones económicas los fluidos con temperaturas inferiores a 150 °C se destinaban únicamente a usos térmicos directos y una temperatura superior a la producción de energía eléctrica (Sierra & Pedro, 1998). Sin embargo, en la actualidad la tecnología ha avanzado de tal manera que ha optimizado equipos y estructuras capaces de generar electricidad con temperaturas inferiores a 150°C, con capacidad limitada, pero se insiste en estudios para su adelanto.

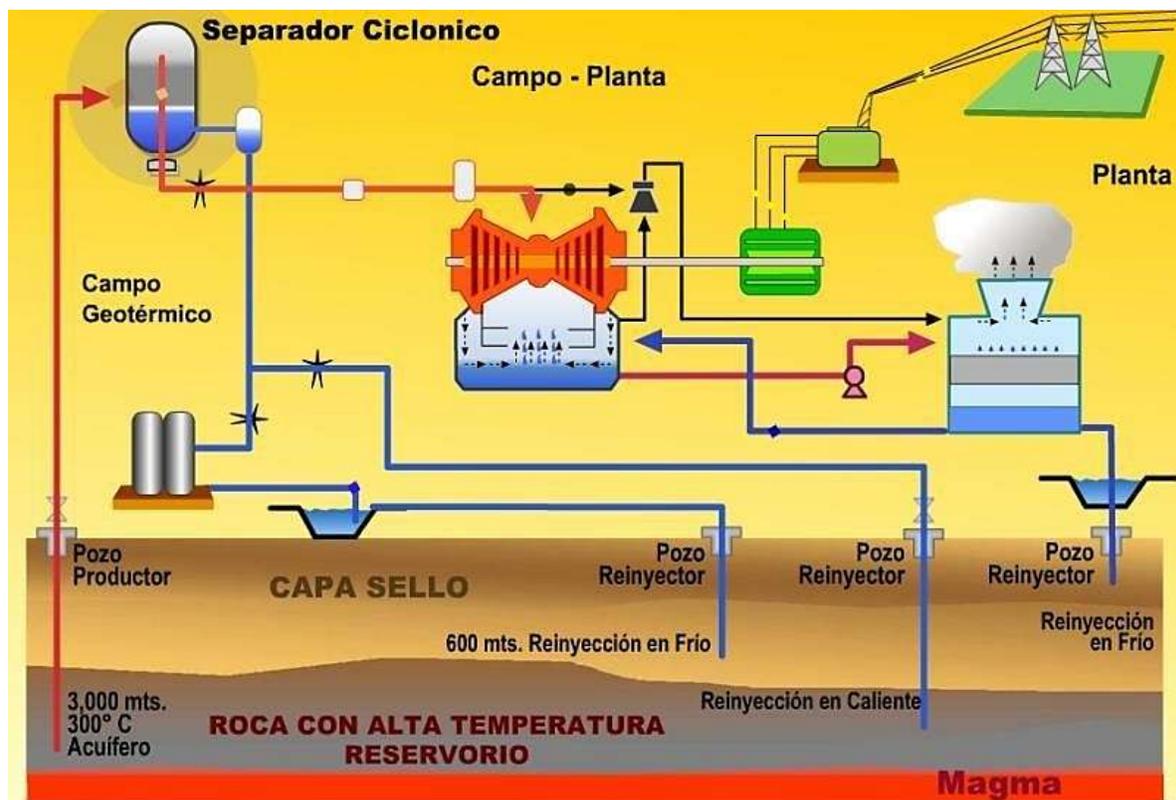


Figura 3. Generación de energía Eléctrica, Roca con alta temperatura.

Fuente: División de Geotermia, (2007)

Los recursos geotérmicos de alta temperatura son considerados superiores a los 150°C, mientras que, para definir a los medios y bajos recursos de temperatura, se sitúan por debajo de los 150°C, como se muestra en la (*Figura 4*).



*Figura 4 . Clasificación de los yacimientos geotérmicos, según su temperatura.*

*Fuente: Elaboración propia.*

### 3. EXPLORACIÓN GEOTÉRMICA

En la búsqueda de cualquier recurso natural, se debe plantear una base sólida de un plan a seguir esto con el fin de poder localizar el área geotérmica de mayor interés y también que provea los objetivos adecuados para la producción de fluidos, para la identificación de un área geotérmica de interés se genera una estrategia en el proceso de exploración, por con siguiente es identificar que técnica usar para el mejor aprovechamiento de este recurso energético (Barbier, 2002).

El mayor riesgo en un proyecto geotérmico comúnmente se evidencia durante la fase de exploración, esto se debe al poco conocimiento que se tiene acerca del recurso; a pesar de ello, no hay una certeza hasta no tener una revisión y análisis de los datos disponibles, de la exploración superficial y de la exploración en pozos. Por consiguiente, siempre de manera adecuada al proyecto de exploración es bueno garantizar los resultados con la mayor cantidad de técnicas (Barbier, 2002).

Para lograr el éxito radica en la realización de estudios técnicos previos a la perforación exploratorio, esto con el fin de entre más información permite mejor una construcción de un modelo conceptual del sistema geotérmico, y de esta manera reduciendo la probabilidad de fallo y acercando más a la realidad para lograr el éxito en la exploración.

Sin embargo, según (Marzolf, 2014) solamente la perforación exploratoria y la evaluación del yacimiento pueden confirmar la existencia del recurso geotérmico, identificando las siguientes características:

- 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; El desarrollo de un proyecto geotérmico se podría realizar en varias fases, véase (Tabla 1); que se presentan a continuación:

Fase	Objeto	Actividades
<b>Fase 1. Reconocimiento</b>	Establecer las zonas con potencial geotérmico. Delimitar las áreas para los estudios técnicos y ambientales de prefactibilidad. Planear los estudios de prefactibilidad.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Identificación de zonas potenciales.</li> <li>2. Análisis de viabilidad preliminar de un desarrollo geotérmico.</li> <li>3. Análisis de restricciones ambientales.</li> <li>4. Planeación de la ejecución de los estudios de prefactibilidad</li> <li>5. Solicitud de permisos de estudios</li> </ol>
<b>Fase 2. Prefactibilidad</b>	Determinar la potencial existencia del recurso geotérmico, la posible localización de la fuente de calor y el reservorio (Modelo Geotérmico Conceptual). Establecer la viabilidad técnica y ambiental del desarrollo de un campo geotérmico.	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Estudios de geología, geofísica, geoquímica e hidrogeología.</li> <li>7. Gradiente térmico.</li> <li>8. Elaboración de modelos geotérmicos.</li> <li>9. Selección de sitios de perforación.</li> <li>10. Diseño de perforaciones exploratorias.</li> <li>11. Elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para exploración y uso del recurso.</li> <li>12. Trámite de la licencia ambiental para exploración y uso del recurso.</li> </ol>
<b>Fase 3. Factibilidad</b>	Localizar y llegar hasta el reservorio, obtener fluidos y evaluar la calidad y cantidad disponible del recurso para generación de energía. Realizar análisis de viabilidad técnica, económica y ambiental del proyecto geotérmico. Realizar los diseños requeridos y planear el desarrollo del campo geotérmico y la planta de generación.	<ol style="list-style-type: none"> <li>13. Perforaciones exploratorias.</li> <li>14. Evaluación del yacimiento.</li> <li>15. Análisis de viabilidad técnica y económica del desarrollo de un proyecto geotérmico.</li> <li>16. Diseño de la planta y planeación del desarrollo del campo.</li> <li>17. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para las perforaciones exploratorias.</li> <li>18. Realización de los estudios ambientales complementarios para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta de generación.</li> <li>19. Trámite de la modificación de licencia ambiental para el desarrollo del campo, construcción y operación de la planta.</li> </ol>
<b>Fase 4. Desarrollo del Campo, Construcción de la Planta y Puesta en Operación</b>	Desarrollo del campo geotérmico con criterios de sostenibilidad. Puesta en operación de la planta y el campo geotérmico	<ol style="list-style-type: none"> <li>20. Perforación de pozos de producción y pozos de reinyección.</li> <li>21. Construcción de la planta y obras asociadas (líneas de conducción de agua y vapor, vías de acceso, subestación, línea de conexión).</li> <li>22. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental (PMA) para cada una de las actividades de desarrollo del campo.</li> <li>23. Alistamiento y pruebas de la planta y el campo.</li> <li>24. Puesta en operación comercial.</li> <li>25. Ejecución del Plan de Manejo Ambiental para la operación de la planta y el campo geotérmico.</li> </ol>

Tabla 1. Fases del desarrollo de un proyecto Geotérmico.

Fuente: (Marzolf, 2014)

Para los proyectos geotérmicos hay algunas fases para su desarrollo, véase (Figura 5), tales como prefactibilidad, factibilidad y desarrollo.



Figura 5. Fases del desarrollo de un proyecto Geotérmico.

Fuente: (Marzolf, 2014)

Entre las técnicas empleadas para las distintas fases de la exploración de los recursos geotérmicos, están los estudios geológicos, geofísicos, geoquímicos y técnicas termométricas (Ramírez, 2019).

### 3.2 Técnicas geológicas

El principio de las técnicas geológicas enfocadas a la exploración es ubicar y caracterizar anomalías como fuentes de calor, el reservorio y la capa sello (Sierra & Pedro, 1998).

Lo primero a realizar es la cartografía del lugar objetivo, donde se incluirá la secuencia litológica, vulcanológica e información estructural (fallas y fracturas), además de información topográfica, información hidrotermal, tales como manifestaciones superficiales, áreas de alteración, y finalmente información radiométrica y mapeo de gases del subsuelo (CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, Hg, B) (Ramírez, 2019).

Para llevar a cabo estas tareas se emplean diversas herramientas disponibles, entre las que están: imágenes satelitales y fotografía aérea, sistemas de posicionamiento global (GPS), modelos digitales de elevación del terreno (MDE), detectores de gases, sistemas de información geográfica (SIG); con base a toda la información conseguida, se pueden elaborar modelos geológicos preliminares del subsuelo, sirviendo de guía para los siguientes estados de la exploración (Hiriart Le Bert et al., 2011). Las técnicas geológicas también incluyen otro tipo de estudios, entre los que se encuentran: el estudio petrológico de lavas y productos volcánicos para caracterizar la naturaleza del magma, esencialmente su grado de acidez y diferenciación, los estudios estratigráficos los cuales establecen las características del reservorio y de la capa sello. Y, las técnicas hidrogeológicas, que integrando estudios geológicos y de aguas subterráneas se es posible determinar las estructuras y sistemas estratigráficos como también el sentido de la circulación de los fluidos en el área de recarga y a profundidad. (Sierra & Pedro, 1998)

### **3.3 Técnicas geofísicas**

Los métodos geofísicos, véase (*Tabla 2*); se emplean como complemento y apoyo a la exploración geológica, se cuenta con diversas técnicas que miden alguna propiedad física del subsuelo, esto mediante sondeos realizados en superficie o levantamientos aéreos.

