

Evaluación de yacimientos prospectos para la producción de energía geotérmica

Gean Franco Zuleta Guerrero, Juan Sebastián Valdelamar Romero

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Zuly Himelda Calderón Carrillo

Doctora en Ingeniería Química

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2022

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios por guiarme a lo largo de los años y por permitirme llegar hasta este momento.

En segundo lugar, a mi padre, Rafael Tomas Zuleta, y a mi madre, Alicia Guerrero por su constante apoyo, por estar siempre pendiente de mí y por inculcarme valores y principios, los cuales han sido fundamentales en mi formación como persona y profesional. Mis hermanas Giordanna Zuleta y Salomed Zuleta por su ayuda y amor incondicional, A mi hermano Tomás Zuleta por su amor sincero y motivación; de la misma manera, a mi abuela Nelys Deluquez y mi tía Yuleidis Navarro por su apoyo, cariño y ejemplo constante.

A mi pareja, Marian Cordoba, por su gran amor y apoyo durante este tiempo.

A mi amiga Margarita Florez, por su amistad, ayuda y apoyo durante toda mi carrera.

A mis amigos Danna Noguera, Jaime Miranda, Carlos Mosquera, Carlos Montesino, Farud Eljadue Juan Valdelamar, Alejandro Palacio, Andres Fernández, Edwar Sequeda y Nicolas Rodríguez por haber hecho de mi vida universitaria una etapa que llevare en mis recuerdos con mucho cariño.

A los ingenieros Ricardo Santaella y Carolina Santamaria Por su ayuda y confianza en los momentos difíciles.

A mi directora, Zuly Calderón por su gran apoyo y guía.

A la Familia Zuleta Diaz por su amor, inspiración, guía y apoyo.

**Gean Franco Zuleta Guerrero**

## AGRADECIMIENTOS

Primeramente, darle gracias a Dios por la vida y salud. Le doy gracias a mi madre, Marelis Romero Cardales por todo su amor, desde mi nacimiento hasta siempre, gracias por estar siempre cuando más lo necesité, muchas gracias por ser un ejemplo para mí. Le agradezco a mi padre, Yusbel Valdelamar Ortiz, por su apoyo y sus constantes enseñanzas.

Agradezco a mis abuelas Ana Isabel Ortiz y María de Jesús Cardales por los buenos consejos, y por todo su amor durante toda mi vida, como siempre lo he dicho son también mis madres, gracias por estar siempre pendiente de mí.

Gracias a mi pareja Estefany Marcela Diaz, por brindarme todo tu amor y apoyo durante todo este gran recorrido, gracias por estar siempre, por expresar las palabras adecuadas en los momentos justos y por siempre respaldarme. Te amo, “SJSF”.

Le doy muchas gracias a la Familia Anaya Doria, por guiarme por el camino correcto en los momentos de incertidumbre, muchas gracias por abrirme las puertas de su familia y hacerme sentir como uno más de ustedes, siempre los llevo presente.

Muchas gracias a cada uno de mis familiares, se que están muy orgullosos de lo que hoy en día soy y todo eso es también por ustedes, muchas gracias, hermanos, primos, primas, tíos, tías.

Muchas gracias a mis amigos, no menciono el nombre de cada uno de ustedes para no extenderme tanto, pero desde mi corazón siempre les brindaré una amistad sincera. Ha sido una gran etapa en mi vida y gracias a ustedes la he podido llevar con buenas alegrías.

Muchas gracias a mi amigo y compañero de tesis Gean Franco Zuleta, ha sido un gran tándem el que hemos logrado, te deseo muchos éxitos y bendiciones en esta nueva etapa que se viene.

Muchas gracias a la ingeniera Zuly Calderón Carrillo, por todas sus enseñanzas y consejos para llevar a cabo este trabajo, creo que no hablo solo por mí al decir que es una inspiración para nosotros, y para los demás futuros ingenieros.

Muchas gracias a la universidad pública por permitir que un joven cordobés cumpla su sueño de ser ingeniero de petróleos, es un orgullo para mi ser egresado de la Universidad Industrial de Santander.

Muchas gracias a todos los docentes que he tenido a lo largo de la vida, de cada uno de ustedes he podido adquirir conocimientos y he podido aprender de su experiencia.

¡Dios los bendiga a todos!

**Juan Sebastian Valdelamar Romero**

**Tabla de contenido**

Introducción.....	15
1.0 Objetivos.....	17
1.1 Objetivo General.....	17
1.2 Objetivo Específico .....	17
2.0 Cuerpo del Trabajo .....	18
2.1 Energía geotérmica.....	18
2.2 Naturaleza de los recursos geotérmicos.....	19
2.3 Magnitud de los recursos geotérmicos .....	20
2.4 Características de la energía geotérmica .....	21
2.5 Origen del calor geotérmico .....	23
2.6 Yacimientos y regiones geotérmicas .....	24
2.6.1 Hipertérmicas o de alta entalpía .....	25
2.6.2 Semitérmicas o de entalpía media .....	25
2.6.3 Normales o de baja entalpía .....	26
2.6.4 Yacimientos geotérmico de roca caliente seca.....	26
2.6.5 Yacimientos geotérmicos en rocas incompletamente solidificadas. ....	27
2.6.6 Yacimientos geotérmicos en condiciones hipercríticas.....	27
2.6.7 Yacimientos geotérmicos geo-presurizados.....	27

2.6.8 Yacimientos geotérmicos magmáticos.....	28
2.6.9 Yacimientos geotérmicos marinos.....	28
2.7 Física de los recursos geotérmicos .....	29
2.8 Técnicas de exploración e investigación .....	31
2.9 Principales yacimientos geotérmicos explotados .....	34
2.9.1 Complejo geotérmico The Geyser – Estados Unidos.....	35
2.9.2 Complejo geotérmico Cerro Prieto – México.....	36
2.9.3 Complejo geotérmico Larderello – Italia.....	37
2.9.4 Complejo geotérmico Olkaria – Kenia.....	38
2.9.5 Complejo geotérmico Makban – Filipinas .....	38
2.9.6 Complejo geotérmico Salton Sea – Estados Unidos. ....	39
2.9.7 Complejo geotérmico Hellisheidi – Islandia .....	39
2.9.8 Complejo geotérmico Tiwi – Filipinas.....	41
2.10 Modelos de determinación de potencial geotérmico .....	42
2.10.1 Modelo matemático .....	42
2.10.1.1 Metodología.....	42
2.10.1.2 Parámetros que influyen en la energía geotérmica. ....	42
• Mapa de flujo de calor.....	42
• Conductividad térmica.....	45

• Gradiente geotérmico. ....	45
• Densidad de la roca.....	46
• Capacidad calorífica de una roca.....	46
2.10.3 Estimación de energía geotérmica en el sitio. ....	47
2.10.1.4 Pérdidas totales de calor asociadas a la explotación geotérmica.....	47
• Pérdidas de calor en la tubería por conducción. ....	47
2.10.1.5 Estimación de la energía geotérmica recuperable. ....	48
2.10.2 Métodos de estimación de recursos y su aplicabilidad.....	48
2.10.2.1 Flujo de calor.....	50
2.10.2.2 Analogía areal.....	51
2.10.2.3 Análisis de la curva de declive. ....	53
2.10.2.4 Métodos Volumétricos. ....	54
• Modelos de simulación numérica. ....	55
• Evaluación probabilística de recursos y reservas. ....	56
• Modelos volumétricos. ....	58
2.10.3 Modelo de estimación geotérmica para pozo petrolero abandonado y reutilizado para obtención de energía geotérmica. ....	61
2.10.3.1 Propiedades del fluido a utilizar. ....	63
• Calor específico (Cp).....	64

• Conductividad térmica (k).....	64
• Número de Reynolds (Re).....	64
• El número de Prandtl.....	65
2.10.3.2 Modelo de transferencia de calor para pozos petroleros rehabilitados para la extracción de energía geotérmica. ....	65
• Modelo de transferencia de calor para un fluido que desciende por una tubería en contacto con la formación.....	66
• Modelo de transferencia de calor para un fluido que asciende por una tubería en concéntrica a aquella que está en contacto con la roca.....	69
2.10.4 Clasificación de los métodos para la estimación de los recursos .....	72
2.11 Comparativa de los métodos para determinar los recursos .....	74
2.12 Parametros que impactan la evaluacion del potencial geotermico .....	76
2.12.1 Método AHP.....	77
2.12.2 Metodología MICMAC .....	80
2.12.3 Parámetros influyentes según los métodos.....	83
2.13 Tecnologías para la conversión de energía geotérmica a electricidad.....	84
2.13.1 Plantas de vapor seco – Recursos de valor seco.....	84
2.13.2 Plantas flash y Doble flash .....	86
2.13.3 Plantas de ciclo binario.....	89

2.14 Desarrollo de herramienta informática el lenguaje de programación Python	90
.....	90
2.14.1 Manual técnico del software.....	90
2.14.2 Herramientas utilizadas para el desarrollo de la herramienta informática	91
2.14.3 Casos de uso de la Herramienta.....	92
2.14.4 Modelos utilizados para calcular el potencial geotérmico mediante la herramienta.....	92
2.14.4.1 Método volumétrico teniendo en cuenta variables fundamentales del yacimiento. ....	92
2.14.4.2 Método volumétrico teniendo en cuenta la porosidad de la formación..	93
2.14.4.3 Método volumétrico para pozos petroleros abandonados. ....	95
2.14.4.4 Método analogía areal mediante gráfica.....	95
2.15 Validación del Software. ....	97
2.15.1 Validación método analogía areal .....	98
2.15.2 Validación método volumétrico con variables fundamentales Campo Habanero.....	100
2.15.3 Validación método volumétrico incluyendo la porosidad.....	102
2.15.4 Validación método volumétrico para pozos petroleros abandonados .....	104
3. Conclusiones.....	107
4. Recomendaciones .....	109

5. Referencias ..... 110

### Lista de Tablas

<b>Tabla 1. Etapas de estudio de un campo geotérmico.....</b>	<b>31</b>
<b>Tabla 2. Técnicas de estudio para los yacimientos geotérmicos.....</b>	<b>33</b>
<b>Tabla 3. Países más productores de energía geotérmica a nivel mundial. ....</b>	<b>34</b>
<b>Tabla 4. Principales complejos de energía geotérmica a nivel mundial.....</b>	<b>41</b>
<b>Tabla 5 Métodos de estimación de recursos y su aplicabilidad.....</b>	<b>73</b>
<b>Tabla 6 Variables utilizadas por cada método para calcular el potencial geotérmico .....</b>	<b>74</b>
<b>Tabla 7 Descripción de los métodos para la estimación del potencial geotérmico .....</b>	<b>76</b>
<b>Tabla 8 Escala Fundamental de Saaty.....</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 9 Matriz de comparación al evaluar las alternativas .....</b>	<b>78</b>
<b>Tabla 10 Matriz normalizada para evaluar las alternativas .....</b>	<b>79</b>
<b>Tabla 11 Análisis de datos obtenidos por medio de la razón de consistencia ...</b>	<b>79</b>
<b>Tabla 12 Código de relaciones directas .....</b>	<b>80</b>
<b>Tabla 13 Matriz de relaciones directas.....</b>	<b>81</b>
<b>Tabla 14. Porcentaje de motricidad de las variables.....</b>	<b>81</b>
<b>Tabla 15 Porcentaje de dependencia de las variables .....</b>	<b>82</b>
<b>Tabla 16 Valores ideales de parámetros para calcular el potencial geotérmico utilizados por la herramienta en el método volumétrico con variables fundamentales del yacimiento. ....</b>	<b>93</b>

<b>Tabla 17 Valores ideales de parámetros para calcular el potencial geotérmico utilizados por la herramienta en el método volumétrico con variables fundamentales del yacimiento. ....</b>	<b>94</b>
<b>Tabla 18 Reporte de validación del software .....</b>	<b>98</b>
<b>Tabla 19 Variables del campo Habanero .....</b>	<b>98</b>
<b>Tabla 20 Variables del campo Habanero .....</b>	<b>100</b>
<b>Tabla 21 Variables de la Fosa Ciudad Rodrigo .....</b>	<b>102</b>
<b>Tabla 22 Variables del campo Chulengo-1 .....</b>	<b>104</b>

### Lista de Figuras

<b>Figura 1. Propiedades físicas de las capas del interior de la tierra.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2. Representación de capas internas de la tierra.....</b>	<b>24</b>
<b>Figura 3. Caracterización de las regiones de entalpía en función de la profundidad y la temperatura.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 4. Representación de un yacimiento geotérmico y su origen.....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 5. Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia. Anomalías positivas son identificadas principalmente en áreas localizadas en las cuencas Llanos Orientales, Caguán – Putumayo, Cordillera Oriental y Catatumbo. Anomalías negativas, son observadas en Guajira, Sinú - San Jacinto, Valle inferior del Magdalena, Urabá, Chocó y Tumaco. ....</b>	<b>44</b>
<b>Figura 6. Densidad de potencia de energía eléctrica para campos desarrollados, según Grant (2000), con la curva de mejor ajuste agregada. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 7. Ejemplo de distribución triangular y log normal. ....</b>	<b>58</b>
<b>Figura 8 Representación esquemática del intercambio de calor para un pozo petrolero o gasífero reutilizado para la obtención de energía geotérmica.....</b>	<b>63</b>
<b>Figura 9 Perfil esquemático del intercambio de calor para un pozo petrolero o gasífero reutilizado para la obtención de energía geotérmica.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura 10 Gráfico de relaciones directas.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura 11 Esquema de funcionamiento de una planta de vapor seco.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura 12 Esquema de funcionamiento de una planta flash.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura 13 Esquema de funcionamiento de una planta doble-flash.....</b>	<b>88</b>

<b>Figura 14 Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura 15 Interfaz gráfica del software Geothermal Potential Calculation (GPC)</b> .....	<b>91</b>
<b>Figura 16 Utilización de cada método según la etapa del proyecto geotérmico</b>	<b>96</b>
<b>Figura 17 Diagrama de flujo para los modelos utilizados para el cálculo del</b> <b>potencial geotérmico.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura 18 Resultados obtenidos con el software GPC mediante el modelo</b> <b>analogía areal .....</b>	<b>99</b>
<b>Figura 19 Resultados obtenidos con el software GPC mediante el modelo</b> <b>volumétrico con variables fundamentales.....</b>	<b>101</b>
<b>Figura 20 Resultados obtenidos con el software GPC mediante el modelo</b> <b>volumétrico incluyendo la porosidad.....</b>	<b>103</b>
<b>Figura 21 Resultados obtenidos con el software GPC mediante el modelo</b> <b>volumétrico para pozos petroleros abandonados .....</b>	<b>105</b>

## Resumen

**Título:** Evaluación de yacimientos prospectos para energía geotérmica

**Autor:** Gean Franco Zuleta Guerrero, Juan Sebastián Valdelamar Romero

**Palabras Clave:** Potencial geotérmico, Energía Geotérmica, Energía Limpia, Energía renovable.

**Descripción:** La energía geotérmica es una gran fuente de energía, que a diferencia de otras fuentes de energía limpia no depende de las condiciones climáticas. Las nuevas políticas ambientales han dado paso al crecimiento del sector de las energías renovables no convencionales, en donde el aprovechamiento de la energía calórica proveniente del subsuelo tiene un papel protagonista.