<b>MÉTODO</b>	<b>PARÁMETRO DE MEDIDA</b>	<b>PROPIEDAD FÍSICA</b>
Gravedad	Variación espacial de la fuerza del campo de gravedad de la Tierra	Densidad
Magnético	Variación espacial en la fuerza del campo geomagnético.	Susceptibilidad magnética y remanencia.

*Tabla 2. Métodos Geofísicos*

*Fuente: (López, et al, 2013).*

Los datos obtenidos se usan en la elaboración de modelos unidimensional, bidimensional o tridimensionales de la distribución de la propiedad medida en el subsuelo, para luego dar una interpretación geológica del modelo geofísico (Hiriart Le Bert et al., 2011).

El complemento necesario para una aplicación de la geofísica es con diversos métodos como lo son la Perforación y la Geología, véase, (*Figura 6*), esto con el fin de aumentar el porcentaje de certeza y disminuir el de incertidumbre. Cada distinto método tiene una propiedad física, la misma que determina el grado de aplicación (López, et al, 2013).

*a) Métodos eléctricos:* Este tipo de métodos se basan en la medición de la resistividad eléctrica de las rocas, introduciendo en el terreno una corriente de intensidad conocida y midiendo la diferencia de potencial producida. Para aumentar la temperatura se es necesario disminuir la resistividad, esto se debe a la variedad de rocas alteradas presentes, pero principalmente es por la presencia de aguas salinas (López, et al, 2013).

*b) Métodos gravimétricos* El método gravimétrico estudia las variaciones en el campo gravitacional de la Tierra que se producen como consecuencia de la diferencia de densidades de las distintas formaciones geológicas (Ochieng, 2016). Los datos de las anomalías gravitacionales no son el único indicativo para confirmar que una zona es geotérmica, estos datos lo que nos permiten es una interpretación acerca de las estructuras profundas, litología, distribución, características estructurales de su geología; como fallas, fracturas, alteraciones (Barbier, 2002).

*c) Métodos magnetométricos;* Los estudios magnéticos se fundamentan en la respuesta magnética, inducida por el campo magnético de la Tierra, en ciertos minerales que se encuentran cerca de la superficie terrestre. Con los cambios espaciales en el campo magnético que se detectan se pueden deducir variaciones en la distribución de minerales magnéticos y relaciones con estructuras geológicas (Barbier, 2002). Los estudios magnéticos son una herramienta útil para la prospección geotérmica en la detección de zonas que carecen de rasgos magnéticos, debido a la destrucción de la magnetita en rocas cercanas a la superficie por alteración hidrotermal (Ochieng, 2016).

*d) Métodos sísmicos* La prospección sísmica aprovecha la capacidad de las ondas elásticas o sísmicas de ser transmitidas a través de las rocas, las ondas sísmicas son generadas por pequeños terremotos producidos natural o artificialmente, y se miden sus velocidades al ser reflejadas o refractadas (Sierra & Pedro, 1998). La interpretación de la información sísmica provee datos para ayudar a determinar las fallas presentes que a su vez esto determina la estructura, las propiedades de las rocas y la dirección de los fluidos calientes a superficie (Barbier, 2002).

e) *Flujos de calor* El cálculo de flujos de calor es una técnica aún más específica que los métodos tradicionales mencionados anteriormente, el objetivo es reconocer las zonas de mayor anomalía térmica (Sierra & Pedro, 1998). La realización de la prospección requiere de la perforación de pozos de poca profundidad, menores a 300 m, en los que se efectúa la medición de temperaturas, para calcular el gradiente geotérmico. En los puntos donde se obtuvo el gradiente se mide la conductividad térmica de la roca, esto a través de mediciones de laboratorio sobre muestras de núcleo. Con esto se puede determinar el flujo de calor en cada punto como también ser un indicador de las mayores zonas de interés geotérmico (Barbier, 2002).

### **3.4 Técnicas geoquímicas**

La importancia de los estudios geoquímicos resalta en la etapa de reconocimiento esto es por tener el objetivo de evaluar las temperaturas y condiciones químicas de los fluidos en profundidad esto está condicionado a tener manifestaciones como lo son las aguas termales, muestra de vapor de fumarolas y muestreo de gas (Kaltschmitt et al., 2013),

Para (Barbier, 2002) los estudios geoquímicos de fuentes geotérmicas involucran tres principales pasos:

- 1) recolección de muestras,
- 2) análisis químico
- 3) interpretación de datos.

La composición química e isotópica de los fluidos termales proporcionan información acerca de la composición y distribución de los fluidos en profundidad, su temperatura, presión y estado físico (vapor o líquido), se encuentran rocas que están asociadas a rocas superficiales, origen y tiempo de residencia del fluido, dirección de circulación, permeabilidad y flujo natural de calor. Los métodos geoquímicos son importantes para la etapa de exploración donde sobresale por su bajo costo comparado con métodos geofísicos (Sierra y Pedro, 1998).

### **3.5 Técnicas termométricas**

El objetivo principal en la explotación geotérmica es medir las anomalías térmicas, y usando estas técnicas termométricas se pueden determinar. Las medidas que hacen parte de las técnicas termométricas están la medida de la distribución de temperatura superficial; medida de gradiente, flujo térmico en pozos; y determinación de la descarga superficial natural de calor. El gradiente térmico de zonas al interior de las placas tectónicas está en el orden de 0.01 hasta 0.03°C/m (profundidad), sin embargo en acuíferos hidrotermales las anomalías de gradientes tiene un valor de diez o mayores (Hiriart Le Bert et al., 2011).

#### **3.5.1 Técnicas de microtermometría**

La microtermometría de inclusiones fluidas es una técnica analítica con multitud de aplicaciones, tanto en estudios académicos como en exploración minera. Para, Camprubí (2009), esta técnica, sobre una sólida base de estudios petrográficos, permite determinar o estimar

- Las temperaturas de formación de un depósito mineral,
- La salinidad y contenido en diversos solutos de los fluidos mineralizantes,

- La evolución temporal y la zonación espacial de la temperatura y la salinidad
- La existencia de diversos mecanismos de precipitación mineral
- La existencia de pulsos hidrotermales de diversa índole.
- La presencia de canales de alimentación en un depósito hidrotermal y relacionar la posición de éstos con la distribución de mineralizaciones económicas
- La migración de salmueras a través de una cuenca sedimentaria y su relación con la maduración del petróleo o la formación de ciertos tipos de depósitos minerales
- La interacción entre fluidos químicamente contrastantes.
- La posición de la paleosuperficie o del paleonivel freático bajo presión hidrostática.
- La tipología o subtipología a la que puede pertenecer una mineralización concreta, así como muchas otras cuestiones de índole metalogenética.

De esta forma, esta técnica potencialmente aporta información esencial acerca de la génesis de la mayoría de yacimientos minerales, y puede ser insustituible para guiar o condenar la exploración en un yacimiento o distrito minero (Camprubí, 2009).

### **3.6 Tecnologías de exploración, adicionales**

Para los recursos geotérmicos la exploración de recursos geotérmicos se caracteriza por apoyarse en las diversas técnicas presentadas anteriormente. Y más recientemente se han realizado estudios con tecnologías de reciente creación, entre las que destacan las técnicas de percepción remota, las cuales representan hoy en día una de las opciones con un avance continuo, debido al desarrollo constante de nuevos satélites y a los diversos sensores que estos poseen, los cuales miden parámetros en la superficie terrestre logrando la detección de potencial geotérmico.

En la última década se han realizado varias investigaciones enfocándose principalmente en parámetros como: la mineralogía de alteración, las anomalías de

temperatura, los flujos de calor, como también la deformación de la superficie (Ramírez, 2019).

### **3.5.1 Mapeo Mineral**

Las herramientas de percepción remota en la exploración geotérmica se han dirigido principalmente en la identificación de materiales en superficie y grupos de minerales, con la intención de extraer y mapear información de alteraciones hidrotermales asociadas a los cambios en temperatura y química del ambiente resultado de la interacción que llega a ocurrir con agua caliente y vapor de gas de un sistema geotérmico (Wang & Carranza, 2016).

Existen varias investigaciones que se apoyan en imágenes multispectrales e hiperespectrales como imágenes LANDSAT y ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer) con las cuales, se ha detectado zonas de alteración mineral, así como su mapeo empleando modelos basados en Análisis de Componentes Principales (ACP), complementando con diversos cocientes de bandas, útiles en la detección de alteraciones minerales hidrotermales, mapeo mineral y geológico.

El proceso descrito se ha usado en el mapeo de depósitos magmáticos hidrotermales, y también en metales preciosos; Honghai, China, (Wang & Carranza, 2016) donde se evidencia una alternativa de bajo costo de zonas de alteración ubicadas en aéreas con gran exposición de las rocas. Además en el desierto oriental de Egipto (Khalil, et al, 2016) se usa imágenes Landsat, que optimizan la detección de minerales de alteración mineral, para un posterior mapeo y detectar las áreas con presencia de titanita, mineral ligado a sistemas hidrotermales.

### **3.5.2 Temperatura Superficial y Flujo de Calor**

Los datos que se obtienen de los sensores TIR (*Thermal Infrared*) se usan en la detección de temperatura superficial que contribuyen para ser correlacionados con calor geotérmico. Aplicable a la detección de temperatura superficial, estimación del flujo de calor geotérmico y su potencial. También fue posible, usando una combinación de imágenes multiespectrales e hiperespectrales, como ASTER y MODIS estimar el Flujo de Calor Geotérmico, que arrojan resultados en la identificación de cambios de fondo y efectos estacionales para identificar las anomalías geotérmicas (Vaughan et al., 2012).

### **3.5.3 Percepción remota**

No se pueden asociar directamente los mapas de fallas y fracturas con el de temperatura de superficie para delimitar una zona con potencial geotérmico, pues existen otros factores a considerar. Cuando estas estructuras geológicas se hacen presente es posible inferir la posible existencia de cuerpos magmáticos que, debido a su ascenso y distribución, generan actividad hidrotermal causante del fracturamiento y fallamiento de las rocas adyacentes (Nájera-Rocha, et al. 2022).

Es importante explicar que las islas de calor que existe debido a la presencia de zonas urbanas e infraestructura en general; podría confundirse con manifestaciones termales del subsuelo debido a la alta temperatura que generan ya sean construcciones, viviendas o vías de comunicación terrestre. De esta forma, la anomalía de Bouguer es utilizada para descartar zonas del subsuelo que se encuentran influenciadas por factores no geológicos. (Nájera-Rocha, et al. 2022).

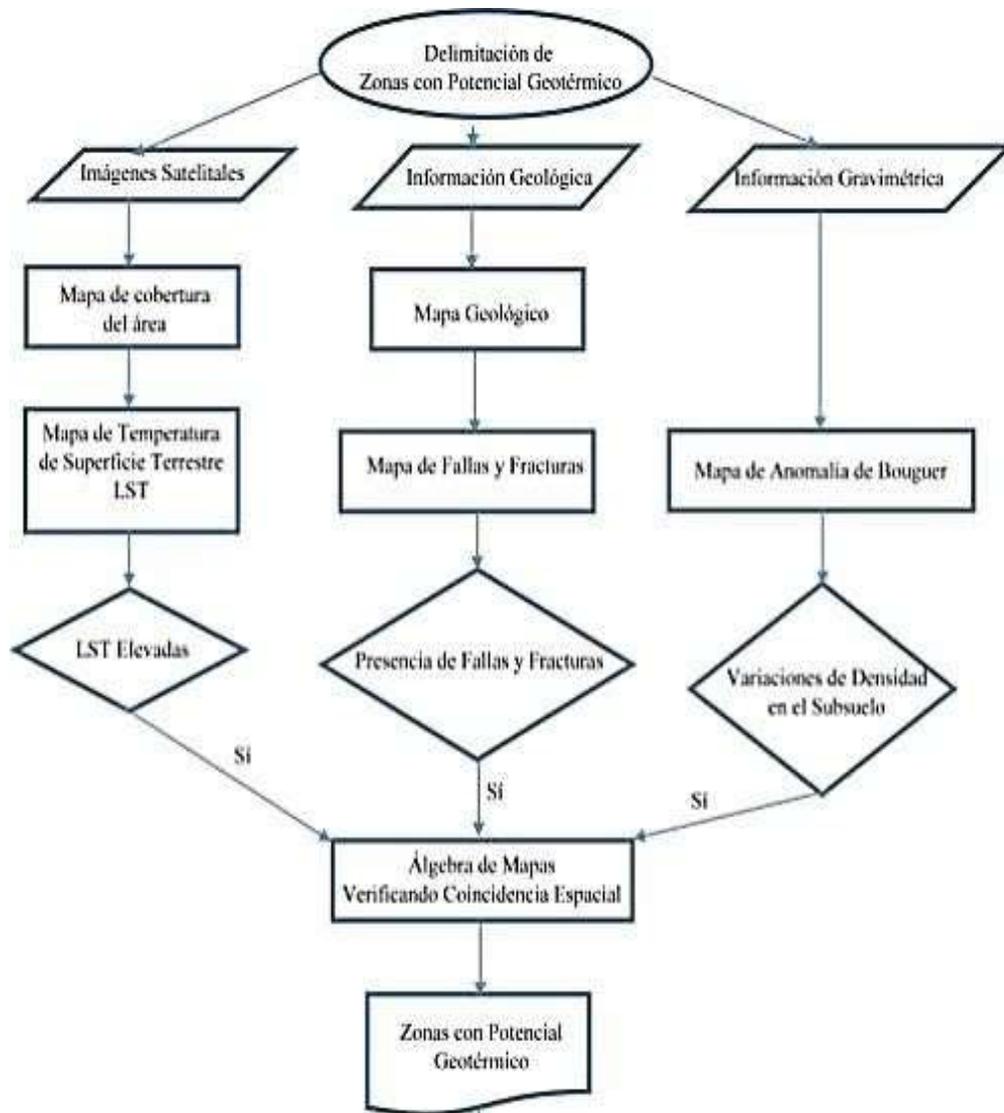


Figura 6. Delimitación de zonas con potencial geotérmico.

Fuente: (Nájera-Rocha, et al., 2022). Modificado de (Lago & Rodríguez, 2019).

#### 4. CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA

“De las principales ventajas que tiene la energía geotérmica es la no dependencia de condiciones climáticas. Por ejemplo, un contraste sería la instalación de energía solar con capacidad de 100 megavoltios (MW) solo podría generar 30 MV; esta baja respuesta de energía característica

de la energía solar o eólica se debería apoyar con energía fósil o con dispositivos de almacenamiento que pueden ser muy caros. Por lo contrario la geotermia no cuenta con esa dificultad, véase, (*Figura 7*), dijo la titular de Geotermia en la Sener, Michelle Ramírez (petroquimex, 2022).



*Figura 7. Aprovechamiento económico de un yacimiento Geotérmico.*

*Fuente: (depositphotos, 2022)*

Para nadie es un secreto que en la actualidad la mayor parte de la energía empleada proviene de los combustibles fósiles, por lo tanto el agotamiento constante de estas fuentes tradicionales de energía ha puesto la tarea en los países del mundo a encontrar soluciones en energías que se aprovechan directamente de recursos considerados inagotables conocidas como energías alternativas o renovables.

Los sistemas energéticos están cambiando en todo el mundo debido a una variedad de factores (Robinius et al., 2017), que incluye:

- La creciente demanda de energía en el mundo provocada por la globalización y el crecimiento económico de los países emergentes;
- El aumento de la participación de las energías renovables en el mix-energético, especialmente en el mix-eléctrico;
- La necesidad de restricciones en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI),
- incluida la reducción de CO<sub>2</sub> en el sector de la energía;
- Necesidad de limitar la contaminación del aire local;
- Desregulación en el sector de la energía, que permita la entrada de nuevos competidores al mercado (aunque no fomente la construcción de nueva infraestructura);
- Los requisitos de seguridad y confiabilidad energética;
- El aumento de la descentralización de las redes eléctricas debido al crecimiento de la generación local.
- En este contexto, los sistemas de hidrógeno son parte de la discusión global sobre la modernización de los sistemas energéticos y, en consecuencia, su producción aparece como un nuevo y prometedor medio para contribuir a la gestión del cambio o la transición energética.

Consecuente a los argumentos anteriores, la reducción de las emisiones de carbono ya fue aceptada como estrategia por las naciones industrializadas y solo queda adoptar las medidas necesarias para lograr este fin (Power, 2009).

Siendo la energía geotérmica, la energía no convencional renovable con menores emisiones de CO<sub>2</sub>, véase, (Figura 8).

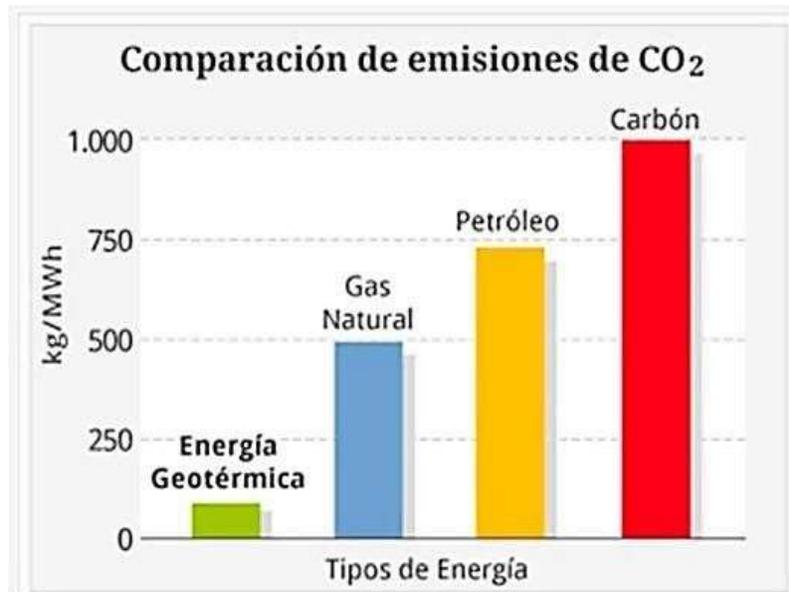


Figura 8. Comparación de emisiones de CO<sub>2</sub>

Fuente: Interempresas, 2022

## 5. APLICACIONES DE LA ENERGIA GEOTERMICA

Las aplicaciones de la geotermia, véase (Tabla 3), son variadas, tales como:

- a) Producción eléctrica a través de la Hidrogeotermia (Lohse, 2018)
- b) Los pozos perforados en un reservorio geotérmico producen agua caliente y vapor de agua desde una profundidad de hasta 3 km.
- c) La energía geotérmica se convierte en una planta de energía eléctrica, (Dickson, MH., et al 2006).
- d) Usos directos, comerciales y domésticos.

## **5.1 Usos Directos**

Aplicaciones que utilizan el agua caliente, directamente, de los recursos geotérmicos

Ejemplos: calentamiento de espacios, cultivos y secado de madera, preparación de alimentos, cría de peces, procesos industriales, etc.

Ejemplos históricos pertenecientes a los antiguos tiempos romanos, como son los baños y balnearios (Dickson, MH., et al 2006).

## **5.2 Bombas de Calor Geotérmicas:**

Las bombas de calor geotérmicas, aprovechan las temperaturas relativamente constantes de la tierra, para ser empleadas como fuente generadora de calor para múltiples usos, entre los más comunes calefacción, refrigeración y agua caliente sanitaria. Uno de los sistemas más eficientes de calefacción y refrigeración disponible (Dickson, MH., et al 2006).

## **5.3 Roca Caliente Seca (*HOT DRY ROCK*) /Sistemas Geotérmicos Estimulados (EGS):**

Extractos de calor mediante la creación de un sistema de fracturas en el subsuelo al que se le añade agua, a través de los pozos de inyección.

El agua se calienta por contacto con la roca y se bombea de nuevo a la superficie a través de los pozos de producción.

La energía adquirida se convierte en una planta de energía en energía eléctrica al igual que en un sistema geotérmico hidrotermal (Dickson, MH., et al 2006).

Vapor geotérmico saturado		T°C	Refrigeración		Generación de electricidad
		190			
		180			
		170			
		160			
		150			
		140			
		130			
		120			
		110			
		100			
		90			
		80			
		70			
		60			
		50			
		40			

Tabla 3. Usos de la energía geotérmica.

Fuente: (Sierra & Pedro, 1998)

También es revelante mencionar la roca seca caliente (HDR: *Hot Dry Rock*), también denominada como sistemas geotérmicos mejorados (EGS: *Enhanced Geothermal Systems*). Los EGS más comunes se encuentran a unos 2000- 5000 m de profundidad y se encuentran constituidos por rocas impermeables que cuentan con altas temperaturas entre 150°C y 300°C, y su particularidad es no contener ningún tipo de fluido, véase, (Figura 9). Para estos yacimientos la temperatura es el criterio económico principal, debido a que para un aprovechamiento productivo se requiere una temperatura inicial alta, esta podría ser mayor a los 200°C. Para desarrollar el sistema se hacen dos perforaciones, en una de las cuales se introduce agua fría y en la otra se obtiene aguacaliente.