A nivel mundial se estima que muchas zonas son buenos prospectos para el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica, hay una clara necesidad de evaluar esos recursos es por ello por lo que se busca por medio de la tecnología facilitar la evaluación de los recursos geotérmicos, pudiendo así brindar unas mejores perspectivas que ayuden a encaminar la viabilidad de los proyectos geotérmicos.

Con la evaluación de los recursos geotérmicos se tendrá una visión real de la importancia de esta fuente de energía limpia, por medio del desarrollo de un software que ayude a estimar con facilidad y veracidad el potencial geotérmico de zonas de interés, permitirá posicionar esta gran fuente de energía renovable como una alternativa a las fuentes de energía contaminantes.

La experiencia de industria petrolera y los avances tecnológicos en el ámbito de la extracción de recursos energéticos provenientes del subsuelo pueden convertir a la energía geotérmica como el principal aliado para la transición energética, debido a eso se ha realizado una investigación que permita estimar el potencial de los recursos geotérmicos con facilidad.

**Abstract**

**Title:** Evaluation of prospective reservoirs for geothermal energy.

**Author:** Gean Franco Zuleta Guerrero, Juan Sebastián Valdelamar Romero

**Key Words:** Geothermal potential, Geothermal Energy, Clean Energy, Renewable Energy.

**Description:** Geothermal energy is a great source of energy that, unlike other clean energy sources, does not depend on climatic conditions. New environmental policies have given way to the growth of the non-conventional renewable energy sector, in which the use of heat energy from the subsoil plays a leading role.

Globally, it is estimated that many areas are good prospects for the development of electric power generation projects from geothermal energy, there is a clear need to evaluate these resources, which is why it is sought through technology to facilitate the evaluation of geothermal resources, thus being able to provide a better perspective to help guide the feasibility of geothermal projects.

With the evaluation of geothermal resources will have a real vision of the importance of this clean energy source, through the development of software that helps to estimate the geothermal potential of areas of interest easily and accurately, will position this great source of renewable energy as an alternative to polluting energy sources.

The experience of the oil industry and technological advances in the field of extraction of energy resources from the subsoil, can make geothermal energy as the main ally for the energy transition, so research has been conducted to estimate the potential of geothermal resources easily.

## Introducción

El aumento de la demanda energética y las nuevas políticas ambientales han encaminado a la incursión de nuevas fuentes de energía limpia, la energía geotérmica es una gran fuente de energía limpia, que a diferencia de otras fuentes de energía es capaz de producir energía las 24 horas del día sin importar las condiciones climáticas.

El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra, que se transmite desde sus capas más internas hacia la corteza, es decir, son recursos energéticos que se encuentran principalmente almacenados en el subsuelo, que para su correcto aprovechamiento se requieren de conocimientos geofísicos y termodinámicos al nivel de la extracción de los recursos petrolíferos. En tiempos de transición energética lo correcto sería ver a la energía geotérmica como un aliado para la industria de los hidrocarburos y no como una competencia, ya que la gran experiencia de la industria en la extracción de los recursos energéticos del subsuelo posiciona a la geotermia como el complemento ideal para la transición a las energías verdes.

En este trabajo de investigación se describen las generalidades correspondientes a la energía geotérmica enfatizando en la evaluación del potencial geotérmico y en la experiencia que ha tenido la industria geotérmica en el desarrollo de la producción de los recursos energéticos de los principales yacimientos a nivel mundial, así mismo se detallan los tipos de yacimientos geotérmicos y las técnicas de exploración que se han empleado en los proyectos geotérmicos desarrollados.

Se detallan las características de los principales complejos geotérmicos y la incidencia que tienen estos en el mercado energético, posicionando a la energía geotérmica

como una fuente de energía con valores competitivos. De igual manera se compararon los modelos utilizados para el cálculo del potencial geotérmico, determinando los principales parámetros de estudio que impactan en la evaluación del potencial geotérmico con el fin de desarrollar una herramienta informática en el lenguaje de programación Python que facilite el cálculo del potencial de los yacimientos geotérmicos, ayudando al avance oportuno de los proyectos de explotación de este tipo de recursos.

La herramienta informática desarrollada utiliza cuatro tipos de modelos de cálculo de potencial geotérmico, los cuales permiten estimar los recursos caloríficos contenidos en el subsuelo de las zonas prospectas de energía geotérmica, permitiendo agilizar la toma de decisiones y el direccionamiento de los proyectos de explotación de este tipo de energía.

Los modelos van desde un modelo de analogía areal, que permite tener un estimado de los recursos en una fase temprana de exploración, modelos volumétricos, que con información geofísica y de las propiedades de los fluidos contenidos, permite obtener unos valores más acordes a la realidad de los recursos de la zona explorada. Así también la herramienta permite estimar los recursos geotérmicos de los pozos petrolíferos abandonados, dándoles una nueva vida y oportunidad económica a los proyectos de explotación de hidrocarburos.

Estos modelos anteriormente mencionados se validaron con información encontrada en la literatura, de la experiencia de la explotación de los recursos geotérmicos, si bien la exactitud no es del 100%, proporciona información valiosa para el pronto desarrollo de los proyectos geotérmicos.

## **1.0 Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Evaluar el potencial geotérmico de un yacimiento para la producción de energía

### **1.2 Objetivo Específico**

- Describir generalidades de la evaluación del potencial geotérmico y los principales yacimientos productores de energía geotérmica del mundo.
- Comparar los modelos de determinación de potencial energético geotérmico disponibles en la literatura
- Determinar los parámetros que impactan directamente la evaluación del potencial energético de los yacimientos geotérmicos
- Determinar el potencial geotérmico de un yacimiento, mediante el desarrollo de una herramienta informática en lenguaje de programación Python

## **2.0 Cuerpo del Trabajo**

### **2.1 Energía geotérmica**

La energía geotérmica, es la energía calorífica que la tierra transmite desde sus capas internas hacia la parte más externa de la corteza terrestre (IDAE & IGME, 2008).

El calor es una forma de energía y la energía geotérmica es el calor contenido en el interior de la Tierra que genera fenómenos geológicos a escala planetaria; el término energía geotérmica es a menudo utilizado para indicar aquella porción del calor de la Tierra que puede o podría ser recuperado y explotado por el hombre (Córdova, 2007).

Desde el interior hasta su exterior la tierra está constituida por capas que inician en su núcleo hasta la corteza, teniendo una variación de altas temperaturas y presiones que descienden a medida que se exteriorizando. Los efectos de la temperatura están presentes en diversas operaciones, una de ellas es la de perforaciones profundas en búsqueda de hidrocarburos.

Las fumarolas, géiseres y fuentes termales son fenómenos observables en superficie que detonan el calor que proviene del subsuelo, todas ellas son manifestaciones del calor que la tierra transmite hacia su exterior y que constantemente se “desperdicia” en la corteza (IDAE & IGME, 2008).

La energía geotérmica se considera un recurso energético renovable muy importante, ya que es de las pocas fuentes de energía capaz de producir electricidad las 24 horas del día y su aprovechamiento en condiciones adecuadas puede tener un costo competitivo en relación con el carbón o el gas natural, lo que significa que los países pueden pasar a depender menos

de los combustibles importados y ampliar su seguridad energética. Por tratarse de una fuente de electricidad muy limpia, la energía geotérmica también puede tener un papel importante en la disminución de las emisiones de carbono del sector energético (Grupo Banco mundial, 2017).

## **2.2 Naturaleza de los recursos geotérmicos**

El recurso geotérmico, es constituido por el calor del interior del globo; es por ello por lo que el objetivo de la energía geotérmica es el aprovechamiento de la energía calorífica del interior de la Tierra. Sin embargo, para que esa energía sea aprovechada se necesita que sea acumulada en algún cuerpo del interior de la corteza, las formas más comunes encontradas es en el agua que rellena los poros y fracturas de las formaciones rocosas que constituyen la litosfera y a su vez esta actúa como captador y transmisor de la energía geotérmica (González Velasco, J. 2015).

El agua contenida en los poros adquiere los niveles energéticos (temperatura y presión) que la energía proveniente del interior del globo le transfiere, el fluido adquiere características químicas específicas determinadas por el equilibrio fisicoquímico que se produce en la litosfera, enriqueciéndose en sales minerales provenientes de la disolución del esqueleto rocoso donde se alberga. De esta forma el fluido que emana del interior de la tierra, denominado fluido geotérmico, en condiciones de presión y temperaturas adecuadas, sirve de vehículo para el aprovechamiento de la energía en forma de calor que proviene del subsuelo.

### **2.3 Magnitud de los recursos geotérmicos**

En la superficie de la tierra se detecta un flujo de calor que proviene de su interior, cuyo origen se encuentra en el hecho que la temperatura en la tierra aumenta con la profundidad. El flujo de calor alcanza un valor global de alrededor de  $10^{21}$  julios por año, es decir, una cantidad de energía anual que duplica el doble del ritmo al que actualmente la humanidad utiliza. El flujo de calor es proporcional al gradiente geotérmico (a la velocidad de variación de la temperatura con la profundidad) multiplicado por la conductividad térmica de las rocas (González Velasco, J. 2015)

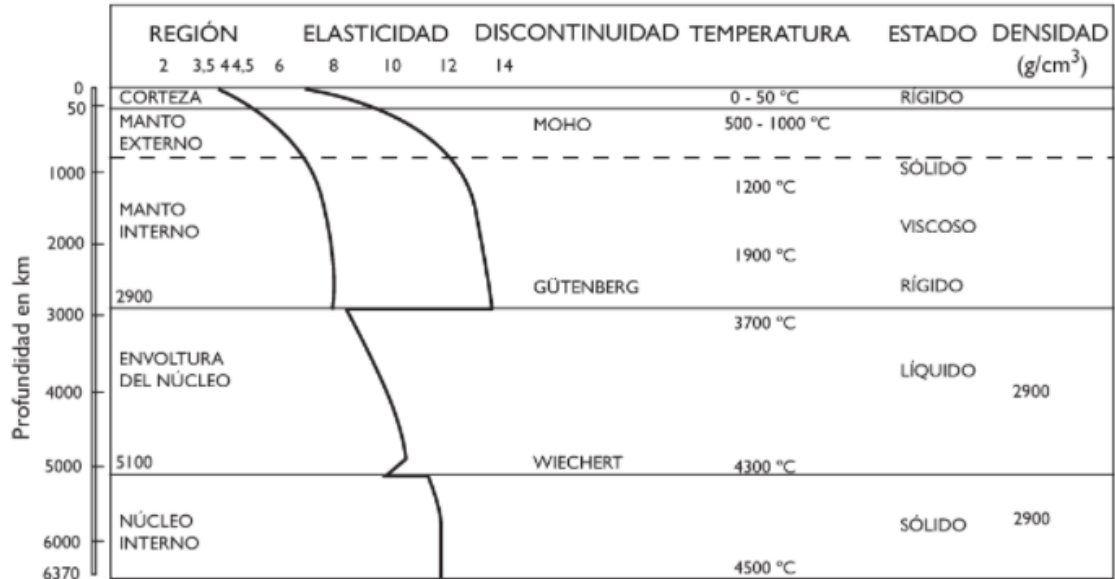
La conductividad térmica de las rocas es una magnitud cuyo valor se puede medir sin dificultad, mientras que las medidas de la temperatura a distintas profundidades pueden estar influidas por diversas circunstancias. En zonas superficiales, por ejemplo, a menos de 15 metros la temperatura en superficie puede influir en las medidas, y en las zonas más profundas la temperatura puede estar influida por perturbaciones, debidas a la perforación de pozos o por la circulación de agua subterránea en esas zonas.

### **2.4 Características de la energía geotérmica**

El flujo calorífico proveniente de la profundidad de la tierra se origina por la gran diferencia de temperatura que existe entre el núcleo interno de la tierra y la superficie. El núcleo se mantiene sólido pese a su alta temperatura debido a las grandes presiones que se dan en las profundidades. La figura 1 muestra cómo cambia la temperatura con respecto a la profundidad de la tierra y con ciertas propiedades físicas de las distintas capas de la tierra, estas propiedades, como la velocidad de propagación de ondas sísmicas y la densidad,

dependen de la temperatura, presión o de la composición de estas zonas, aunque en las regiones más profundas la presión tiene mayor influencia que la temperatura.

**Figura 1. Propiedades físicas de las capas del interior de la tierra**



**Fuente:** González Velasco, J. (2015). Energías renovables. Editorial Reverté.

La existencia de calor residual parece ser la causante de la distribución de temperaturas las cuales han sido emitidas por procesos acaecidos en tiempos remotos, por lo que se relacionan con el origen del planeta.