Figura 9. Esquema de un yacimiento Geotérmico de roca seca caliente.

Fuente: (Pulido, et al, 2011)

Los sistemas geotérmicos mejorados (EGS), comprenden a todos los yacimientos creados o desarrollados por el hombre y en los que se utilizan técnicas desarrolladas en los campos de roca caliente seca para la creación y/o estimulación del yacimiento.



País	Escenario de proyección	Generación de electricidad geotérmica en bruto (TWh)	Meta de electricidad geotérmica en NREAPs (TWh)	Potencial económico geotérmico (TWh)	Potencial económico geotérmico (TWh)	Producción de energía geotermal compartida en bruto (%)	Capacidad instalada del potencial económico geotérmico (MWe)
		2010	2020	2030	2050		
Austria	actual	0,002	0,002	0,1	67,1	69	8511
Bélgica	actual	0	0,002	0	22,28	17	2826
Bulgaria	actual	0	0	0,1	71,66	112	9089
Croacia	actual	0	NA	3	49,97	NA	6338
República Checa	actual	0	0,002	0,04	30,68	26	3891
Dinamarca	actual	0	0	0,03	29,43	55	3732
Estonia	actual	0	0	0,04	1,67	9	212
actual	actual	0,153	0,475				
	(menor a 300 EUR/MWh)		3				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,01	7,53			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,39			
	(menor a 100 EUR/MWh)				653,02	83	82828
Alemania	actual	0,027	1,65				
	(menor a 300 EUR/MWh)		9,91				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,28	15,6			
	(menor a 150 EUR/MWh)			1,37			
	(menor a 100 EUR/MWh)				345,59	40	43834
Grecia	actual	0	0,073				
	(menor a 300 EUR/MWh)		9,43				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,08	1,61			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,47			
	(menor a 100 EUR/MWh)				81,3	103	10312
Hungría	actual	0	0,41	17,06	173,69	338	22031
Islandia	actual	4,5	5,8	73,7	321,89	NA	40829
Irlanda	actual	0	0,035				
	(menor a 300 EUR/MWh)		0,58				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,06	0,59			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,19			
	(menor a 100 EUR/MWh)				27,26	69	3457
Italia	actual	5,63	6,75	12,07	225,83	54	28644
Letonia	actual	0	0	0,01	2,84	31	360
Lituania	actual	0	0	0,04	18,71	236	2374
Luxemburgo	actual	0	0	0	2,66	42	337

Tabla 4. Estimaciones de Potencial geotérmico para los años 2020, 2030 y 2050 en los países de la UE e Islandia, Turquía y Suiza.

Fuente: SGC(2020), Van Vees et al. (2013)

País	Escenario de proyección	Generación de electricidad geotérmica en bruto (TWh)	Meta de electricidad geotérmica en NREAPs (TWh)	Potencial económico geotérmico (TWh)	Potencial económico geotérmico (TWh)	Producción de energía geotermal compartida en bruto (%)	Capacidad instalada del potencial económico geotérmico (MWe)
		2010	2020	2030	2050		
Polonia	actual	0	0	0	<b>143,56</b>	66	18210
Portugal	actual	0,16	0,48				
	(menor a 300 EUR/MWh)		0,45				
	(menor a 200 EUR/MWh)		0,03	0,39			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,16			
	(menor a 100 EUR/MWh)				<b>63</b>	85	8000
Rumania	actual	0	0	0,17	<b>104,65</b>	125	13274
Eslovaquia	actual	0	0,03	0,89	<b>54,57</b>	142	6922
Eslovenia	actual	0	0	0,01	<b>8,15</b>	36	1033
España	actual	0	0,3	0,52	<b>348,58</b>	84	44214
Suecia	actual						
Suiza	actual	0	NA				
	(menor a 300 EUR/MWh)		0,17				
	(menor a 200 EUR/MWh)			1,13			
	(menor a 150 EUR/MWh)						
	(menor a 100 EUR/MWh)				<b>42,9</b>	NA	5448
Holanda	actual	0	0	0,23	<b>51,76</b>	32	6565
Turquía	actual	0,7	NA	62,31	<b>965,9</b>	NA	122515
Reino Unido	actual	0	0				
	(menor a 300 EUR/MWh)		0,28				
	(menor a 200 EUR/MWh)			0,43			
	(menor a 150 EUR/MWh)			0,02			
	(menor a 100 EUR/MWh)				<b>41,8</b>	8	5303

Tabla 5. Estimaciones de Potencial geotérmico para los años 2020, 2030 y 2050 en los países de la UE e Islandia, Turquía y Suiza.

Fuente: SGC (2020), Van Vees et al. (2013)

## 7 TECNOLOGÍAS EN PLANTAS GEOTÉRMICAS

Los fluidos geotérmicos tienen el potencial para ser aplicados mediante la utilización de motores o turbinas a vapor en un ciclo termodinámico denominado Rankine, para generar energía eléctrica; donde el mecanismo es la capacidad del vapor de expandirse y contraerse por el cambio de temperatura y su condensación. A continuación, en (Marzolf, 2014), se reúnen algunas tecnologías aplicadas para generar energía eléctrica utilizando la geotermia:

**a. Flash:** Esta tecnología también es nombrada como abierta o de vapor directo. Se utiliza cuando se cuenta con fluidos geotérmicos con temperatura mayor a 200 °C en planta. El proceso consiste en como los fluidos geotérmicos pasan por un separador de vapor y agua, este vapor es inyectado a una turbina, haciendo que se mueva el generador eléctrico, que posteriormente pasa a un condensador; finalmente el fluido que ha cedido el calor regresa al pozo mediante pozos de reinyección.

**b. Binaria:** Esta tecnología denominada también como ciclo cerrado, véase, (Figura 1 1 ). Es utilizada cuando la temperatura de los fluidos geotérmicos es menor a los 200 °C en planta. El proceso consiste en calentar un compuesto orgánico por medio de un intercambiador de calor, usando compuestos orgánicos como n-pentano o amoníaco, entre otros, que cuentan con la propiedad de bajo punto de ebullición y a su vez alta presión de vapor a bajas temperaturas. El vapor generado del compuesto orgánico, se inyecta a una turbina que contribuye al movimiento de un generador eléctrico, para luego pasar a un condensador y continuar con este ciclo. El fluido que ha cedido el calor regresa al pozo mediante pozos de reinyección.

Dependiendo de la presión y la temperatura de los fluidos geotérmicos se pueden usar diferentes tipos de turbinas de vapor, que se diferencian por su capacidad

y eficiencia, entre estas (Marzolf, 2014) menciona:

**c. Turbinas de contrapresión:** la salida del vapor de la turbina se encuentra a una presión superior a la atmosférica, el vapor es más fácil de transportar y puede ser utilizado en otros procesos.

**d. Turbinas de condensación:** el vapor, a la salida de la turbina, entra a un intercambiador de calor donde se condensa, generando vacío y un empuje adicional en la turbina. El vapor condensado es transportado para ser retornado al pozo por medio de reinyección al campo geotérmico.

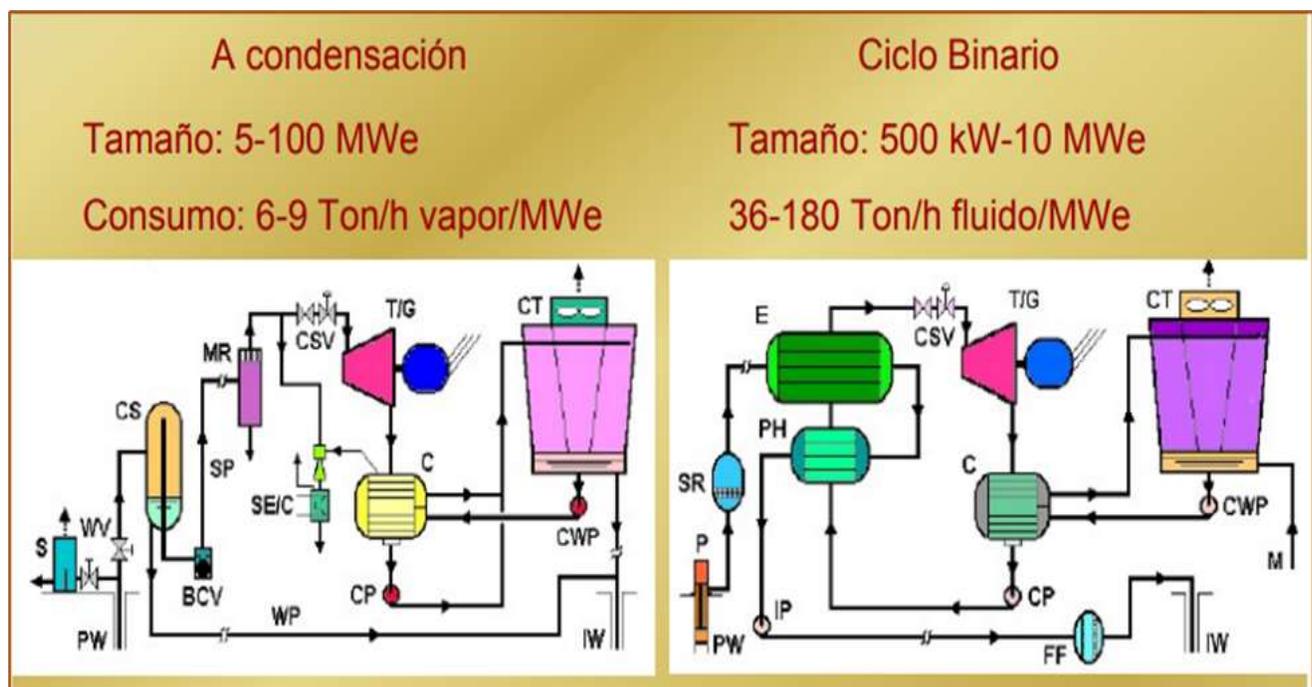


Figura 1 1 . Tipos de plantas geotermoeléctricas, Condensación, Binaria.

Fuente: (Ibrahim, et al., 2018)

## 7.1 Centrales eléctricas de vapor de flash simple

La planta de vapor de flash único es el pilar de las plantas de energía geotérmica y generalmente se usa en la industria de producción de energía geotérmica. Con frecuencia se instala en cualquier campo geotérmico dominado por líquido. En 2011,

las plantas de energía de flash único compartieron hasta 169 unidades en todo el mundo, lo que representa el 29 % de las plantas de energía geotérmica instaladas en todo el mundo y alrededor del 43 % de la capacidad de energía geotérmica instalada en el mundo. La planta de energía de un solo flash se muestra en la (Figura 1 2). El fluidogeotérmico pasa a través de una válvula de expansión en el estado 1 para minimizar lapresión del fluido instantáneamente en un proceso isoentálpico. El flujo que sale de la válvula de expansión ingresa al separador para continuar con el procedimiento de separación; se supone que el procedimiento de separación es isobárico. Las dos fasesfluidas se separan según sus diferencias de densidad natural. La calidad de la mezcla aumenta debido al proceso de flasheo, se puede calcular dividiendo la masa del vapor por la masa de la mezcla total. El vapor abandona el separador en el estado 3 y llega ala turbina para ser ampliado (Ibrahim, et al., 2018)

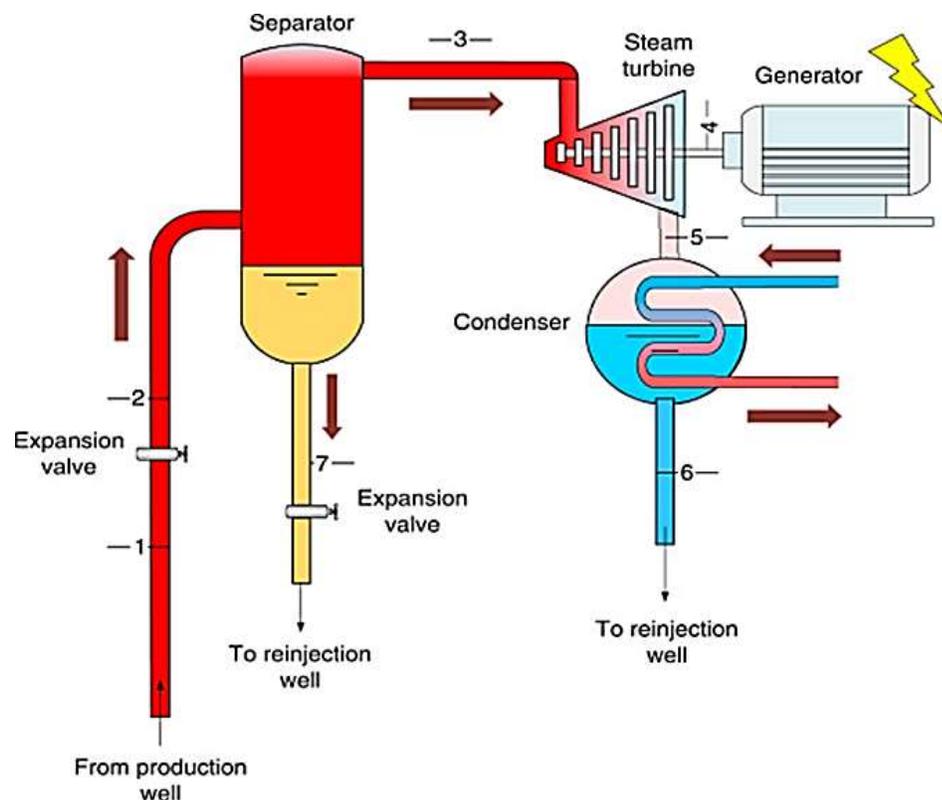


Figura 12 . Energía producida por un solo flash.

Fuente: (Ibrahim,. et al., 2018)

Finalmente, la energía mecánica producida por la expansión del vapor se suministra a un generador acoplado al eje de la turbina para generar electricidad. El vapor sale de la turbina en el estado 5 y llega al condensador para cambiar su fase de vapor a líquido, donde es reinyectado al pozo. La salmuera sale del separador en el estado 7 y también se reinyecta en el pozo geotérmico a menos que se utilice en aplicaciones adicionales como agua o calefacción de espacios (Ibrahim, et al., 2018).

## **7.2 Energía geotérmica en sistemas combinados de calor y electricidad (CHP), Kakkonda-Shizukuishi, Honshu, Japón**

La instalación CHP de Kakkonda-Shizukuishi se construyó a fines de la década de 1980 y en su punto máximo generó 50 MW de energía eléctrica y suministró 1050 t/h (292 kg/s) de agua caliente a usuarios finales industriales, comerciales y residenciales. Fue el proyecto más grande de su tipo en Japón en ese momento. La Unidad 1 de Kakkonda comenzó a operar como una planta de energía independiente de un solo flash en 1978. La planta tiene un diseño bastante estándar con cinco plataformas de pozos de producción y reinyección, con un conjunto de tres separadores ciclónicos (Andriy, et al., 2020).

El vapor se enviaba desde las plataformas de pozos a las plataformas y luego a la casa de máquinas a través de una red de tuberías; también la salmuera separada se reinyectaba al depósito a través de pozos en las plataformas. La superficie disponible para la construcción fue limitada debido al accidentado terreno montañoso a ambos lados del río Kakkonda que pasa por el sitio de la planta. Esto requirió la perforación direccional desde unas pocas plataformas de pozos, situadas relativamente cerca del

río, para minimizar la interferencia entre los pozos de producción e inyección.

La *Figura 13*, muestra la casa de máquinas y el pozo B, uno de los más cercanos a la planta. Después de varios años de operación exitosa, se decidió agregar una instalación de producción de agua caliente (HWPF) para complementar la energía eléctrica al capturar parte de la energía de la salmuera separada que había sido completamente reinyectada (Andriy, et al., 2020).

Aplicando el principio de funcionamiento de la evaporación instantánea de la salmuera caliente en cinco etapas para obtener agua limpia, vapor a temperaturas cada vez más bajas que calientan el agua dulce del río Kakkonda a través de cinco intercambiadores de calor, cuatro de los cuales son del tipo de contacto directo. Así, el agua del río tratada se mezclaba con el vapor flash para formar agua caliente de suficiente pureza para uso de la comunidad (Andriy, et al., 2020).



*Figura 13. Diagrama de flujo de CHP de Kakkonda-Shizukuishi.*

*Fuente: (Andriy, et al., 2020).*

### 7.3 Estudio de caso: combinación de un sistema basado en energía solar y geotérmica

Para este sistema Islam y Dincer estudiaron la generación múltiple basado en un área capaz de generar cinco salidas mediante la integración de cilindro parabólico solar, geotermia, ciclo de Rankine orgánico (ORC), sistema de enfriamiento por absorción, sistema de bomba de calor y un proceso de aire acondicionado, como se muestra en la *Figura 14*. El sistema estudiado es capaz de producir cinco salidas, energía, calefacción, refrigeración, agua caliente y aire seco para almacenar alimentos. El calor generado por el sistema de energía solar se suministra al ORC, al proceso de secado y al sistema de bomba de calor para producir energía, agua caliente y aire seco. El generador del sistema de enfriamiento por absorción se utiliza como condensador para que el ORC produzca el enfriamiento requerido. Se utiliza un segundo circuito que consiste en una fuente de energía geotérmica para generar la energía requerida mediante el uso de una sola planta de energía flash y el segundo ciclo orgánico de Rankine (ORC), (Tahir A. et al., 2018).

Las eficiencias energética y exergética asociadas con el sistema multigeneración se encuentran en 51% y 62%, respectivamente. El potencial de trabajo más alto posible de la energía de entrada se logra acoplando el enfriador y el TES con el escape de las turbinas. Las eficiencias energéticas para generación única, cogeneración, y trigeneración se encuentran en 22%, 34% y 44.11%, respectivamente, y las eficiencias exergéticas para los sistemas de generación simple, cogeneración y trigeneración se encuentran en 54%, 60% y 60.4%, respectivamente. Es significativo constatar que el aumento de la eficiencia energética en el caso de la multigeneración se debe a la



A continuación, esta una comparación de eficiencias energéticas y exergéticas de sistemas multigeneración, véase, (Figura 15) siendo la más competitiva la de sistema de multigeneración:

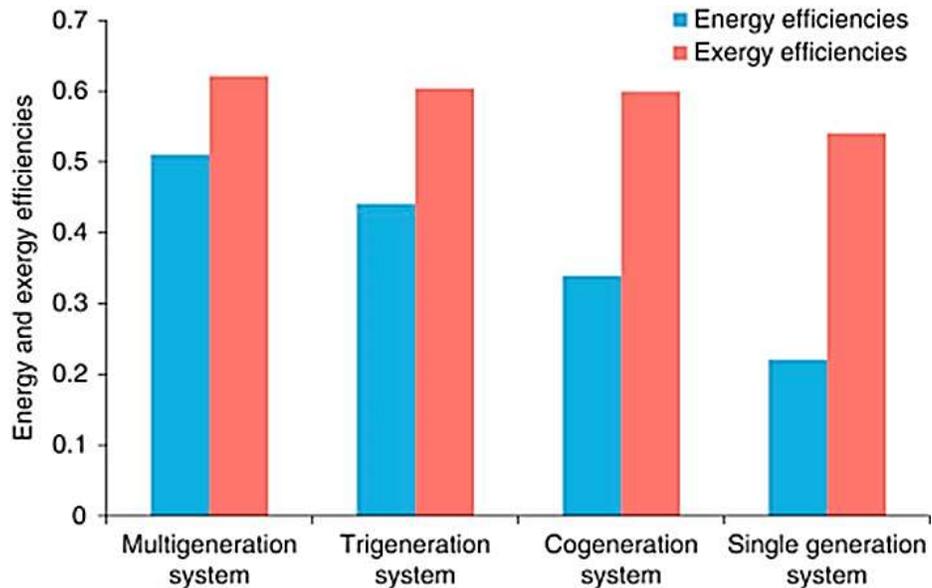


Figura 15. Comparación de eficiencias energéticas y exergéticas de sistemas multigeneración

Fuente: (Islam S, et al., 2017).

#### 7.4 Centrales eléctricas de vapor de doble flash

El desarrollo de la planta de energía geotérmica de vapor de doble flash se usa para apoyar la generación de energía mediante el uso de una mezcla de vapor y agua líquida generada en los pozos de producción geotérmica, véase, (Figura 16). Una planta de energía de doble flash se considera más ventajosa que una planta de energía de un solo flash, ya que la primera puede generar un 25 % más de energía de salida que la última en las mismas condiciones de fluido geotérmico.

Sin embargo, la tecnología de la planta de energía de vapor de doble flash es más compleja y su operación y mantenimiento son más costosos que las plantas de energía de un solo flash.