Existen focos de calor próximos a la superficie que son relativamente accesibles, pero, este calor geotérmico suele ser de baja calidad ya que la temperatura puede oscilar entre 50 y 70°C y suele ser útil como calefacción o para ciertos procesos agrícolas. En algunas áreas, los flujos geotérmicos anómalos pueden llegar a temperaturas que van desde 150°C o más, estos permiten generar vapor, el cual se puede utilizar en turbinas para la producción eléctrica. Países como Nueva Zelanda, Estados Unidos, Islandia o Italia, poseen centrales

geotérmicas en pleno funcionamiento, no obstante, la cantidad de calor necesaria para producir una cantidad de electricidad significativa es mucha, teniendo en cuenta las bajas eficiencias de conversión que se alcanzan con una fuente energética de bajo grado o nobleza como es el calor, en una energía de alto grado termodinámico como es la electricidad, provocan que el ritmo de utilización de energía calorífica en las centrales eléctricas sea superior a aquel que es aportado por el flujo térmico desde el interior. Todo esto conlleva a que la energía que se utiliza en las centrales eléctricas geotérmicas es calor almacenado durante siglos en las rocas o acuíferos. Como resultado de la alta demanda en un intervalo de tiempo se puede llegar a un enfriamiento del área cuya recuperación puede necesitar décadas e incluso siglos (González Velasco, J. 2015)

### **2.5 Origen del calor geotérmico**

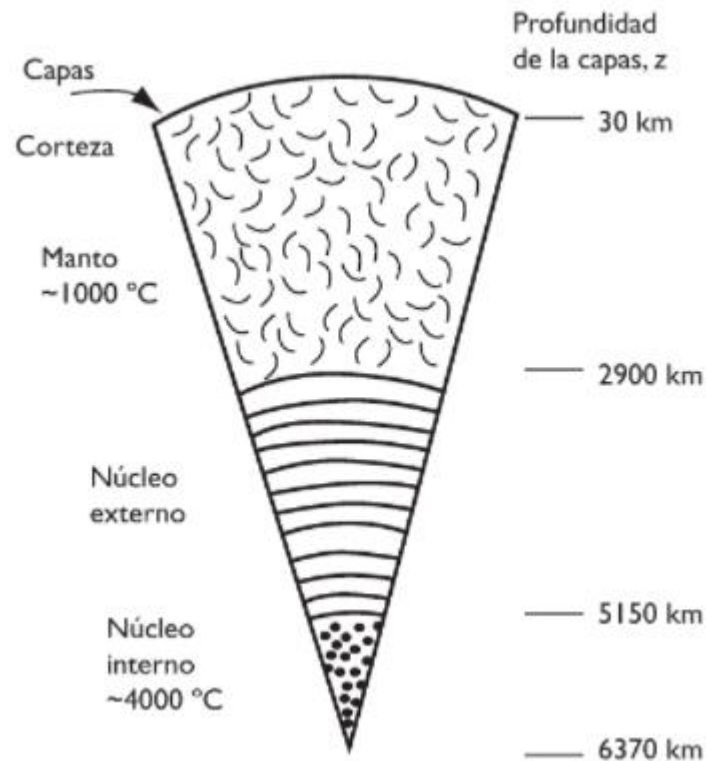
El origen del calor interno de la Tierra es consecuencia de dos tipos de procesos:

La mayor parte del calor procedería del proceso de formación de la tierra, el cual se cree que comenzó hace alrededor de 4600 millones de años, donde por un proceso denominado de “acreción gravitatoria” los bloques de roca, acelerados por la acción gravitatoria, chocaron entre sí, convirtiendo la energía cinética que poseían en calor, el cual elevó la temperatura por encima de la temperatura de fusión de metales abundantes y densos como el hierro y el níquel.

La parte más externa de la tierra perdió calor por radiación, dando lugar a la formación de una corteza, de unos 30 km de espesor que está en contacto con el manto semifluido, las diferencias de temperaturas entre las capas son notable y depende de la profundidad a la que se encuentren. En la figura 2. se observa cada una de las capas que componen a la Tierra,

dando un estimado de la profundidad a la que se pueden encontrar, así como también la temperatura que se puede alcanzar en esas zonas profundas (González Velasco, J. 2015).

**Figura 2. Representación de capas internas de la tierra**



**Fuente:** González Velasco, J. (2015). Energías renovables. Editorial Reverté.

## 2.6 Yacimientos y regiones geotérmicas

Los yacimientos geotérmicos se definen como un espacio físico en el interior de la corteza terrestre, dentro de una región con determinadas condiciones geológicas, en el que se sitúa un recurso geotérmico cuya explotación es técnica y económicamente viable. Al considerar el carácter de la energía geotérmica como recurso energético es correcto evaluar y sopesar la posibilidad de su utilización, sin embargo, las condiciones no son iguales para

todos los yacimientos y zonas geotérmicas, debido a ello se pueden clasificar dependiendo de la temperatura en el subsuelo, el modo de explotación y el tipo de utilización de esta energía acumulada.

### ***2.6.1 Hipertérmicas o de alta entalpía***

Son las regiones geotérmicas en las que el gradiente de temperatura es superior a  $80\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$  y en las que se puede acceder a agua caliente o vapor con temperaturas de  $150\text{ -- }200\text{ }^{\circ}\text{C}$ , que son generadas por contacto entre un acuífero y rocas próximas a la superficie, dichas zonas suelen encontrarse próximas a áreas de actividad volcánica (González Velasco, J. 2015).

Por su parte los yacimientos pertenecientes a estas zonas se caracterizan por ser aquellos que se encuentran a profundidades técnicamente accesibles, donde existe un volumen de roca permeable, conteniendo un fluido que puede recorrerla a altas temperaturas y que se encuentra sellada o atrapada por formaciones impermeables que impiden el escape del fluido. Son adecuados para la producción de electricidad y se sitúan sobre zonas geológicamente activas y de flujo geotérmico elevado (García de la Noceda, 2008).

### ***2.6.2 Semitérmicas o de entalpía media***

Son las regiones geotérmicas en las que el gradiente de temperatura varía entre  $40$  y  $80\text{ }^{\circ}\text{C km}^{-1}$  y donde pueden encontrarse fuentes de calor a temperaturas hasta  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$  que permiten la utilización de los recursos térmicos para suministrar calefacción y agua caliente a zonas habitadas y calor para procesos agrícolas. Estas zonas se localizan en regiones alejadas de los bordes de placa, pero en las que aparecen estructuras y fracturas anómalas en la corteza (González Velasco, J. 2015).

Los yacimientos que se encuentran dentro de estas zonas geotérmicas generalmente tienen temperaturas entre los 90 y 150° C. Permite la producción de electricidad mediante el empleo de fluidos intermedios de bajo punto de ebullición (ciclos binarios). Los ciclos binarios, conocidos ya desde hace décadas, han experimentado un desarrollo importante logrando incrementar sus rendimientos de forma notable, factor que limitaba la valoración de los yacimientos de media temperatura hace tan sólo un cuarto de siglo (IDAE-IGME, 2008).

### ***2.6.3 Normales o de baja entalpía***

Son aquellas zonas geotérmicas en las que los gradientes de temperatura son inferiores a 40°C km<sup>-1</sup> y en las que el flujo de calor en la superficie es del orden del valor promedio, 0,06 Wm<sup>-2</sup> y de las que, difícilmente, se puede extraer energía a precios competitivos (González Velasco, J. 2015).

Por lo general los recursos geotérmicos presentes dentro de estas zonas se explotan en el mismo sitio de forma directa, ya sea para calefacción, recreación o procesos agrícolas

### ***2.6.4 Yacimientos geotérmico de roca caliente seca.***

Son aquellos en los que no hay existencia de fluido (tan sólo una masa de roca a elevada temperatura), mediante técnicas de fracturación artificial e inyección de fluido se consigue establecer un circuito geotérmico con inyección de agua y extracción de vapor que es utilizado para la generación de electricidad (Sánchez, et al. 2011).

### ***2.6.5 Yacimientos geotérmicos en rocas incompletamente solidificadas.***

Generalmente se sitúan en áreas de volcanismo reciente, se encuentran rocas en estado de fusión o parcialmente solidificadas, a las que se les puede extraer su energía (Sánchez, et al. 2011).

### ***2.6.6 Yacimientos geotérmicos en condiciones hipercríticas.***

Este tipo de yacimientos cuenta con condiciones termodinámicas en las que el fluido geotérmico se sitúa por encima del punto crítico. Se trata de futuros desarrollos en zonas muy privilegiadas del planeta, son buenos prospectos, pero la tecnología actual para su explotación es costosa y debido a eso no se ha iniciado una explotación a gran escala de este tipo de recursos (Sánchez, et al. 2011).

### ***2.6.7 Yacimientos geotérmicos geo-presurizados.***

El descubrimiento de este tipo de yacimientos se ha dado debido a las explotaciones petrolíferas en cuencas sedimentarias con un gradiente geotérmico normal, donde la temperatura del agua subterránea es superior a 150°C y se encuentra a una profundidad por sobre los 6.000 m. Estos yacimientos son característicos en cuanto a que el agua del acuífero está sometida a presiones entre 40 a 90% por sobre la presión hidrostática que correspondería a la profundidad que se encuentran. De igual manera presentan grandes cantidades de metano disuelto en el agua subterránea. Estos yacimientos ofrecen tres tipos de energía: Térmica (agua caliente), química (metano) y mecánica (fluidos a muy alta presión) (Sánchez, et al. 2011).

### ***2.6.8 Yacimientos geotérmicos magmáticos.***

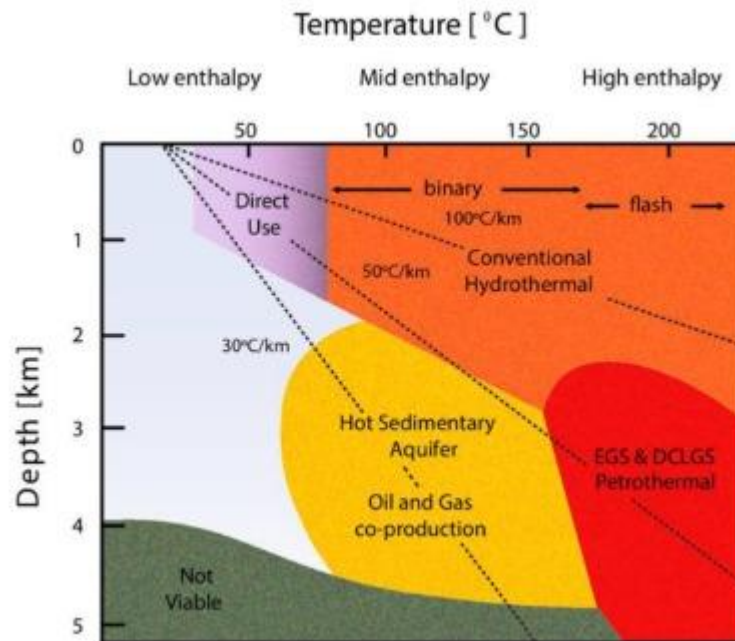
Estos yacimientos son principalmente de roca fundida y se asocian a zonas existentes en volcanes activos o con zonas de debilidad cortical a gran profundidad. La principal característica de este tipo de yacimiento son las altísimas temperaturas disponibles que generalmente superan los 800°C (Gutiérrez, 2011). Este tipo de yacimientos no han sido explotados ya que aún no se cuenta con la tecnología y los materiales adecuados para resistir la corrosión y las altas temperaturas, al llegar a aprovecharse se estaría hablando de recursos energéticos gigantescos ya que se estaría aprovechando la inmensa energía almacenada en las cámaras magmáticas de los volcanes.

### ***2.6.9 Yacimientos geotérmicos marinos.***

Como su nombre lo indica este tipo de yacimientos se encuentran en el fondo del mar y presentan temperaturas elevadas por la presencia de volcanes sumergidos en el mar. Hasta el momento han sido poco estudiados y no se cuenta con registros de su explotación. Según estudios realizados en el Golfo de California (México), donde se efectuaron inmersiones preliminares en submarinos, lo que permitió observar a 2.600 m de profundidad impresionantes chimeneas naturales que descargan chorros de agua a 350°C. El flujo de calor medido en algunos puntos del Golfo de California es muy alto, de 0,34 W/m<sup>2</sup>, mientras que en promedio el flujo natural de calor alcanza valores de entre 0,05 y 0,1 W/m<sup>2</sup> (Sánchez. et.al 2011).

La Figura 3. detalla las distintas zonas geotérmicas y los tipos de yacimientos que pueden encontrarse en ellas dependiendo de las profundidades y las entalpías

**Figura 3. Caracterización de las regiones de entalpía en función de la profundidad y la temperatura**



**Fuente:**Feder, J. (2020). Geothermal: Digging Beneath the Surface. *Journal of Petroleum Technology*, 72(10), 30-34.

## 2.7 Física de los recursos geotérmicos

Para que la energía geotérmica sea aprovechable, no solo es necesario que exista un flujo de calor o un gradiente geotérmico anómalo, sino que también tiene que existir un agente que extraiga dicho calor. Este papel lo desempeña el agua subterránea que se encuentra en acuíferos o sistemas hidrotérmicos.

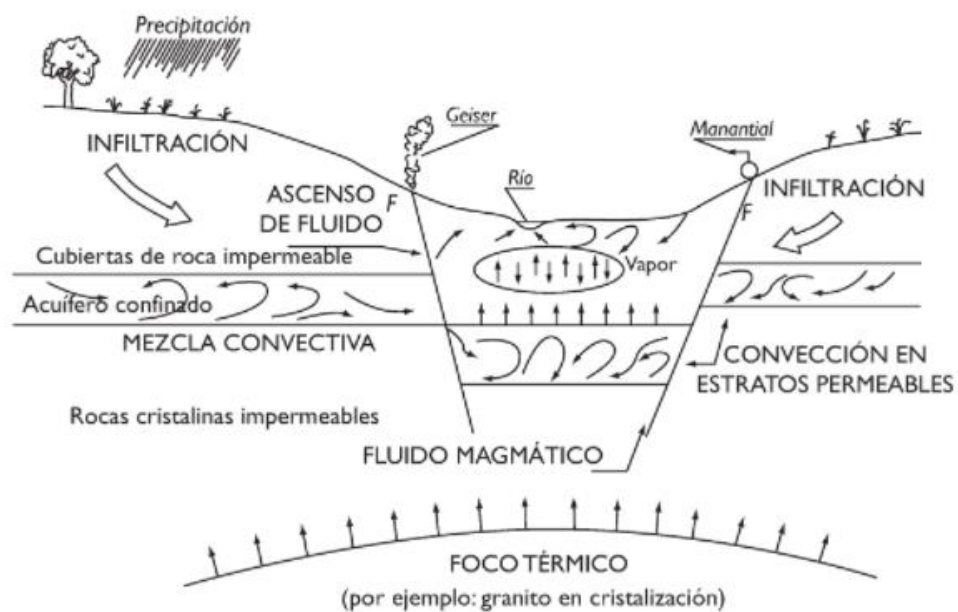
Los fluidos hidrotermales pueden tener su origen en ciclos hidrogeológicos, en los que aparece una zona de entrada de agua, unos mecanismos de flujo y una zona de descarga por la cual emana el agua.