El uso de una segunda caída de presión en un proceso flash secundario (segundo separador), después de la primera caída de presión, respalda la producción de vapor adicional del líquido separado que sale del primer separador. Además, el generador de turbina acoplado puede producir energía adicional debido al suministro de vapor a menor presión o a una turbina, según la configuración.

En comparación con un sistema de flash único, y una configuración de flash doble es la utilización de una turbina de admisión dual y un separador de baja presión. Con el propósito de una combinación suave con el vapor de alta presión expandido, el vapor de baja presión se suministra a la turbina en la etapa correcta.

El proceso de conversión de energía en una planta de energía geotérmica de vapor de doble flash, sigue un diseño del proceso, la admisión o inyección de la primera etapa de la turbina el cual debe tener la misma diferencia de presión entre los separadores de alta y baja.

Se espera que el flujo másico de la etapa de alta presión sea menor que el flujo másico de la etapa de baja presión.

Los fluidos calientes residuales se condensan utilizando un condensador enfriado por aire.

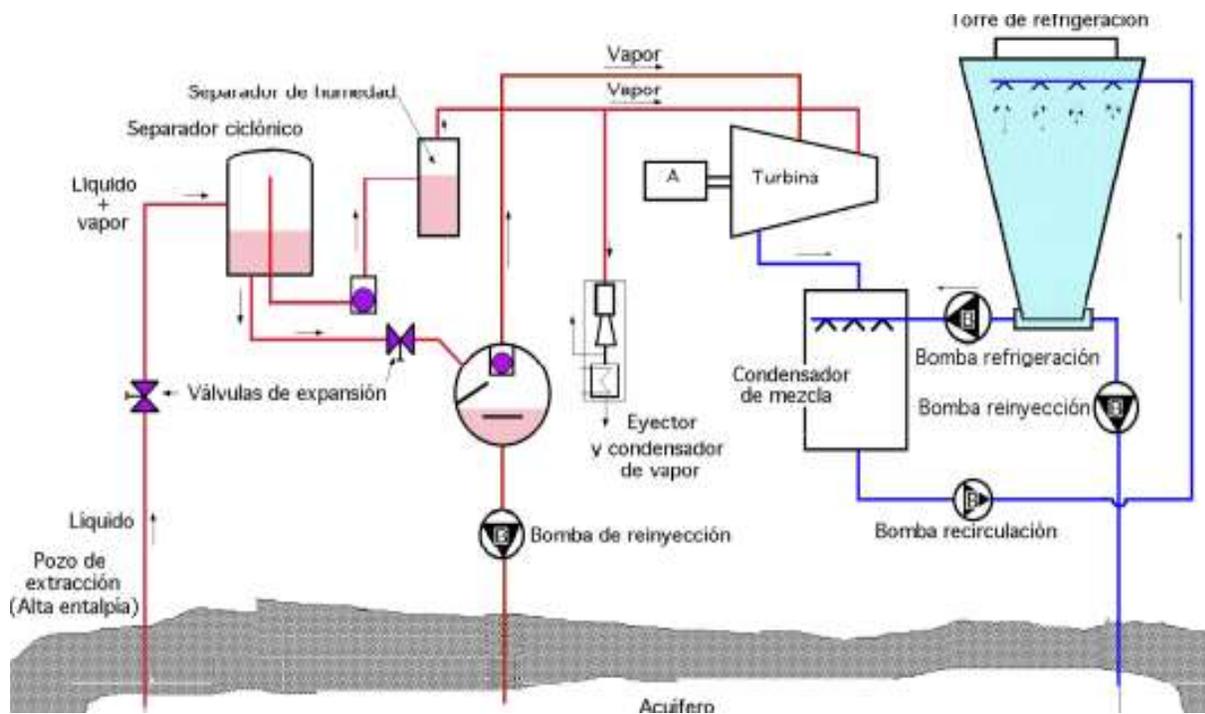


Figura 16. Planta de energía geotérmica de doble flash con una turbina de doble.

Fuente: Díez, P. F. (2009)

## 8. POTENCIAL GEOTERMICO EN COLOMBIA

Existe un gran potencial geotérmico en el territorio Colombiano, véase, (Figura 17), consecuente a su localización en límites entre placas tectónicas convergentes, sobre un segmento del cinturón de Fuego del Pacífico y, presencia de manifestaciones superficiales del calor del subsuelo como volcanes, muchos de ellos con actividad cuaternaria, manantiales termales y fumarolas (SGC, 2020).

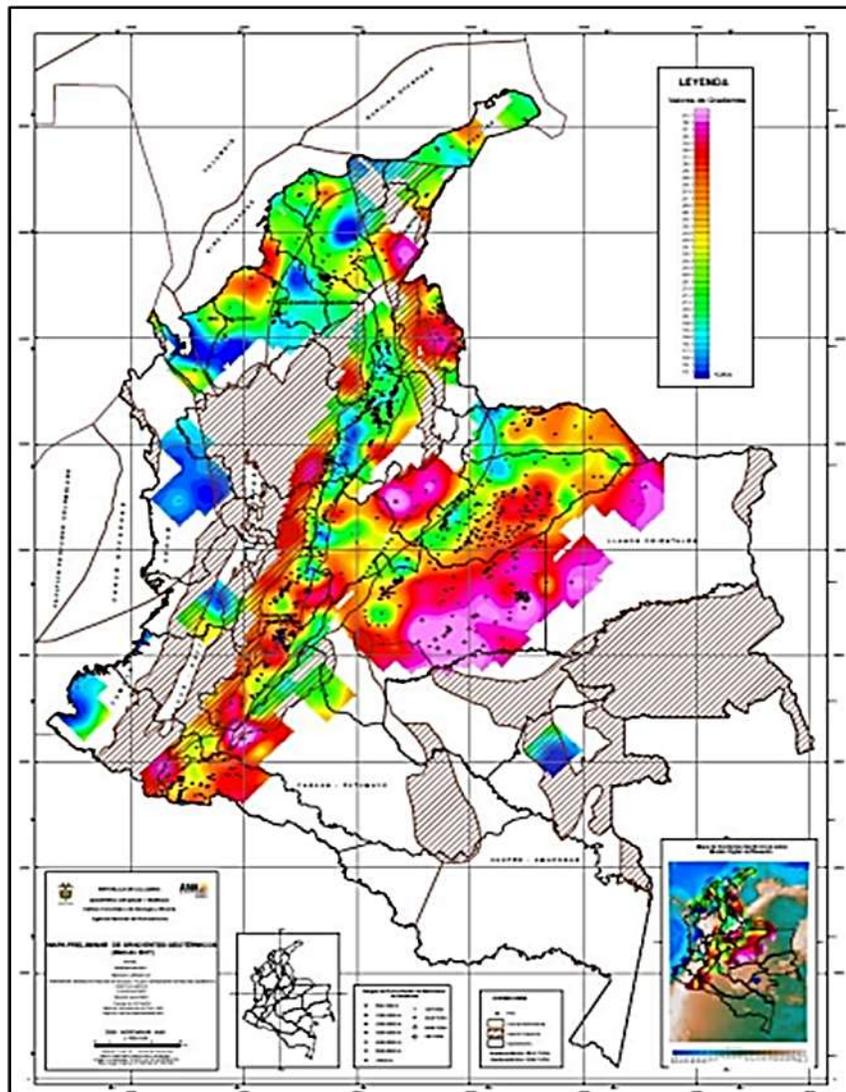


Figura 17. Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia.

Fuente: ANH, 2009

Las empresas energéticas apuestan de manera optimista la implementación de este modelo de energía limpia, no solo para la generación eléctrica, que es el uso de mayor demanda, sino para diversos usos directos de la energía térmica según Lund y Toth (2020), tales como termales, calefacción invernaderos, pasteurización de leche entre otros usos industriales.

Para la siguiente descripción no se incluye los recursos, sin manifestaciones superficiales, de roca caliente, ni recursos geotérmicos geopresurizados enterrados en cuencas sedimentarias; los cuales se nombra en otro apartado. Sin embargo, en Colombia se puede nombrar un total de 21 áreas geotérmicas, véase, (*Tabla 6 y Tabla 7*) separadas geográficamente y relacionadas directamente a la presencia de actividad volcánica. Del total de las áreas, solo dos se encuentran en la Cordillera Oriental, Paipa e Iza. La mayoría se ubican en la Cordillera Central, estas son: San Diego, Cerro Bravo, Villamaría – Termales, Nereidas Botero Londoño, Hacienda Granates, Santa Rosa, Laguna de Otún, Nevado del Tolima, Cerro Machín, volcán del Huila, caldera Gabriel López, caldera Paletará, volcanes de Sotará – Sucubún, volcanes Doña Juana-Las Ánimas, volcanes Galeras-Morasurco y el volcán de Sibundoy. En el límite del flanco occidental de la Cordillera Central y flanco oriental de la Cordillera Occidental se encuentran las áreas geotérmicas de Azufral, Cumbal y Chiles - Cerro Negro (SGC, 2020).

Área Geotérmica	Termales	Clústeres	Calor** (EJ)	Intervalo confianza 90%	Calor recuperable (EJ)	Potencia** (MWe)	Intervalo confianza 90%
Paipa	14	4	4,31	3,41 a 5,22	0,5	21,50	10,96 a 32,04
Paipa*	14	--	2,87	--	--	20,89	--
Iza	4	3	2,72	2,27 a 3,14	0,3	12,09	6,45 a 178,73
San Diego	15	6	12,51	11,45 a 13,6	1,15	141,85	118 a 165
Volcán Cerro Bravo	8	4	7,94	6,96 a 8,92	0,88	79,73	63,49 a 95,98
Villamaria-Termales	9	3	4,83	4,03 a 5,62	0,51	38,50	27,39 a 49,71
Nereidas-Botero Londoño	14	5	12,19	10,55 a 13,83	1,31	100,72	71,60 a 129,85
Hacienda Granates	19	9	11,57	10,39 a 12,76	1,36	67,24	52,04 a 82,43
Volcán de Santa Rosa	20	3	10,66	9,27 a 12,05	1,07	137,24	105,6 a 168,9
Laguna Otún	1	1	0,63	0,3 a 0,95	0,08	0,08	0,03 a 0,13
Nevado del Tolima	18	4	8,66	7,50 a 9,82	1,17	82,70	60,70 a 104,71
Volcán Cerro Machín	14	2	10,05	8,29 a 11,81	1,14	129,94	93,65 a 166,23
Volcán del Huila	4	1	0,76	0,37 a 1,14	0,09	0,1	0,03 a 0,16
Caldera Gabriel López	8	4	5,15	4,55 a 5,75	0,57	24,78	19,69 a 29,83
Caldera del Paletará	21	8	14,27	12,86 a 15,67	1,48	117,96	96,13 a 139,78
Volcanes de Sotará - Sucubún	2	2	2,82	2,37 a 3,27	0,3	17,43	12,06 a 22,62
Volcanes Doña Juana-Las Animas	6	3	5,30	4,62 a 5,99	0,55	37,84	29,82 a 45,86
Volcanes Galeras- Morasurco	8	4	4,87	4,22 a 5,51	0,68	29,49	20,68 a 38,29
Volcán de Sibundoy	4	3	3,09	2,66 a 3,52	0,33	9,8	5,52 a 12,83
Volcán Azufral	8	6	9,6	8,69 a 10,52	0,91	81,9	67,41 a 96,36
Volcán Cumbal	1	2	2,56	1,59 a 3,51	0,25	15,66	5,41 a 25,90
Complejo Volcánico Chiles - Cerro Negro	5	3	4,14	3,5 a 4,8	0,48	23,77	16,98 a 30,55
TOTAL	203	80	138,60	136,76 a 140,43	15,11	1170,20	1138,81 a 1201,58