Para que los recursos geotérmicos puedan ser explotados, deben poseer tres tipos de características físicas.

- 1) Debe existir un acuífero.
- 2) Una cubierta rocosa que retenga el fluido geotérmico.
- 3) Una fuente de calor.

En la Figura 4 se presenta un esquema típico de un yacimiento geotérmico convencional, en donde se observa cómo se da el proceso de infiltración del fluido, así como la deposición y transporte hacia la zona geotérmica.

**Figura 4. Representación de un yacimiento geotérmico y su origen.**



**Fuente:** González Velasco, J. (2015). Energías renovables. Editorial Reverté.

## 2.8 Técnicas de exploración e investigación

Existe una gran diferencia entre la energía geotérmica y otras energías renovables, y es que la geotermia requiere una estrategia de búsqueda diferente, catalogada al nivel de recursos minerales. La localización y evaluación de estos yacimientos energéticos requieren la aplicación de diversas tecnologías, gran parte adaptadas de la investigación de hidrocarburos, aunque también de la investigación hidrogeológica y de recursos minerales.

Las estrategias de exploración dependen del tipo de recurso que se pretende localizar y del área que se plantea cubrir. Las fases más características de la investigación de recursos geotérmicos de alta y media entalpía se resumen en las siguientes tablas (Tabla 1, Tabla2):

En la Tabla 1. se puede apreciar cada una de las etapas de un proyecto de explotación geotérmica, cada una de esas etapas cuenta con fases que a su vez detallan objetivos que van de un panorama nacional a uno específico de la zona. Por medio de esta tabla se puede tener una visión general de lo que puede ser el estudio y evaluación de zonas geotérmicamente potenciales.

**Tabla 1. Etapas de estudio de un campo geotérmico.**

Etapas	Fases	Objetivos	Área	Duración(años)
		Caracterización general		3 a 4
		regiones geotérmicas a nivel nacional, modelo general de funcionamiento, priorización y propuesta de actuaciones	Nacional 10000 y 100000 km2	
	RECONOCIMIENTO			4 a 5

INVESTIGACIÓN	PREFACTIBILIDAD	Selección de zonas y áreas, estimación potencial, modelos de campo y delimitación de puntos de interés	Regional 500 a 2000 km <sup>2</sup>
	FACTIBILIDAD	Confirmación y adecuación, modelo campo, evaluación del yacimiento, diseño modelo explotación, valoración económica detallada	Yacimiento 10 a 100 km <sup>2</sup>
DESARROLLO Y EXPLOTACIÓN		Actualización de información y evaluación precisa del modelo	25 a 30 local
RENOVACIÓN DESMANTELAMIENTO		Retorno a fase de explotación o restauración de los terrenos	2 a 3 local

**Fuente:** IDAE, & IGME. (2008). De Geotermia. En *3C Tecnología\_Glosas de innovación aplicadas a la pyme* (Vol. 4, Número 3).

En la tabla 2 se encontrará de manera resumida las diferentes técnicas que se utilizan durante el desarrollo de un proyecto geotérmico, se evidencian desde la fase de reconocimiento hasta la fase de desarrollo y explotación. Los estudios realizados para los proyectos geotérmicos van muy de la mano con los estudios que se realizan en los proyectos hidrocarbúferos, por lo que las técnicas geológicas, geoquímicas, geofísicas y de exploración se detallan de acuerdo a los objetivos que se pueden alcanzar durante las fases y las pruebas necesarias para la obtención de dichos

objetivos. Con esta información se podrá definir la tecnología necesaria para una buena evaluación de los potenciales geotérmicos de las zonas prospectas.

**Tabla 2. Técnicas de estudio para los yacimientos geotérmicos**

Técnicas	Objetivos	Pruebas
<b>Geológicas</b>	Confirmar las condiciones geológicas del yacimiento: Foco de calor, almacén y cobertera	Fotointerpretación, tectónica, estratigrafía, volcanología, sismología, petrografía, datación absoluta.
<b>Geoquímicas</b>	Confirmar la existencia de fluidos geotérmicos y definir sus características fisicoquímicas	Hidro química, Geo termometría química, técnicas isotópicas, geoquímica de gases y volátiles, estudio de depósitos y alteraciones hidrotermales
<b>Geofísicas</b>	Delimitar geométricamente el yacimiento geotérmico y definir sus características térmicas (temperatura y flujo de calor)	Geofísica estructural: Teledetección, gravimetría, magnetismo, sísmica. Geofísica de detalle: eléctrica, electromagnética, magnetotelúricos, micro sismicidad, polarización espontánea, sísmica 3D, termometrías y medidas de flujo.
<b>Sondeos exploratorios</b>	Confirmar todos los datos previos y evaluar el yacimiento geotérmico	Perforación, digrafías eléctricas, Ensayos en testigos (porosidad y permeabilidad), pruebas de presión, ensayos de producción e interferencias.

**Fuente:** IDAE, & IGME. (2008). De Geotermia. En *3C Tecnología\_Glosas de innovación aplicadas a la pyme*

(Vol. 4, Número 3). [http://www.igme.es/Geotermia/Ficheros PDF/Manual\\_Geotermia\\_2,5.pdf](http://www.igme.es/Geotermia/Ficheros PDF/Manual_Geotermia_2,5.pdf)

## 2.9 Principales yacimientos geotérmicos explotados

La explotación de los recursos geotérmicos lleva más de 100 años y se estima que es una de las fuentes más grandes de energía limpia, pero el difícil acceso a ella y la tecnología actual que se tiene ha dado la posibilidad para que más yacimientos geotérmicos puedan ser explotados, la existencia de algunas zonas geológicas y técnicamente aptas para la obtención de calor suficiente para convertirlo en energía eléctrica ha permitido que se creen grandes plantas de generación de electricidad a partir de la energía geotérmica.

Para el año 2021 aún con los retos puestos por la pandemia debido al Covid-19 el sector de la energía geotérmica supo sobre llevar la situación y agregó más capacidad instalada, logrando tener una capacidad total instalada de 15.854MW para finales del año 2021, de acuerdo a información publicada por ThinkGeoenergy (2022) el listado de país con mayor capacidad instalada a nivel mundial se resume en la Tabla 3.

**Tabla 3. Países más productores de energía geotérmica a nivel mundial.**

País	Capacidad Instalada [MW]	Aumento durante el año 2021 [MW]
Estados Unidos	3.722	8
Indonesia	2.276	143
Filipinas	1.918	0
Turquía	1.710	22
Nueva Zelanda	1.037	32
México	962,7	0
Italia	944	0
Kenia	861	0
Islandia	754	0,3
Japón	603	0
Otros Países	1067	

**Fuente:** Richter, A. (2022, 11 enero). *ThinkGeoEnergy's Top 10 Geothermal Countries 2021 – installed power*

*generation capacity (MWe). Think GeoEnergy - Geothermal Energy News.*  
<https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2021-installed-power-generation-capacity-mwe/>

Durante los últimos años los avances tecnológicos del sector geotérmico impulsados por las nuevas políticas ambientales han dado paso para que nuevos yacimientos geotérmicos sean explotados, generando una gran cantidad de energía limpia que ha ayudado a suplir las necesidades energéticas. A continuación, se detallarán características de algunos de los complejos geotérmicos más grandes del mundo.

### ***2.9.1 Complejo geotérmico The Geysers – Estados Unidos***

Está situado en las montañas Mayacamas, unos 116 kilómetros al norte de San Francisco, California. Se compone de 21 plantas de energía que la convierten en la instalación geotérmica más grande en el mundo. El complejo cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 1.808 MW y una capacidad de producción activa superior a 1.000 MW, se estima que su desarrollo abastece el 60% de la demanda de energía de la región costera comprendida entre el Golden Gate y la frontera del Estado de Oregon.

A diferencia de la mayoría de los recursos geotérmicos, The Geysers es un campo de vapor seco que produce principalmente vapor sobrecalentado. Las instalaciones en conjunto cubren un área de aproximadamente 78 km<sup>2</sup>, cuya producción del campo geotérmico fue iniciada por Pacific Gas & Electric en 1960 con una primera planta de 11 MW de potencia instalada y alcanzó su punto máximo en la década de 1980 (Roca, 2016).

### ***2.9.2 Complejo geotérmico Cerro Prieto – México.***

Es el campo geotérmico más importante de México está localizado en la superficie aluvial del Valle de Mexicali, Baja California, tectónicamente está situado en el límite de las placas del Pacífico y Norteamérica y cercano a la falla de San Andrés. El plano es un delta y la sección geológica está hecha de arcillas sin consolidar, arena y grava, las cuales descansan en rocas sedimentarias de arena comprimida, lutitas y limonitas. Algunos de los pozos en el campo fueron perforados a finales de los 1960s, sin embargo, no fue sino hasta abril de 1973 que se pusieron en operación de cuatro unidades de 37,5 MW. Actualmente, se han instalado 820 MW de capacidad divididos en cuatro plantas de energía, Cerro Prieto I, II, III y IV, con tasa de producción de 180, 220, 220 y 100 MW respectivamente. Las cuatro unidades de 37,5 MW de Cerro Prieto I funcionan con vapor de alta presión y una quinta unidad de 30 MW con vapor de media y baja presión, que se obtiene después de la primera expansión, es decir, de un fluido caliente de baja entalpía. La planta de energía, al igual que todos los otros campos geotérmicos en México, se encuentra en propiedad y operada por la eléctrica pública Comisión Federal de Electricidad (CFE) (Ocampo & Rojas, 2004)

La planta IV opera con vapor seco y tiene dos turbogeneradores de 50 MW. Más de 350 pozos han sido perforados desde 1960 y el rango de profundidades varía desde 750 m para los más someros hasta 4.124 m para los más profundos y de casi 170 están suministrando vapor. De acuerdo a estudios realizados previamente, el complejo geotérmico Cerro Prieto tiene una capacidad estimada de reservorio de 1.200 MW, con 820 MW de capacidad probada.

### ***2.9.3 Complejo geotérmico Larderello – Italia***

Este complejo geotérmico es de gran importancia para la industria geotérmica, ya que fue la primera planta geotérmica en funcionamiento y aún sigue vigente, dando así una historia de más de 100 años de aprovechamiento de la energía geotérmica mundial.

El complejo geotérmico Larderello, está ubicado en Toscana, Italia. Es la primera planta geotérmica del mundo, puesta en marcha en el año 1913 que contaba con una potencia instalada de 250 kW. Con más de 100 años de funcionamiento, la planta sigue en operación llegando a una potencia instalada de 769 MW, convirtiéndose en la tercera planta más grande del mundo. Considerando que las plantas geotérmicas en el campo fueron reconstruidas después de que quedasen destruidas durante la Segunda Guerra Mundial. Esta planta se caracteriza por funcionar gracias a acuíferos con vapor caliente cuya temperatura es lo suficientemente elevada para producir económicamente este tipo de energía (Energoclub, 2004).

En 1818, el comerciante Francesco Giacomo Lardere comenzó las obras cerca del pueblo de Montecerboli de las primeras instalaciones capaces de aprovechar las aguas geotérmicas para la producción de ácido bórico.

Fue a través del trabajo de Piero Ginori Conti que el complejo finalmente encontró su camino hacia la energía geotérmica con la creación del primer generador de energía geotérmica en 1904. Basado en el campo de la corriente seca de Lardorello, el generador fue capaz de producir 10 kW de energía y de alimentar cinco bombillas. Desde entonces, el potencial geotérmico de Lardorello se amplió en 1911. En un área conocida como el Valle del Diablo, la primera planta de energía geotérmica del mundo fue terminada en 1913.

Larderello 1 tenía una capacidad de 250 kW y podía producir 2.750 kW de electricidad, que se utilizaba para alimentar el sistema ferroviario italiano y los pueblos cercanos de Larderello y Volterra.

#### ***2.9.4 Complejo geotérmico Olkaria – Kenia***

El complejo geotérmico Olkaria, está ubicada en el parque nacional de Hell Gate de Olkaria en el borde oriental del Valle del Rift, a aproximadamente 33 kilómetros, al suroeste de Naivasha y a 120 km al noroeste de Nairobi, la capital de Kenia. Este complejo Tiene una capacidad instalada de 540 MW entre sus 5 plantas, siendo la más grande de su país y la cuarta del mundo.

El complejo de las 5 unidades geotérmicas de Olkaria que se dividen en Olkaria I de 45 MW, II de 105 MW, III de 110 MW, IV de 140 MW y V de 140 MW, las cuales permiten que la geotermia sea la fuente primaria de generación de electricidad del país superando a la energía hidráulica, reduciendo un 30% el coste de la electricidad y hasta un 50% a principios del año 2015 (Lagos, 2017).

#### ***2.9.5 Complejo geotérmico Makban – Filipinas***

El complejo geotérmico Makban, también se conoce como Plantas de Energía Makiling – Banahaw. Se encuentra en los municipios de Bahía y Calauan en la provincia de Laguna y Santo Tomás, en la Isla de Luzón, Filipinas. Este complejo geotérmico cuenta con una capacidad instalada de aproximadamente 458 MW, lo que la convierte en la quinta mayor instalación de energía geotérmica en el mundo, siendo propiedad de AP Renewables, una subsidiaria de Aboitiz Power. El complejo consta de seis plantas de energía que comprenden de 10 unidades, incluyendo una planta binaria con cinco unidades de 3 MW y una unidad

0,73 MW. Las instalaciones, con una superficie de 700 hectáreas, iniciaron sus operaciones en abril de 1979 (Lagos, 2017).

### ***2.9.6 Complejo geotérmico Salton Sea – Estados Unidos.***

Este complejo geotérmico consta de un conjunto de 10 plantas de generación de energía, ubicado en Calipatria, cerca del Mar de Salton en el Valle Imperial de California del Sur. Con una capacidad de generación combinada de 340 MW, siendo la sexta instalación geotérmica más grande en el mundo (Roca, 2016).

La Unidad 1 que cuenta con una capacidad de producción de 10 MW inició su funcionamiento en 1982, construida por una empresa mixta formada por la Union Oil Company y la Southern California Edison.

### ***2.9.7 Complejo geotérmico Hellisheidi – Islandia***

Este complejo geotérmico marca un gran paso para la industria de las energías renovables y las tecnologías de descarbonización, ya que cuenta con una planta de producción combinada de calor y electricidad (CHP) de vapor flash situada en el monte Hengill, aproximadamente a 20 kilómetros al este de la capital, Reykjavik. La planta tiene una capacidad de producción de 303 MW de energía eléctrica y 400 MW de energía térmica. Su principal atractivo se debe a que confina en agua el CO<sub>2</sub> que se atrapa del aire, en una proporción de 1 kg del gas de efecto invernadero por cada 27 kg de agua dulce; inyectándolo a 700 metros bajo tierra (Mosquera, 2017).

La técnica implementada en esta central se denomina “de captura directa de aire” y podría resumirse como “hacer que las máquinas funcionen como un árbol”. Mediante un

sistema de ventiladores absorbe aire, filtra el CO<sub>2</sub> que contiene e inyecta este gas en agua, que es bombeada al subsuelo. Y allí, el CO<sub>2</sub> se filtra a las rocas. Información recolectada de Quartz Media

En los últimos tres años, la planta de Hellisheidi ha inyectado más de 18.000 toneladas de CO<sub>2</sub> en el subsuelo en el marco de un proyecto desarrollado por Carbon Engineering junto con CarbFix, durante este tiempo, se ha comprobado que el dióxido de carbono en estas mezclas de agua estaba reaccionando con la vasta roca basáltica del subsuelo de la isla y formando minerales muy rápidamente.

El proceso de convertir el CO<sub>2</sub> en roca generalmente lleva cientos o miles de años. Sin embargo, en Islandia debido a la mineralización se ha producido en menos de dos años. La velocidad, indica que probablemente se relaciona con la singular geología de la zona. Los acuíferos de arenisca, que han sido el tipo de sistema de roca más estudiado cuando se trata de sistemas de inyección de dióxido de carbono, reaccionan muy lentamente con el CO<sub>2</sub>. La roca de basalto, sin embargo, parece reaccionar con mayor rapidez, probablemente debido a la presencia de metales como el hierro y el aluminio (Mosquera, 2017).

Según Edda Aradóttir, geólogo de CarbFix se ha mostrado que, una vez bloqueado en los minerales, el dióxido de carbono no puede volver a la atmósfera durante millones de años. Y este tipo de roca de basalto no solo está presente en Islandia, sino en grandes depósitos en todo el mundo. Además, de acuerdo con, la técnica aplicada en Hellisheidi tiene un coste inferior a los 30 dólares por tonelada de dióxido de carbono, aún costoso pero asumible teniendo en cuenta lo que representa.

### 2.9.8 Complejo geotérmico Tiwi – Filipinas

Este complejo geotérmico inició con trabajos de perforación en 1972, entrando las instalaciones en funcionamiento en 1979. La planta se encuentra ubicada en la provincia de Albay, a aproximadamente 300 kilómetros al sureste de Manila. Consta de tres plantas de energía que disponen de dos unidades cada una proporcionando una capacidad neta de 289 MW, siendo una de las diez instalaciones geotérmicas más grande del mundo, que al igual que el complejo de Makban, es propiedad de AP Renewables, una filial de Aboitiz Power (Roca, 2016).

La Tabla 4 resume los principales complejos geotérmicos del mundo, enunciando su capacidad y ubicación

**Tabla 4. Principales complejos de energía geotérmica a nivel mundial.**

Complejo Geotérmico	Capacidad [MW]	Ubicación
The Geysir	1.808	Estados Unidos
Cerro Prieto	820	México
Larderello	769	Italia
Olkaria	540	Kenia
Makban	458	Filipinas
Salton Sea	340	Estados Unidos
Hellisheidi	303	Islandia
Tiwi	289	Filipinas

**Fuente:** Roca, J. (2016). *Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo*. El periódico de la energía.

<https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>

## 2.10 Modelos de determinación de potencial geotérmico

### 2.10.1 Modelo matemático

**2.10.1.1 Metodología.** Este modelo se basa en calcular la energía del yacimiento y cuanto de esa energía es recuperable, se tienen en cuenta las pérdidas ocasionadas al transportar el calor desde las profundidades del yacimiento hacia superficie, de este modo puede evaluar que tan factible es la implementación de un proyecto de energía geotérmica.

**2.10.1.2 Parámetros que influyen en la energía geotérmica.** Cuando se desea estimar la cantidad de energía geotérmica en un yacimiento se requieren muchos parámetros para calcular la temperatura en el yacimiento, estos a su vez ayudará a estimar con precisión el potencial del recurso geotérmico. El mapa de flujo de calor (Q), la conductividad térmica (K) y el gradiente geotérmico ( $\partial T/\partial z$ ) forman los tres parámetros principales directamente involucrados en el estudio (Okeifufe et al., 2020).

- **Mapa de flujo de calor.** El mapa de flujo de calor geotérmico de un país ilustra como influye el calor desde el interior de la corteza terrestre a la superficie. Es uno de los indicadores que muestran la ubicación de los recursos geotérmicos. Los datos de flujo de calor muestran la calidad de los recursos geotérmicos ubicados en un área, además, existe información relevante que es útil para evaluar los recursos geotérmicos, que incluyen: gradiente geotérmico, geo termometría, datos geofísicos (eléctricos, magnéticos, magnetotelúricos, gravitacionales, sensores remotos), mediciones de temperatura del suelo de poca profundidad y otros (Okeifufe et al., 2020).

En la Figura 5 se muestra el mapa preliminar de gradientes geotérmicos, donde se muestran valores de flujo de calor en  $\text{mW/m}^2$ , este mapa compila los datos más recientes que están disponibles y las zonas positivas identificadas en las cuencas colombianas, incluyendo el flujo de calor de acuerdo al uso de una base de datos geotérmica y los valores de flujo de calor calculados a partir de los registros de temperatura y profundidad del pozo y otros datos de gradiente publicados. El flujo de calor se expresa mediante la ecuación:

$$Q = -K * G$$

Donde:

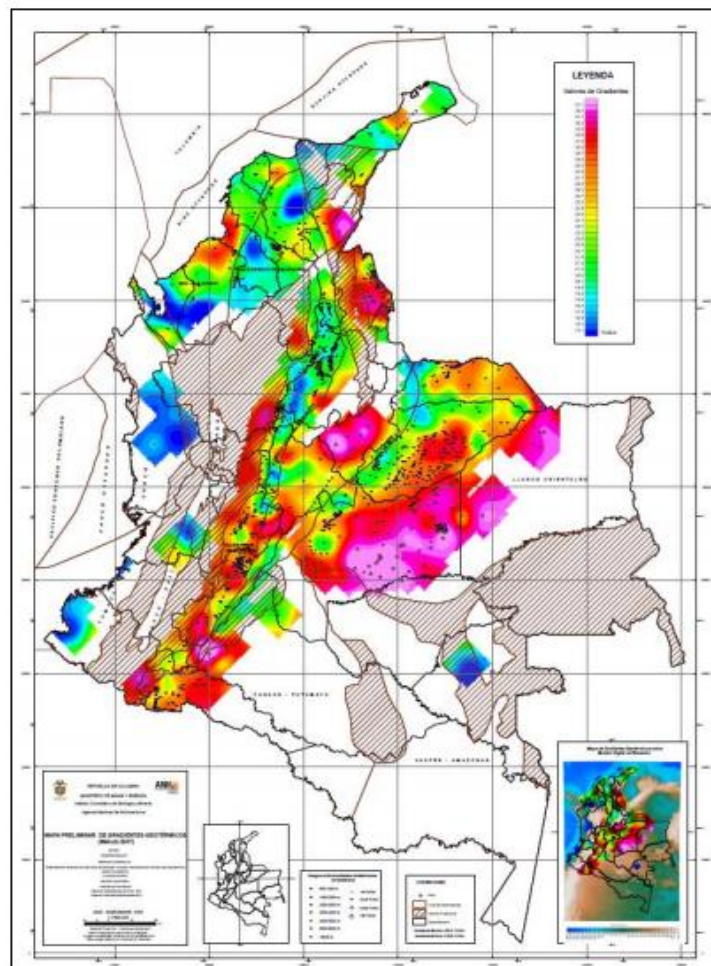
Q= el flujo de calor en  $\text{W/m}^2$

K= es la conductividad térmica de la roca de la formación en  $\text{W/m}^\circ\text{C}$

G= es el gradiente geotérmico  $^\circ\text{C/m}$

El menos significa que el calor se transfiere desde una parte más profunda de la tierra a la superficie.

**Figura 5. Mapa preliminar de gradientes geotérmicos de Colombia. Anomalías positivas son identificadas principalmente en áreas localizadas en las cuencas Llanos Orientales, Caguán – Putumayo, Cordillera Oriental y Catatumbo. Anomalías negativas, son observadas en Guajira, Sinú - San Jacinto, Valle inferior del Magdalena, Urabá, Chocó y Tumaco.**



**Fuente:** Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Vargas, C., & Briceño, L. A. (2009). Mapa Preliminar De Gradientes Geotérmicos De Colombia Ministerio De Minas Y Energía Instituto Colombiano De Geología Y Minería Ingeominas Instituto Colombiano De Geología Y Minería Ingeominas Agencia Nacional De Hidrocarburos Proyecto Mapa Geotérmico De C.

- **Conductividad térmica.** La conductividad térmica, que comúnmente se denota por "k", se define como la capacidad natural de un material para conducir calor. Es uno de los tres modos de transferencia de calor entre convección y radiación. La capacidad natural de un material para conducir el calor depende en gran medida de varios factores. Estos incluyen el gradiente de temperatura, las propiedades del material y la longitud del camino que sigue el calor. (Okeifufe et al., 2020)
- **Gradiente geotérmico.** El gradiente geotérmico es la tasa de aumento de la temperatura con respecto al aumento de la profundidad en el interior de la tierra. La información sobre el gradiente geotérmico y el flujo de calor dentro del subsuelo es muy importante en el objetivo de la exploración de la energía geotérmica. Al tratar de determinar el potencial geotérmico de la cuenca del delta del Níger para la generación de energía, se obtuvo información sobre la temperatura del pozo, así como sus respectivas profundidades, de varios pozos de petróleo en la cuenca del delta del Níger.

El valor del gradiente geotérmico se calculó usando esta fórmula:

$$G = \frac{(Td - To)}{h}$$

Donde:

G: Es el gradiente geotérmico (°C/m; °C/100m).

Td: Es la Temperatura en la profundidad (°C).

To: Es la Temperatura (°C) también conocida como temperatura superficial promedio.

h: Es la profundidad de la medición (m).

- **Densidad de la roca.** La densidad es una propiedad fundamental de la roca y está fuertemente ligada a la porosidad y las propiedades sísmicas. Es la masa de una roca por unidad de volumen de la roca. La densidad  $\rho$  se expresa matemáticamente como:

$$\rho = m/V$$

Donde “m” es la masa de la roca en Kg y “V” es el volumen de la roca en m<sup>3</sup> (Okeifufe et al., 2020)

- **Capacidad calorífica de una roca.** La capacidad calorífica específica (J / kg ° C) se define como la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de una unidad de masa (1 kg) de una sustancia en 1 ° K. El conocimiento de la capacidad calorífica específica es de fundamental importancia en los cálculos geotérmicos. Este parámetro está relacionado con la conductividad térmica, “ $\gamma$ ” y la difusividad térmica, “k” por la ecuación:

$$k = \frac{\gamma}{C_p \rho}$$

Donde “ $\rho$ ” es densidad (Okeifufe et al., 2020)

**2.10.3 Estimación de energía geotérmica en el sitio.** Para calcular la cantidad de energía se utiliza la siguiente ecuación:

$$Q = PV_{C_p} \Delta t$$

**2.10.1.4 Pérdidas totales de calor asociadas a la explotación geotérmica.** En un sistema geotérmico, el calor generalmente se pierde tanto por conducción como por convección. La pérdida de calor por conducción se produce en la tubería o en la carcasa, según el tipo de terminación empleada.

- ***Pérdidas de calor en la tubería por conducción.*** La ecuación básica utilizada para calcular las pérdidas de calor por unidad de longitud de tubería:

$$QlS = \frac{1}{Rh} \left[ (Td - Ta)z - \frac{az^2}{2} \right]$$

$$Rh = \frac{1}{2\pi Ur}$$

La ecuación básica utilizada para calcular la pérdida de calor por unidad de longitud de tubería de revestimiento:

$$QlS = \frac{1}{Rh} \left[ (Td - Ta)z - \frac{az^2}{2} \right]$$

$$Rh = \frac{1 + \log \left( \frac{a \cdot t}{r^2} \right)}{2\pi Urk}$$

Las ecuaciones anteriores son utilizadas para calcular la pérdida de calor por conducción, se tuvo en cuenta la variación de la temperatura y la presión del vapor debido a la fricción, así como las pérdidas de calor por radiación y convección; “U” es el coeficiente general de transferencia de calor; "r" es el radio de la tubería o la carcasa, según sea el caso en metros; "a" es el gradiente geotérmico en °C/ m; "K" es la conductividad térmica de la tierra y “α” es la difusividad térmica de la tierra. “Rh” corresponde a la resistencia térmica específica (resistencia térmica por unidad de longitud de tubería) y “Td” es la temperatura global del fluido en la tubería en grados Celsius, “Ta” es la temperatura ambiente de la atmósfera en grados Celsius y Qls es la tasa de pérdida de calor de tubería en BTU/día.

Las tasas de pérdida de calor durante los períodos transitorios pueden ser mayores que en el estado estacionario. Los coeficientes de transferencia de calor se expresan en [BTU/(sqmeyer - día - ° C)] o [1.055Joules/(sqmeyer - día - ° C)], radios en pies, conductividades térmicas en [BTU / (meyer - día - ° C)] o [1055Joules / (meyer - día - ° C)] y  $\alpha$  en m<sup>2</sup>/día (Okeifufe et al., 2020).