Tabla 6. Calor almacenado, y potencia eléctrica en áreas Geotérmicas definidas, Colombia. Fuente: SGC, 2020

Departamento	Termales	Clústeres	Calor (EJ)	Intervalo de confianza del 90%	Calor recuperable (EJ)	Potencia (MWe)	Intervalo de confianza del 90%
Antioquia	5	5	2,04	1,7 a 2,3	0,284	2,27	1,27 a 3,27
Arauca	1	1	0,52	0,23 a 0,80	0,064	0,07	0,02 a 0,11
Atlántico	1	1	0,47	0,20 a 0,75	0,061	0,06	0,02 a 0,10
Boyacá	19	18	11,16	10,44 a 11,87	1,341	1,43	1,31 a 1,55
Casanare	3	3	1,64	1,39 a 1,89	0,196	0,21	0,17 a 0,25
Cesar	1	1	0,47	0,20 a 0,75	0,062	0,06	0,02 a 0,10
Chocó	4	3	2,30	1,91 a 2,68	0,305	3,27	1,86 a 4,69
Cundinamarca	50	24	15,75	14,87 a 16,62	1,887	1,99	1,84 a 2,13
Guaviare	1	1	0,53	0,26 a 0,79	0,062	0,07	0,02 a 0,11
Huila	15	11	7,08	6,49 a 7,67	0,843	12,09	7,06 a 17,13
Magdalena	1	1	0,50	0,24 a 0,77	0,061	0,06	0,02 a 0,11
Meta	5	2	0,32	0,26 a 0,38	0,316	2,54	3,19 a 2,89
Nariño	1	1	0,59	0,28 a 0,90	0,074	0,07	0,02 a 0,13
Norte de Santander	6	6	3,42	3,07 a 3,77	0,708	0,43	0,37 a 0,49
Santander	4	4	1,74	1,4 a 2,0	0,212	0,21	0,17 a 0,26
Tolima	4	3	1,04	0,83 a 1,24	0,138	0,13	0,09 a 0,17
TOTAL	121	85	49,56	48,82 a 50,31	6,614	24,95	22,80 a 27,10

Tabla 7. Calor almacenado y potencia eléctrica en áreas definidas, Colombia. Fuente: SGC, 2020

## 8.1 PILOTOS CON GEOTERMIA, PEQUEÑAS INSTALACIONES QUE UTILIZAN FLUIDOS COPRODUCIDOS DE OPERACIONES PETROLERAS.

Actualmente el interés en las energías renovables se ha incrementado con el continuo deterioro ambiental, en consecuencia, se han aplicado algunos proyectos, y pilotos con la energía geotérmica, véase, (Figura 18), algunos se nombran a continuación:



Figura 18. Colombia tiene capacidad potencial de 1.170 MW de generación a través de geotermia

Fuente: La república, 2021

### A) Pilotos con geotermia, Casanare

La empresa Parex Resources, en unión con la Universidad Nacional de Colombia (UNAL, Medellín) realizó el primer proyecto de generación eléctrica dando funcionamiento a la energía geotérmica en Colombia; en marzo de 2021 (Piensa en geotermia, 2023). El proyecto se encuentra localizado en el Campo

Maracas en Casanare. Se calcula una capacidad máxima de 100 kw, sustituyendo el 5% de la energía generada a partir de combustibles fósiles. Se estima mensualmente producir 72.000 kWh, lo que equivale al consumo de 480 familias. La empresa Parex también piensa en implementar otro piloto en campo La Rumba (campo con baja entalpía), ubicado en el municipio de Aguazul en Casanare, el cual tiene una capacidad de 35 kW, con generación de 672 kWh/día, lo que equivaldría al consumo de 117 hogares (Piensa en geotermia, 2023).

### **B) Pilotos con geotermia, Meta**

Las compañías petroleras Ecopetrol y Parex (pie de monte llanero), también hicieron parte en las energías renovables con el piloto Chichimene en el pie de monte llanero, Acacias (Meta). El piloto tiene una capacidad de 2 Mw (megavatios), con la posibilidad de generar 38.400 kilovatios hora/día (Kwh/d), lo que equivaldría al consumo de 659 hogares (Piensa en geotermia, 2023).

### **8.2 Avance en los proyectos de energía geotérmica Parque Nacional Natural De Los Nevados y Geotérmico Binacional Tufiño – Chiles – Cerro Negro.**

Otro proyecto que aporta a la iniciativa de transición energética esta ubicado en el Parque Nacional de los Nevados, que lleva por nombre Nereidas, véase, (*Tabla 8*), su nombre es dado por el Valle que lo circunda, este se encuentra localizado al lado oriental del municipio de Villamaría Caldas. Para llegar al lugar es necesario tomar la carretera que parte del municipio de Villamaría, con destino al valle de Nereidas. En el sitio se encuentra el primer pozo exploratorio geotérmico perforado en Colombia, año 1997. (Vega, 2014).

El proceso cronológico de este proyecto se encuentra disponible de la siguiente manera:

Fecha	Fase	Avance	Estado actual
1970-1980	Reconocimiento	Se inicia, la exploración del Nevado del Ruiz, encontrando el Valle de las Nereidas, como una fuente de generación de energía desde la geotermia. Esta fase dura por lo general un año, aunque en Colombia, empezó en 1970 y se pasó a la segunda fase en 1994.	Completo
1994	Prefactibilidad	En este año GESA, una empresa del grupo CHEC, obtiene la licencia ambiental, para identificar el potencial del área, y el diseño de las perforaciones. Esta fase dura aproximadamente dos años y medio, en Colombia duró tres años.	Completo
1997	Factibilidad	Nereidas 1: Primer pozo perforado, profundidad 1.469 metros. Esta fase dura en promedio año y medio, pero en Colombia aún no ha terminado, se escribe a continuación la cronología de esta fase.	Completo
2008		GESA, fue absorbida por la CHEC y en asocio con la EPM, reinician los estudios de exploración del Valle de las Nereidas	Completo

2012 - 2014		<p>CHEC se asocia con Dew hurst Group, y con aportes de la Agencia Norteamericana para el Comercio y el Desarrollo (USTDA, por sus siglas en inglés), inician estudios geocientíficos para establecer la factibilidad técnica, ambiental y económica.</p> <p>Se inicia acompañamiento geoambiental a comunidades aledañas al proyecto, incluyendo: caracterización, comunicación, conservación y preservación del entorno.</p>	
2015		Elaboración del modelo geológico, determinando con precisión los puntos de fractura para nuevas perforaciones. Además	En proceso
		se realizó alianza con LAGEO, una empresa del Salvador, con experiencia en desarrollo y operación de proyectos geotérmicos, buscando transferencia de conocimientos	
2016 a 2018		<p>Se proyecta explorar tres nuevos pozos.</p> <p>Desarrollo del campo y construcción: Esta decisión está esperando ser tomada en el 2018, cuando los pozos hayan sido perforados y se pueda confirmar la viabilidad de generación térmica de energía.</p>	En proceso

Tabla 8. Desarrollo cronológico proyecto Nereidas

Fuente: Vega, 2014

## 9. CONCLUSIONES

\* La energía geotérmica en el territorio Colombiano es muy alto, al igual que la energía hidroeléctrica, por tal razón la adopción de tecnologías más limpias, energéticamente eficientes y autosostenibles tiene un potencial viable a futuro con ventajas económicas.

\* Al ritmo como crece la población mundial, la demanda energética en los próximos años no podrá ser satisfecha solo con combustibles fósiles, y se requiere de diversas fuentes alternativas que, para que sean viables, deben ser desarrolladas desde ahora. Es decir, iniciar una transición; los proyectos pilotos que se están desarrollando actualmente dan un panorama optimista al territorio.

\* No existe actualmente ninguna forma de producir o transformar energía sin afectar de alguna forma al ambiente. Consecuente a lo anterior, la explotación de la energía geotérmica también tiene efectos en el ambiente, aunque es menos contaminante que la mayoría de fuentes convencionales de energía.

\* La Industria de Hidrocarburos tiene la capacidad y el potencial para realizar una transición energética viable y sostenible, siendo consciente que cuenta con la infraestructura, capacitación y herramientas adecuadas para la aplicación de las diversas fuentes alternativas. Sin embargo, la generación de estas energías para ser desarrolladas masivamente, y de manera eficaz, pasara un largo tiempo.

\*La energía geotérmica a diferencia de otras (FNCER) fuentes no convencionales de energías renovables, no depende de las condiciones climáticas generando una ventaja.

\* El uso de las bandas térmicas de las imágenes Landsat son herramientas de alta eficiencia y precisión en la búsqueda de puntos geotérmicos.

\* Las técnicas de percepción remota, son necesarias para brindar datos importantes en las primeras etapas de la exploración en zonas geotérmicas, su correcta interpretación permitirá alcanzar un alto porcentaje de éxito de perforación, con ello reducir la incertidumbre, riesgos y el costo en los pilotos realizados para las campañas de exploración geotérmica.

## 10. REFERENCIAS

Agencia Nacional de Hidrocarburos, ANH (2009). Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia. Disponible en

<https://recordcenter.sgc.gov.co/B19/23008050024780/documento/pdf/2105247801101000.pdf>

Alfaro, C., Rueda-Gutierrez, J. B., Casallas, Y., Rodríguez, G., & Malo, J. (2021).

Approach to the geothermal potential of Colombia. *Geothermics*, 96, 102169.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102169>

Allahverdizadeh, P.(2020). A review on geothermal wells: Well integrity issues.

Faculty of Science and Technology, Department of Energy and Petroleum Engineering, University of Stavanger, Stavanger, Norway.

DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124009

Andriy Redko, Ronald DiPippo (2020). Sistemas de energía de baja temperatura con aplicaciones de energía renovable. Tomado de ThinkGeothermal.

Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2019). Energías Renovables. Tomado de

<https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/Energias-Renovables.aspx#:~:text=Provienen%20de%20recursos%20naturales%20que,limpia%20para>

[%20el%20medio%20ambiente.&text=Seg%C3%BAAn%20la%20Unidad%20de%20Planeaci%C3](https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/Energias-Renovables.aspx#:~:text=Provienen%20de%20recursos%20naturales%20que,limpia%20para%20el%20medio%20ambiente.&text=Seg%C3%BAAn%20la%20Unidad%20de%20Planeaci%C3)

[%B3n,del%20consumo%20mundial%20de%20electricidad](https://www.metropol.gov.co/ambiental/Paginas/consumo-sostenible/Energias-Renovables.aspx#:~:text=Provienen%20de%20recursos%20naturales%20que,limpia%20para%20el%20medio%20ambiente.&text=Seg%C3%BAAn%20la%20Unidad%20de%20Planeaci%C3%B3n,del%20consumo%20mundial%20de%20electricidad).

Barbier, E. (2002). Geothermal energy technology and current status: An overview.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 6(1–2), 3–65. DOI:

[https://doi.org/10.1016/S1364-0321\(02\)00002-3](https://doi.org/10.1016/S1364-0321(02)00002-3)

Bozgeyik, A., Altay, L., & Hepbasli, A. (2022). A sub-system design comparison of renewable energy based multi-generation systems: A key review along with illustrative energetic and exergetic analyses of a geothermal energy based system. Sustainable Cities and Society, 103893.

Camprubí, Antoni. (2009). Criterios para la exploración minera mediante microtermometría de inclusiones fluidas. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. 62. 10.18268/BSGM2010v62n1a2.

Díez, P. F. (2009). Centrales térmicas. Biblioteca Sobre Ingeniería Energética.

Universidad de Cantabria. Available online: <https://pfernandezdiez.es/es/libro>.

Dickson, MH, Fanelli, M., Energía geotérmica: utilización y tecnología (2003/2006).

Tomado de <https://www.piensageotermia.com/geotermia/>

División de Geotermia, (2007). Energía Geotérmica. Disponible en

[http://www.url.edu.gt/PortalURL/Archivos/44/Archivos/CGA\\_GEOTERMIA.pdf](http://www.url.edu.gt/PortalURL/Archivos/44/Archivos/CGA_GEOTERMIA.pdf)

Función Pública (2023). Decreto 1543 de 2017. Tomado de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=83537>

Función Pública (2023). Decreto 2811 de 1974. Tomado de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=1551#:~:>

text=%2D%20El

%20Gobierno%20procurar%20evitar%20o,all%20de%20la%20

jurisdicci%C

3%B3n%20territorial.

Función Pública (2023). Constitución Política de Colombia 1991. Tomado de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4125>

Función Pública (2023). Ley 1715 de 2014. Tomado de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>

Función Pública (2023). Decreto 1318 de 2022. Tomado de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=191066>

Función Pública (2023). Ley 2099 de 2021. Tomado de

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326#>

:-:text=La%20pr

esente%20ley%20tiene%20por,y%2C%20en%20general%20dictar%20normasera

ción. Sol Energía 2017; 147: 324–343.

Hiriart Le Bert, G., Gutiérrez Negrín, L. C. a., Quijano León, J. L., Ornelas Celis, A.,

Espíndola, S., & Hernández, I. (2011). Evaluación de la Energía Geotérmica

en México, 164.

Ibrahim Dincer , Muhammad F. Ezzat , en Sistemas integrales de energía , 2018

Instituto Cartográfico y Geológico de Cataluña (ICGC), 2022. Tomado de

<https://www.icgc.cat/es/Administracion-y->

[empresa/Servicios/Geotermia/Que-es-un-yacimiento-geotermico-](https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/Que-es-un-yacimiento-geotermico-)

[Tipos-de-yacimientos-geotermicos.](https://www.icgc.cat/es/Administracion-y-empresa/Servicios/Geotermia/Que-es-un-yacimiento-geotermico-Tipos-de-yacimientos-geotermicos)

Islam S, Dincer I. Desarrollo, análisis y evaluación del rendimiento de un

sistema integrado combinado basado en energía solar y geotérmica para

multigeneración. Sol Energía 2017; 147: 324–343.

<https://www.thinkgeoenergy.com/news/>

Kaltschmitt, M., Formighieri, C., & Bass, R. (2013). Renewable Energy Systems.

Renewable Energy Systems. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-5820-3>

La República (LR). (2021). Colombia tiene capacidad potencial de 1.170 MW de

generación a través de geotermia. Disponible en

<https://www.larepublica.co/economia/colombia-tiene-potencial-de-1-170-mw-de-generacion-a-traves-de-recursos-geotermicos-3238058>

Liu, G., Zhao, Z., Xu, H., Zhang, J., Kong, X., & Yuan, L. (2022). A robust assessment method of recoverable geothermal energy considering optimal development parameters. *Renewable Energy*.

Lohse, C., (2018). Environmental impact by hydrogeothermal energy generation in low-enthalpy regions. *Renewable Energy*, Volume 128, Part B, Pages 509-519, ISSN 0960-1481, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.06.030>.

López Hurtado, O. E. (2020). Energías renovables como estrategia para la diversificación de la matriz energética de Colombia.

López Males, G. G., & Zura Quilumbango, C. B. (2013). Correlación de los estudios magnéticos y gravimétricos con la geología del sector de Chachimiro para prospección geotérmica.

Marzolf, N. C. (2014). Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia. Banco Interamericano de Desarrollo, 1-86.

Nájera-Rocha, G. I., Caetano, E., & Totolhua-Ramírez, V. (2022). Delimitación de zonas con potencial geotérmico aplicando técnicas de percepción remota que correlacionan las características físicas de temperatura de superficie terrestre y densidad del subsuelo: Caso de estudio Nayarit. *Quivera Revista de Estudios Territoriales*, 25(1), 67-95. DOI: <https://doi.org/10.36677/qret.v25i1.17272>

Petroquimex (2023). Estado de la energía Geotérmica. Tomado de <https://petroquimex.com/estado-de-la-energia-geotermica-en-mexico/>

Peña, I. G. C., Granda, A. F. C., Gómez, J. C. C., & Rueda, J. C. V. (2015).

- Estudio de factibilidad para la implementación de un ciclo orgánico de Rankine en pozos de extracción de petróleo. *Revista EIA*, 12(23), 137-148.
- PiensaGeotermia. (2023). Mapa de plantas geotérmicas en el mundo actualizado. Tomado de <https://www.piensaGeotermia.com/map/>
- PiensaGeotermia. (2023). Tres proyectos piloto de energía geotérmica desarrollados en Colombia. Tomado de <https://www.piensaGeotermia.com/3-proyectos-piloto-de-energia-geotermica-desarrollados-en-colombia/>
- Power-Porto, G. (2009). El calentamiento global y las emisiones de carbono. *Ingeniería industrial*, (027), 101-122.
- Pulido, C. L., Armenta, M. F., & Silva, G. R. (2011). Caracterización de un yacimiento de roca seca caliente en la zona geotérmica de Acoculco, Pue. *Geotermia*, 24(1), 59-69.
- Tahir A. et al., (2018). Sistema basado en energía solar y geotérmica para un distrito. ThinkGeothermal. Tomado de <https://www.thinkgeoenergy.com/news/>
- Ramírez García, I. O. (2019). *Identificación de zonas potenciales para exploración geotérmica aplicando imágenes ópticas multiespectrales e interferometría SAR* (Master's thesis).
- Rendón, D. A. M., Sánchez, I. J. L., & Blessent, D. (2020). Geothermal Energy in Colombia as of 2018. *Ingeniería y universidad*, 24, 6. DOI: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iyu24.geic>
- Robinius, M., Welder, L., Ryberg, D. S., Mansilla, C., Lucchese, P., Tlili, O., Le Duigou, A., Simon, J., Balan, M., Dickinson, R. R., Dolci, F., Weidner, E., Gammon, R., Daniel Meeks, N., Pereira, A., Samsatli, S., & Valentin, S. (2017). Power-to-hydrogen and hydrogen-to-X: Which markets? Which

economic potential? Answers from the literature. International Conference on the European Energy Market, EEM, June, 6–9. DOI:

<https://doi.org/10.1109/EEM.2017.7981884>

Santos, L., Taleghani, A. D., & Elsworth, D. (2022). Repurposing abandoned wells for geothermal energy: Current status and future prospects. *Renewable Energy*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.05.138>

Servicio Geológico Colombiano SGC. (2020). ESTIMACIÓN PRELIMINAR DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE COLOMBIA. Tomado de [https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/742\\_2021EstiPrePotGeotColombia/Documento/Pdf/EstiPrePotenGeoterColom.pdf](https://recordcenter.sgc.gov.co/B22/742_2021EstiPrePotGeotColombia/Documento/Pdf/EstiPrePotenGeoterColom.pdf)

Sierra, J. L., & Pedro, G. E. (1998). *Energía Geotérmica*, 1–58.

Universidad Nacional de Colombia (UNAL). (2019). Técnica ubica nuevas fuentes hidrotermales. Disponible en <http://agenciadenoticias.unal.edu.co/detalle/tecnica-ubica-nuevas-fuentes-hidrotermales>

Vega Salazar, E. J. (2014). Aporte al modelo geológico del Valle de las Nereidas.

Vega Salazar, E. J. (2014). Aporte al modelo geológico del Valle de las Nereidas.

Vaughan, R. G., Keszthelyi, L. P., Lowenstern, J. B., Jaworowski, C., & Heasler, H. (2012). Use of ASTER and MODIS *thermal infrared* data to quantify heat flow and hydrothermal change at Yellowstone National Park. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 233, 72-89.

Ochieng, L. (2016). Overview of geothermal surface exploration methods. *Geothermal Development Company, Nakuru Kenya*.

Quijano León, J. L. (2007). *Manual de Geotermia*, 1–109.

Wang, G., Du, W., & Carranza, E. J. M. (2017). Remote sensing and GIS prospectivity mapping for magmatic-hydrothermal base-and precious-metal deposits in the Honghai district, China. *Journal of African Earth Sciences*, 128, 97-115.

Zuffi, C., Manfrida, G., Asdrubali, F., & Talluri, L. (2022). Life cycle assessment of geothermal power plants: A comparison with other energy conversion technologies. *Geothermics*, 104, 102434. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2022.102434>