**2.10.1.5 Estimación de la energía geotérmica recuperable.** La cantidad de energía geotérmica recuperable se calcula restando las pérdidas de calor en el pozo de la cantidad de calor en el lugar. Se puede mostrar matemáticamente según Okeifufe et al., (2020) como:

$$Q_{rec} = Q - Q_{ls}$$

### ***2.10.2 Métodos de estimación de recursos y su aplicabilidad***

De acuerdo a lo publicado en Geothermal Lexicon for Resources and Reserves Definition and Reporting (2008) donde se detalla que los proyectos geotérmicos tienen

diferentes etapas de desarrollo, y dependiendo de la etapa de desarrollo del proyecto se pueden utilizar diversos métodos que servirán para estimar los recursos y reservas geotérmicas. Estimar los recursos geotérmicos es importante para que el curso que tomen los proyectos de producción de energía geotérmica sea el correcto, se busca reducir la incertidumbre y dar una visión real de los procesos que se estarían llevando en sitio. Una variedad de métodos ha sido utilizada para evaluar la energía contenida en el yacimiento, así como también aquella que puede ser extraída, dentro de los métodos que se pueden utilizar para la estimación de recursos geotérmicos se tienen los siguientes:

- Estimación del flujo de calor natural que representa la energía sostenible disponible a largo plazo.
- Analogías basadas en otros yacimientos que se han producido durante un largo periodo.
- Suma de las producciones de los pozos existentes.
- Evaluación volumétrica del calor in situ y de la parte que puede extraerse.

Utilizar un método demasiado complejo en una fase temprana del proceso de exploración puede conducir a medidas con muy poca precisión. Es posible llevar a cabo una simulación numérica de un yacimiento antes de disponer de cualquier dato procedente de la perforación, pero esta puede acertar o no, por lo que suele tener poco valor para la definición de los recursos, incluso puede convertirse en engañosa, perjudicando la viabilidad de los proyectos (Parini y Riedel 2000). Se recomienda tener datos certeros de la zona a explotar para que así se logre una proyección adecuada de lo que pueden ofrecer los recursos geotérmicos, dentro

de los datos a tener en cuenta para una correcta evaluación de los recursos geotérmicos se destacan: el flujo de calor; el área del yacimiento y la temperatura de la zona de interés.

**2.10.2.1 Flujo de calor.** Es posible estimar la producción total de calor superficial de un sistema convectivo en la superficie, en unidades de MW térmicos (MWth), basándose en una combinación de estimaciones de flujos y temperaturas, así como de la emisión de calor del suelo, en algunos casos se pueden dar estimaciones del flujo de vapor fumarolas que se pueden presentar, según el tipo de yacimientos. Este último es el más difícil de estimar y supone una contribución sustancial al flujo de calor, lo que hace que en Geothermal Lexicon for Resources and Reserves Definition and Reporting (2008) se evidencia en algunos casos una baja precisión de las estimaciones.

Cabe resaltar que para una mayor precisión de la medida del flujo de calor se recomienda como comprobación cruzada, estimar el flujo químico total a través del sistema. Por ejemplo, algunos de los grandes sistemas geotérmicos de Nueva Zelanda están situados junto a grandes ríos o lagos, a los que drenan las características térmicas de la superficie, se puede medir el contenido de cloruro del río aguas arriba y aguas abajo de la zona termal, y el caudal del río, y así posiblemente estimar el flujo total de cloruro a través del sistema.

Para utilizar el flujo de calor para una estimación de recursos, el principio es tomar el flujo de calor natural mínimo del sistema, ya sea derivado de estimaciones físicas o del flujo de cloruro, y suponer que se trata de la producción de calor mínima absoluta que podría producirse a partir de los pozos, y luego aplicar una eficiencia de conversión a electricidad, se recomienda un 10% en ausencia de un concepto de proyecto definido. En la práctica, esta estimación suele ser poco realista. Algunos yacimientos tienen poca o ninguna expresión

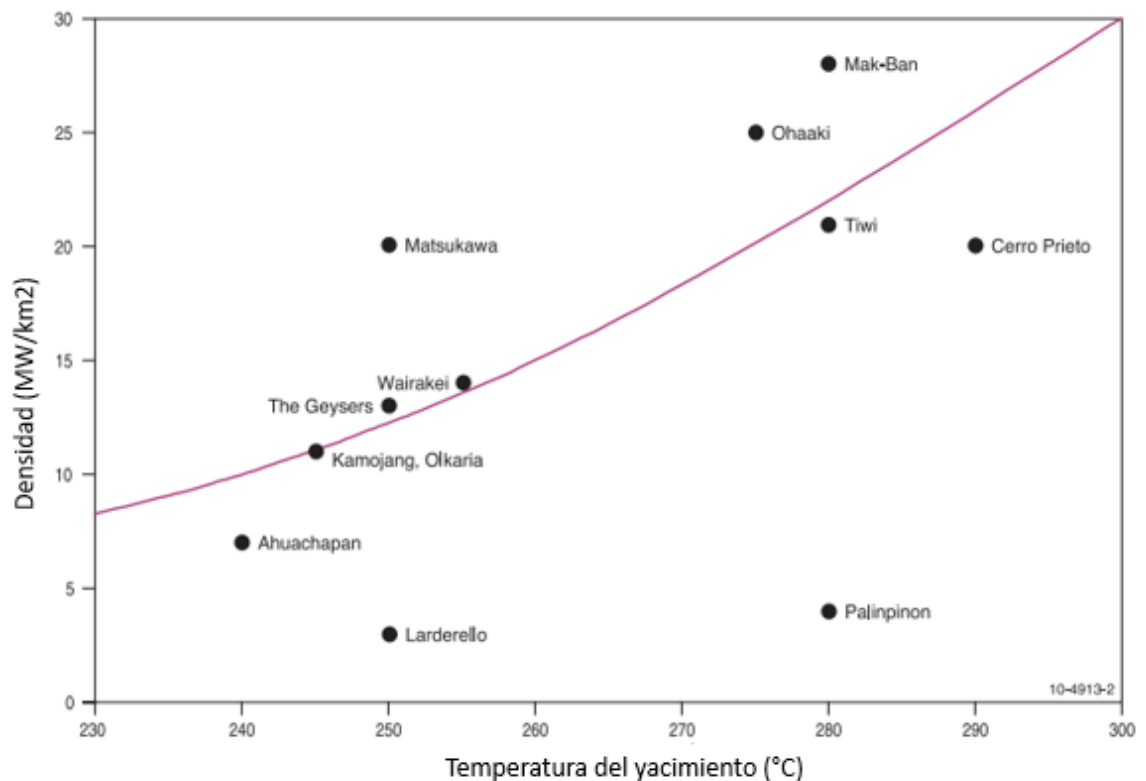
superficial, como es el caso de Desert Peak en Nevada. Puede ser posible, basándose en la experiencia, desarrollar un factor que permita obtener una estimación más realista (Wisian et al., 2001). Pero en los yacimientos que tienen una actividad térmica muy escasa o importante, debería utilizarse un factor diferente. Sanyal y Sarmiento (2005) concluyeron que un rango de 5 a 25 veces el flujo de calor natural es apropiado en yacimientos no sedimentarios y un rango aún mayor para sistemas sedimentarios.

**2.10.2.2 Analogía areal.** Se trata de un método empírico basado en la experiencia de yacimientos anteriores, en los que se tenían inicialmente características similares, con lo cual se realiza una analogía dando un acercamiento a las realidades de los recursos. La estimación de la extensión del recurso se multiplica por un factor de densidad de potencia expresado en MWe/km<sup>2</sup>. Los factores de densidad de potencia son tomados en cuenta de acuerdo a información obtenida en otros campos geotérmicos de características similares. Al examinar las estimaciones anteriores o los proyectos existentes, es necesario distinguir entre la extracción del campo de perforación, que puede ser una parte bastante pequeña del sistema geotérmico, y la extracción del área total del campo, debido a que en análisis anteriores han utilizado cualquiera de las dos.

Se han expresado diversas opiniones sobre el nivel adecuado de densidad de potencia. Donaldson y Grant (1979) sugirieron que entre 10 y 11 MWe/km<sup>2</sup> era apropiado para yacimientos geotérmicos como los que se presentan en el complejo Wairakei, y basándose en el área total del campo, Allis (1981) corroboró dicha información y respaldó la utilización de este método, ya que se obtuvieron resultados que a medida que se avanzaba en el proyecto geotérmico se corroboraban. Así mismo McNitt (1978) afirmó que una media razonable para

los campos dominados por el agua es de 60 MWe/km<sup>2</sup>, basándose en la superficie del campo de perforación, por su parte Grant (1996) sugirió inicialmente 10 MWe/km<sup>2</sup> como media de las plantas de vapor flash y cuatro años más tarde sugirió que si se utilizaba una variedad más amplia de tecnología podría ser apropiado un rango de 8 a 30 MWe/km<sup>2</sup>. En la Figura 6 se observar una de las curvas ajustadas para correlacionar la temperatura de los yacimientos con un valor estimado de la densidad de potencia eléctrica que se podría tener. Comparando con otros yacimientos se muestra una considerable dispersión indicando que otros factores son importantes.

**Figura 6. Densidad de potencia de energía eléctrica para campos desarrollados, según Grant (2000), con la curva de mejor ajuste agregada.**



**Fuente:** Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee. (2008). Geothermal Lexicon For Resources and Reserves Definition and Reporting. *Geothermal Energy, August*, 1–105.

**2.10.2.3 Análisis de la curva de declive.** El método de análisis de la curva de declive se utiliza en una etapa avanzada de los proyectos geotérmicos, su objetivo es determinar cómo cambiará el caudal con el tiempo en un pozo concreto o en un conjunto dentro de un yacimiento. De acuerdo a lo publicado en Geothermal Lexicon for Resources and Reserves Definition and Reporting (2008), este método consiste en ajustar las curvas en las que se empiece a notar una disminución de la producción conocida, este ajuste se realiza por medio de una ecuación definida, para luego ser utilizada en la predicción de la producción futura; en los yacimientos geotérmicos, normalmente se supone que la disminución sigue tendencias de disminución "armónicas" o "exponenciales". Al tratarse de un método de ajuste de curvas, suele utilizarse como herramienta de evaluación durante la fase de producción. También puede utilizarse antes de la producción para ayudar a determinar los requisitos de los pozos de reposición para determinar las necesidades de los pozos de reposición para diversas condiciones de declive supuestas, pero su uso en etapas tempranas suele dificultarse debido a la falta de información.

Las ecuaciones por las cuales se logra modelar dicho método son las siguiente:

$$W = \frac{W_i}{1 + D_i \Delta t} \quad y \quad W = W_i * e^{-D \Delta t}$$

Donde:

W= Caudal en el momento  $\Delta t$

$W_i$ = Caudal inicial

$D_i$ = Tasa de disminución armónica inicial

$D$ = Tasa de disminución exponencial constante

**2.10.2.4 Métodos Volumétricos.** La estimación de los recursos volumétricos se utiliza comúnmente en las últimas etapas de la exploración geotérmica después de que se haya iniciado la perforación, aunque puede utilizarse antes si se dispone de buenas indicaciones de superficie y estudios geofísicos. Las estimaciones volumétricas del calor almacenado están bien establecidas en la industria geotérmica, por lo que se considera que la estimación volumétrica es el único de los métodos que se puede aplicar de forma consistente para la estimación de recursos en una fase temprana de conocimiento (Sanyal y Sarmiento, 2005).

Este método es aplicable tanto a los recursos convectivos como a los conductivos, aunque los factores de recuperación que deben aplicarse pueden ser muy diferentes en esas dos situaciones. En el caso de los sistemas convectivos naturales, los métodos volumétricos pueden subestimar los recursos porque normalmente no se tiene en cuenta la recarga.

La categorización de los recursos y reservas aplicados a los distintos sectores requerirá la selección adecuada de los parámetros para las estimaciones deterministas o probabilísticas de la energía disponible en cada zona. Esto también fomenta la creación de bandas en función de las variaciones conocidas de la calidad de los recursos, como la temperatura, ya que varía desde el centro hasta los márgenes de un recurso. A partir de varios

camino se puede llegar a la determinación de los recursos en función del volumen, algunos de ellos son:

- ***Modelos de simulación numérica.*** Los modelos de simulación numérica consisten básicamente en dividir el yacimiento en una serie de bloques, para posteriormente, calcular el comportamiento del sistema geotérmico a medida que el fluido fluye a través de los bloques en respuesta a gradientes de presión naturales o inducidos. Esta técnica es más sofisticada que los métodos descritos anteriormente, ya que es posible tener diferentes propiedades de las rocas y de los fluidos dentro del modelo, incluir la transferencia de calor y masa entre varias zonas del modelo, así como también el cambio de fase de agua a vapor y viceversa puede dar estimaciones mucho más reales. Los modelos más sofisticados también pueden incluir los efectos del gas y los sólidos disueltos en las propiedades termodinámicas y físicas del fluido.

Para resolver las ecuaciones requeridas, es necesario utilizar métodos numéricos e iterar hasta obtener una solución que se ajuste a las condiciones internas del modelo y a las condiciones de contorno. En la actualidad se dispone de una serie de códigos informáticos que pueden proporcionar los resultados necesarios, por ejemplo, TOUGH2, TETRAD y, para los sistemas monofásicos, pueden ser útiles los modelos modificados de aguas subterráneas de acuerdo a lo publicado en Geothermal Lexicon for Resources and Reserves Definition and Reporting (2008).

El valor y la confianza de los modelos de simulación numérica dan un salto importante en cuanto se inicia la producción a largo plazo y se dispone de datos sobre la

respuesta del yacimiento. Incluso seis meses de historia con una tasa de producción modesta pueden ser suficientes para calibrar el modelo numérico, de modo que pueda empezar a proporcionar estimaciones fiables del rendimiento a largo plazo en varios escenarios de desarrollo.

Para ello deben cumplirse dos condiciones:

A. El depósito tiene que estar sometido a una tensión suficiente para provocar una respuesta medible. Si la primera etapa de desarrollo es tan pequeña que no causa efectos detectables en el yacimiento, entonces es razonable predecir que el mismo nivel de producción puede mantenerse durante un largo periodo de tiempo, pero no ayuda mucho a calibrar el modelo para predecir los efectos de un mayor nivel de desarrollo. Este fue un problema importante con el proyecto Ngawha en Nueva Zelanda (Lawless et al., 2006).

B. Debe haber suficientes datos de alta calidad procedentes de la monitorización para comprender los procesos del yacimiento.

- *Evaluación probabilística de recursos y reservas.* Los métodos probabilísticos proporcionan un enfoque estructurado que tiene en cuenta tanto la incertidumbre de cada uno de los parámetros que afectan a las reservas del desarrollo individual como la producción. Los métodos probabilísticos ayudan a garantizar que las cantidades cotizadas sean adecuadas en relación con los requisitos de certeza. Hay que tener en cuenta que los modelos probabilísticos están diseñados para modelar la variabilidad de los

parámetros, pero no representan la totalidad de la construcción (puede haber una característica que no se reconozca y, por tanto, no esté representada).

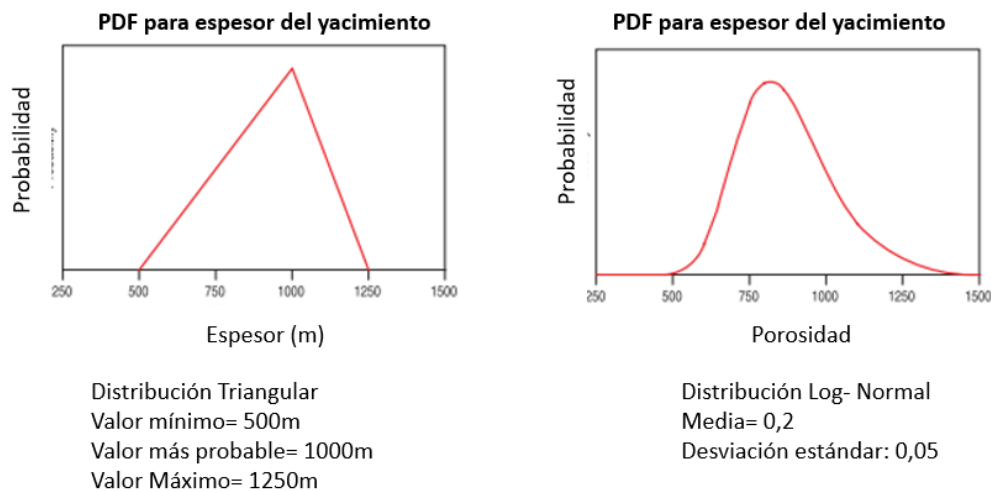
El método del calor almacenado se adapta bien a un enfoque probabilístico, debido a que es un método básico el cual utiliza un enfoque "determinista" para la estimación de los recursos y las reservas, lo que significa que a cada variable se le asigna un valor fijo. En la práctica, tiene más sentido permitir que las variables varíen en un rango definido, y la probabilidad de cualquier valor particular se determina a partir de una distribución adecuadamente definida (Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee, 2008).

La base de la técnica de "Simulación de Montecarlo", Sarmiento y Steingrímsson (2007) ofrecen un buen resumen de la aplicación del método a las evaluaciones del calor geotérmico almacenado. Mediante esta técnica, primero se genera un número aleatorio y luego se utiliza con la distribución de probabilidad definida para determinar los valores de las variables. Se calcula el calor almacenado utilizando los valores generados, este proceso se repite hasta que se puede generar una distribución de probabilidad bien definida para el calor almacenado, la energía recuperable o la potencia (MWe). En la práctica, suele ser necesario repetir los cálculos más de 2.000 veces para obtener resultados fiables y reproducibles (Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee, 2008)

Hay un gran número de posibles distribuciones de probabilidad que pueden utilizarse para describir cada una de las variables. Sin embargo, las distribuciones más populares son la triangular y la log-normal que se muestran en la Figura 7, este tipo de distribuciones pueden estar "sesgadas" en distintos grados. En la distribución triangular, se utilizan los valores

mínimo, más probable y máximo para definir la distribución. Por ejemplo, la temperatura del embalse puede describirse de este modo para que sea coherente con una distribución similar del área del embalse. En el caso de la distribución log-normal, es necesario definir la media y la desviación estándar.

**Figura 7. Ejemplo de distribución triangular y log normal.**



**Fuente:** Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee. (2008).

Geothermal Lexicon For Resources and Reserves Definition and Reporting. *Geothermal Energy, August*, 1–105.

- **Modelos volumétricos.** El principio del método del calor almacenado consiste en estimar el calor almacenado dentro del volumen del depósito definido, por encima de una cierta temperatura base basada en la tecnología de conversión de energía asumida, que debe ser indicada. La temperatura de base suele ser inferior a 100 °C (con la excepción de una turbina de vapor de condensación independiente, en la que la temperatura de base podría considerarse en

algunos casos igual a la temperatura del separador, normalmente 150 °C o más). También hay una temperatura de corte separada que se utiliza para seleccionar el volumen del yacimiento que se va a incluir, que en los yacimientos sin bombeo con flujo intermitente debería estar relacionada con el mínimo al que se autodescarga un pozo, Williams (2007) ha demostrado que pueden aplicarse temperaturas de corte mucho más bajas cuando el calor se barre desde los márgenes más fríos del yacimiento o la zona de inyección hacia el centro de alta temperatura del sistema. Esto es análogo a un intercambiador de calor de contracorriente en el que el calor puede transferirse de un medio a otro dejando la fuente más fría que la salida.

En situaciones de bombeo, incluido el HFR, la temperatura de corte estará relacionada con la temperatura de rechazo y de cualquier enfriamiento previsto del fluido antes de que llegue a la boca del pozo, aunque también pueden aplicarse algunos criterios económicos. Una vez más, la selección de esa temperatura debe estar justificada. El calor almacenado incluye tanto el calor almacenado en la roca como el calor almacenado en el fluido del yacimiento, aunque en casi todos los casos el calor almacenado en la roca dominará fuertemente incluso en yacimientos de alta porosidad naturalmente convectivos. El volumen del yacimiento suele tomarse como la extensión del área multiplicada por la profundidad de perforación más un cierto volumen de almacenamiento, normalmente otros 500 metros en los yacimientos convectivos, pero debe utilizarse una cifra menor en los yacimientos conductivos debido a la tasa de transferencia de calor mucho más lenta (Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee, 2008)

La ecuación utilizada para calcular el calor almacenado es:

$$H_o = [(1 - \Phi) * \rho_r * C_r + \Phi * \rho_a * C_a] * (T_t - T_o) * S * e$$

$H_o$  = Calor almacenado en la formación (Julios)

$\Phi$  = Porosidad eficaz de la formación (adimensional)

$\rho_r$  = Densidad de la roca almacén  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$C_r$  = Capacidad calorífica de la formación  $\left[\frac{\text{Julios}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right]$

$\rho_a$  = Densidad del agua de formación  $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$C_a$  = Capacidad calorífica del agua de formación  $\left[\frac{\text{Julios}}{\text{Kg}^\circ\text{C}}\right]$

$T_t$  = Temperatura media del yacimiento [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_o$  = Temperatura media anual en superficie [ $^\circ\text{C}$ ]

$S$  = Superficie en planta del área considerada del almacén, por lo tanto, se refiere a la superficie efectiva de la parte de la formación geológica que puede considerarse almacén

$e$  = Espesor medio útil del almacén geotérmico. Si no se tienen datos concretos se utiliza el mayor espesor conocido de la formación geológica.

En 2008 la Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee mostró que, para estimar el tamaño posible de un desarrollo energético, es necesario aplicar algunos factores adicionales a la estimación del calor total recuperable. Estos incluyen:

Una eficiencia de conversión que tiene en cuenta la Temperatura Base para convertir el calor recuperado en electricidad.

Durante la vida económica de un proyecto geotérmico se puede utilizar el método volumétrico para dividir el contenido energético del paso anterior por el tiempo para obtener una producción media en MWth o MWe.

Factores de planta, que combinan tanto la disponibilidad como la capacidad de esta, permiten tener en cuenta las actividades de mantenimiento planificadas y/o los problemas imprevistos que provocan una parada y si la planta será de carga base o de seguimiento de carga. En la mayoría de las plantas geotérmicas existentes, estos factores oscilan entre el 90% y el 95%, pero en los proyectos que utilizan una tecnología novedosa o con requisitos de bombeo exigentes, el factor para el esquema en su conjunto probablemente debería ser inferior a eso. En el caso de los proyectos que emplean varios módulos, es probable que el factor se sitúe en el extremo superior del rango.

### ***2.10.3 Modelo de estimación geotérmica para pozo petrolero abandonado y reutilizado para obtención de energía geotérmica.***

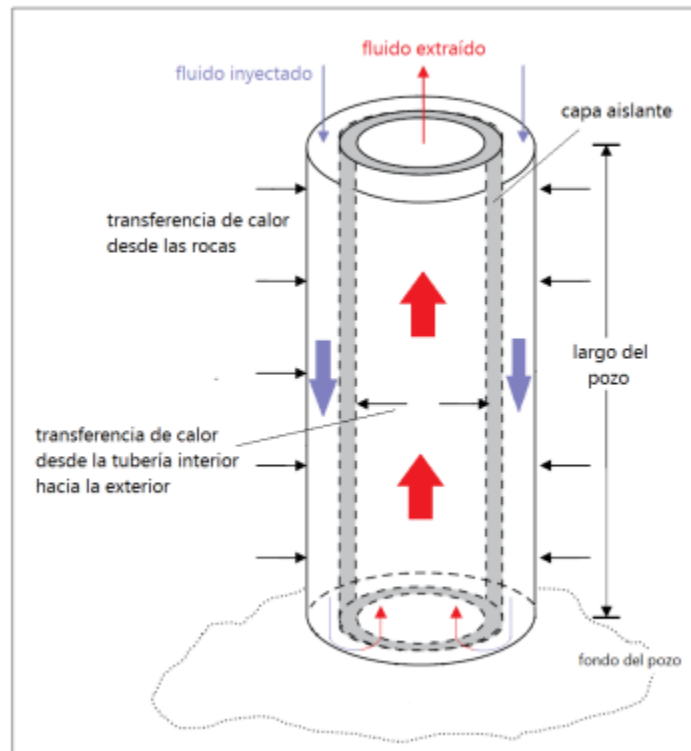
Los pozos petroleros abandonados son una buena oportunidad para la explotación de recursos geotérmicos, ya que en gran parte de su vida productora estos pudieron haber tenido fluidos con temperaturas aceptables para la producción de energía mediante el aprovechamiento del calor. La adaptación de un pozo de petróleo o gas abandonado en la gran mayoría de casos se lleva a cabo simulando un intercambiador de calor vertical, en

donde se procede a sellar el fondo del pozo y se aplica una cubierta aislante que mantenga al flujo descendente aislado del fluido ascendente.

El fluido circulante se inyecta por la tubería exterior (casing) y fluye hacia abajo, en donde se calentará gradualmente por acción de las formaciones circundantes, al llegar al fondo del pozo el fluido cambia su sentido y empieza a ascender a través de la tubería coaxial interior, dirigiéndose hacia la superficie. La extracción del calor por medio de este proceso impide la filtración hacia el interior del pozo de otros fluidos geotermales que podrían dañar las instalaciones producto de la precipitación mineral y corrosión. En este tipo de sistemas geotermales se debe mantener la temperatura del fluido extraído, el caudal de flujo se recomienda que sea menor que la utilizada en los sistemas geotermales convencionales. Esto debido al tamaño de las áreas de intercambio de calor entre las paredes del pozo y las formaciones adyacentes a ella (Urbina. 2020).

En la Figura 8 se muestra un esquema donde se evidencia la forma en la que se transmite el calor contenido en la formación a un fluido de trabajo utilizado durante el proceso de extracción de calor.

**Figura 8 Representación esquemática del intercambio de calor para un pozo petrolero o gasífero reutilizado para la obtención de energía geotérmica.**



**Fuente:** Urbina, R.(2020). Estimación Del Potencial Geotérmico De Pozos Profundos De Acuerdo Con La Demanda Energético-Térmica En Magallanes

**2.10.3.1 Propiedades del fluido a utilizar.** Teniendo en cuenta que el calor será transmitido a través del fluido que será inyectado, conocer las propiedades que serán determinantes en el proceso de transferencia de calor. A continuación, se describirán algunas de las propiedades de importancia.

- **Calor específico ( $C_p$ ).** El calor específico es definido como una cantidad física medible que se relaciona con la razón entre el calor extraído o agregado a un sistema y la variación de temperatura registrada.
- **Conductividad térmica ( $k$ ).** Se define como la capacidad que tienen los materiales de transmitir calor y puede variar con la temperatura. Mayor valor de conductividad térmica implica una mejor conducción de calor a través de un material, por lo que los materiales con una mayor conductividad térmica son más recomendados para los procesos de extracción geotérmica. La conductividad térmica en el proceso de transferencia de calor que se lleva a cabo en este tipo de extracción influye en la conducción de calor en dirección radial.
- **Número de Reynolds ( $Re$ ).** El número de Reynolds describe diferentes tipos de regímenes de flujo que ocurren en un medio fluido. En la aplicación de transferencia de calor, el régimen de flujo que se requiere debe ser turbulento, es decir,  $Re > 4000$ , esto según Røksland et al., 2017. En caso de que se presenten flujos laminares o de transición en los procesos de intercambio de calor hacia las secciones más internas del pozo, la transferencia de calor será deficiente, por lo que no sería atractivo en cuanto a la cantidad de calor que se puede recuperar. Se define en función de la velocidad promedio de flujo ( $u_m$ ) y el diámetro de la tubería

$$Re = \frac{\rho u_m D}{\mu}$$

- **El número de Prandtl.** Este número de Prandtl entrega un estimado de la razón entre la velocidad de difusión de la cantidad de movimiento y la velocidad de difusión de calor.

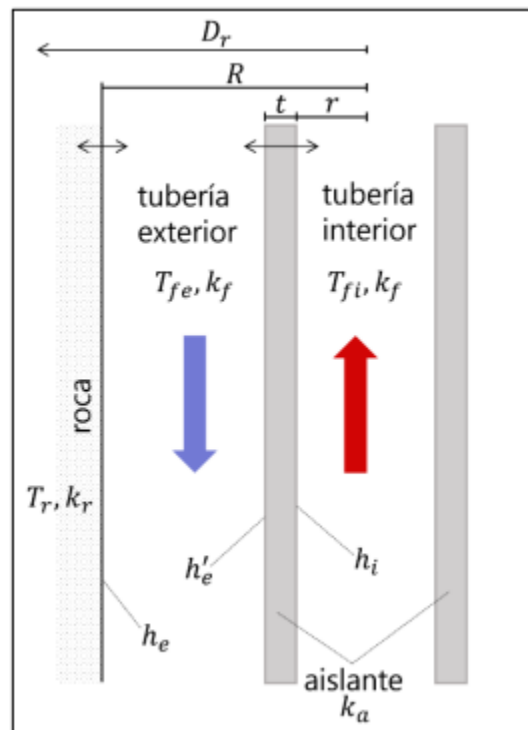
$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

**2.10.3.2 Modelo de transferencia de calor para pozos petroleros rehabilitados para la extracción de energía geotérmica.** Para estimar el potencial geotérmico de este tipo de pozos se realiza mediante el estudio de la cantidad de calor extraíble del pozo rehabilitado, así como de los límites de temperatura a la que se recupera el fluido al ingresar a la red de distribución que se le diseñe. Por lo cual se hace necesario el estudio de la transmisión de calor que ocurre entre la roca circundante y las tuberías concéntricas. Teniendo que la forma en la que el fluido capta el calor de la formación y lo lleva hacia la superficie, es necesario estudiar el proceso en dos partes, ya que existe un fenómeno de transferencia de calor entre la roca y el fluido que desciende por la tubería exterior del sistema intercambiador y el otro fenómeno que sucede se da entre la tubería interior y la exterior. Para poder calcular la temperatura con la que el fluido a utilizar es extraído en la tubería interior, se modela estos dos fenómenos que ocurren en el sistema (Urbina. 2020).

En la Figura 9 se puede apreciar el perfil esquemático de intercambio de calor de un pozo petrolífero reutilizado para la obtención de energía geotérmica, en donde se tienen en

cuenta los coeficientes de transferencia de calor, los radios de la tubería y casing, así como la conductividad térmica de la formación y del fluido.

**Figura 9 Perfil esquemático del intercambio de calor para un pozo petrolero o gasífero reutilizado para la obtención de energía geotérmica.**



**Fuente:** Urbina, R.(2020). Estimación Del Potencial Geotérmico De Pozos Profundos De Acuerdo Con La Demanda Energético-Térmica En Magallanes

- **Modelo de transferencia de calor para un fluido que desciende por una tubería en contacto con la formación.** El proceso de transferencia de calor desde la profundidad de interés hasta la superficie se da mediante la inyección de un fluido que viaja dentro de una tubería que se encuentra en contacto con formaciones a altas temperaturas (Urbina,2020). La tasa de transferencia de

calor entre la roca y el fluido utilizado para transportar el calor está dada por la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = 2\pi R \Delta Z (T_r - T_{fe}) U_{re} \quad [W]$$

Donde:

$\dot{Q}$ : Tasa de transferencia de calor entre la roca y fluido de trabajo [W]

R: Radio de la tubería exterior [m]

$\Delta Z$ : Distancia vertical del tramo a considerar [m]

$U_{re}$ : Coeficiente de transferencia de calor global entre la roca y la sección exterior [W/m<sup>2</sup> K]

$T_r$ : Temperatura de la roca [K]

$T_{fe}$ : Temperatura del fluido en la sección exterior del tramo considerado [K]

Para obtener mayor precisión en los cálculos o en su defecto obtener un valor real del coeficiente de transferencia de calor global entre la roca y la sección exterior, este se define en función de la resistencia térmica como:

$$U_{re} = \left( \frac{1}{h_e} + \frac{D_r}{k_r} \right)^{-1} \quad [W/m^2K]$$

Donde:

$U_{re}$ : Coeficiente de transferencia de calor global entre la roca y la sección exterior [W/m<sup>2</sup> \*K]

$h_e$ : Coeficiente de calor convectivo entre la roca y la pared externa de la sección exterior [W/m<sup>2</sup> \*K]

$D_r$ : Diámetro máximo en que la temperatura de la roca es afectada [m]

$k_r$ : Conductividad térmica de la roca [W/m\*K]

De igual manera el coeficiente de calor convectivo entre la roca y la pared externa puede ser calculado en función de la conductividad térmica del fluido y el diámetro hidráulico de la sección exterior, por medio de la siguiente ecuación:

$$h_e = 0.023k_f \frac{Re^{0.8}Pr^{0.4}}{D_{he}} \quad [W/m^2 * K]$$

Donde:

$h_e$ : Coeficiente de calor convectivo entre la roca y la pared externa de la sección exterior [W/m<sup>2</sup> \*K]

$k_f$ : Conductividad térmica del fluido de trabajo [W/m \*K]

Re: Número de Reynolds para la sección exterior

$D_{he}$ : Diámetro hidráulico de la sección exterior [m]

Pr: Número de Prandtl

A partir de las medidas de los radios de las tuberías y el espesor de la capa aislante, se puede calcular el diámetro hidráulico para la sección exterior y así mismo se puede obtener el área de la sección exterior.

$$D_{he} = 2(R - (r + t)) \text{ [m]}$$

Donde:

$D_{he}$ : Diámetro hidráulico de la sección exterior [m]

R: Radio entre la roca y la sección interior de la tubería [m]

r: Radio interior de la tubería [m]

t: Espesor de la capa aislante [m]

Para el cálculo del área de la sección exterior se emplea la siguiente ecuación

$$A_e = \pi(R^2 - (r + t)^2) \text{ [m}^2\text{]}$$

- ***Modelo de transferencia de calor para un fluido que asciende por una tubería en concéntrica a aquella que está en contacto con la roca.*** Cuando ya el fluido inyectado ha llegado a fondo, este se encuentra con un tapón y por la diferencia de presiones empieza a ascender hacia la superficie por dentro de la tubería interior, el proceso de transferencia de calor se define por medio una tasa de transferencia que se modela según la siguiente ecuación

$$\dot{Q} = 2\pi R \Delta Z (T_{fe} - T_{fi}) U_{ei} \text{ [W]}$$

Donde:

$\dot{Q}$ : Tasa de transferencia de calor entre el fluido que asciende y el que desciende [W]

$T_{fi}$ : Temperatura del fluido que asciende por la sección interior [K]

$T_{fe}$ : Temperatura del fluido en la sección exterior del tramo considerado [K]

R: Radio de la tubería exterior [m]

$\Delta Z$ : Distancia vertical del tramo a considerar [m]

$U_{ei}$ : Coeficiente de transferencia de calor global entre la tubería interior y la exterior  
[W/m<sup>2</sup> K]

Este coeficiente de transferencia de calor se puede calcular en relación al espesor de la capa aislante, la conductividad térmica del material utilizado para la capa aislante y los coeficientes de calor tanto el convectivo en la sección interior como en la pared interna de la sección exterior. La expresión que detalla el cálculo es la siguiente:

$$U_{ei} = \left( \frac{r+t}{r} * \frac{1}{h_i} + \frac{r+t}{t+\frac{t}{2}} * \frac{t}{k_a} + \frac{1}{h'_e} \right)^{-1} \quad [\text{W/m}^2 * \text{K}]$$

Donde:

$U_{ei}$ : Coeficiente de transferencia de calor global entre la tubería interior y la exterior  
[W/m<sup>2</sup> \*K]

r: Radio interior de la tubería [m]

t: Espesor de la capa aislante [m]

$h'_e$ : Coeficiente convectivo en la pared interna de la sección exterior [W/m<sup>2</sup> \*K]

$k_a$ : Conductividad térmica del material utilizado para la capa aislante [W/m \*K]

$h_i$ : Coeficiente convectivo en la sección interior [W/m<sup>2</sup> \*K]

Para el cálculo de los coeficiente convectivos utilizados en la ecuación anterior se puede obtener su valor de las siguientes ecuaciones en donde se tienen en cuenta el número de Reynolds y el número de Prandtl:

$$h_i = 0.023k_f \frac{Re^{0.8}Pr^{0.4}}{D_{hi}} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

$$h'_e = 0.023k_f \frac{Re^{0.8}Pr^{0.4}}{2(r+t)} \quad [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

Donde:

$h'_e$ : Coeficiente convectivo en la pared interna de la sección exterior  $[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$

$h_i$ : Coeficiente convectivo en la sección interior  $[\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$

$k_f$ : Conductividad térmica del fluido de trabajo  $[\text{W/m} \cdot \text{K}]$

$D_{hi}$ : Diámetro hidráulico de la sección interior  $[\text{m}]$

$r$ : Radio interior de la tubería  $[\text{m}]$

$t$ : Espesor de la capa aislante  $[\text{m}]$

$Re$ : Número de Reynolds

$Pr$ : Número de Prandtl

Así mismo se puede calcular el diámetro hidráulico y el área para la sección interior en función del radio de la tubería interna utilizando las siguientes ecuaciones

$$D_{hi} = 2r \quad [\text{m}]$$

$$A_i = \pi r^2 \quad [\text{m}^2]$$

A partir del cálculo de las tasas de transferencia de calor del fluido dentro de la tubería se puede expresar las tasas de transferencia de calor en función del aumento o disminución de la temperatura en el fluido portador, que según (Røksland et al., 2017) se define en función del caudal y el calor específico del fluido

$$\dot{Q} = \dot{m}C_p\Delta T \quad [\text{W}]$$

Donde:

$\dot{Q}$ : Tasa de transferencia de calor del fluido durante el proceso [W]

$\dot{m}$ : Flujo másico del fluido de trabajo [kg/s]

$C_p$ : Calor específico del fluido de trabajo [J/kg·K]

#### ***2.10.4 Clasificación de los métodos para la estimación de los recursos***

En Geothermal Lexicon for Resources and Reserves Definition and Reporting (2008) se menciona que siempre que sea posible, estos métodos se deben aplicar (y se debe probar su sensibilidad) teniendo en cuenta las clasificaciones de la categoría de Recursos tal como se define en el código. Idealmente, la industria debería continuar utilizando varios métodos en paralelo y compartiendo experiencias (a través de la publicación) mejorar la comprensión de cuándo es aplicable cada método y obtener control sobre cómo difieren en confiabilidad.

En esta sección se describen en términos generales las diversas formas en que se pueden cuantificar los recursos geotérmicos y se considera su aplicabilidad en las diferentes etapas del proceso de exploración. Eso se resume en la Tabla 5.

Tabla 5 Métodos de estimación de recursos y su aplicabilidad

	Aplicabilidad							
	Exploración temprana (antes de perforar)	Exploración	Delineación	Durante la perforación	Fase de expansión	Recursos	Reservas	
<b>Flujo de calor superficial</b>	Si, Pero poca confianza	Si, Pero poca confianza	En gran parte Redundante	Redundante	Redundante	Si, inferido al mínimo	No	
<b>Suma de salidas de los pozos existentes</b>	N/A	no, no indica directamente la capacidad de los recursos	no, no indica directamente la capacidad de los recursos	no, no indica directamente la capacidad de los recursos	no, no indica directamente la capacidad de los recursos	No, excepto para corto plazo	No	
<b>Analogía basada en el área</b>	Si, Pero poca confianza	Si, Pero poca confianza	En gran parte Redundante	Redundante	Redundante	Si, inferida, pero de baja confianza	No	
<b>Calor almacenado</b>	Si, Pero poca confianza	Si, Método preferido	Si	En gran parte redundante	En gran parte redundante	Si, inferido, probable o probado si está respaldado por la capacidad de entrega del pozo	Si, inferido, probable o probado si está respaldado por la capacidad de entrega del pozo	
<b>Modelo de parámetros agrupados</b>	Si, Pero poco recomendada	Si, Pero poco recomendada	Si	Si, en algunos casos	Si, en algunos casos	Si, inferido, probable o probado si está respaldado por la capacidad de entrega del pozo	Generalmente no	
<b>Análisis de curvas de declinación</b>	No	No	No	Si	Si	Si, inferido, probable o probado, pero no favorecido	Generalmente no	
<b>Modelos de simulación numérica</b>	Si, Pero poco recomendada	Si, Pero poco recomendada	Si, Pero poca confianza	Si, Método preferido	Si, Método preferido	Si, inferido, probable o probado	Si, inferido, probable o probado si está respaldado por la capacidad de entrega del pozo	

**Fuente:** Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee. (2008). Geothermal

Lexicon For Resources and Reserves Definition and Reporting. *Geothermal Energy, August*, 1–105.

### 2.11 Comparativa de los métodos para determinar los recursos

Los modelos con los que se puede calcular el potencial geotérmico se diferencian uno de otros, empleando operaciones necesarias para llegar a su resultado, en la Tabla 6 se puede evidenciar la diferencia que tienen entre los distintos métodos.

**Tabla 6 Variables utilizadas por cada método para calcular el potencial geotérmico**

Variables	Modelo Matemático	Estimación de flujo de calor natural	Análisis del declive	Modelo Probabilístico	Método Volumétrico
<b>Flujo de calor</b>	Revela los datos de flujo muestra su calidad	Se basa en una combinación de estimaciones de flujo y temperaturas de manantiales o fumarolas	~	~	~
<b>Conductividad Térmica</b>	Necesario para calcular la capacidad de conducir el calor	~	~	~	~
<b>Gradiente Geotérmico</b>	Necesario para calcular la temperatura a la profundidad medida	~	~	~	~
<b>Densidad de la roca</b>	Ligada a la porosidad y propiedades sísmicas	~	~	~	~
<b>Capacidad Calorífica de la roca</b>	Necesario para calcular la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura	~	~	~	~
	Necesario para calcular	~	~	~	~

<b>Perdidas de calor asociadas a la explotación</b>	el calor que se pierde mientras se produce				
<b>Analogía areal</b>	~	Se basa en curvas planteadas por yacimientos ya activos para calcular el potencial geotérmico	~	~	~
<b>Análisis de curvas</b>	~	~	Plantea un estudio de curvas de declive generadas a partir de la producción de campos antiguos	~	~
<b>Ajuste probabilístico</b>	~	~	~	Plantea un enfoque amplio al asignar valores mínimos y máximos a cada variable, que mediante una distribución probabilística se calcula el valor de la variable	~
<b>Propiedades y extensión del campo</b>	~	~	~	~	Se apega a las variables fundamentales, e implementando una ecuación es capaz de calcular el calor almacenado

Elaboración propia **Fuentes:** Elaboración propia fuentes: Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee. (2008), Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Vargas, C., & Briceño, L. A. (2009).

El uso de estos métodos aunque tengan el mismo fin, está ligado a la disponibilidad de la data o la facilidad de implementación del método, por lo que una vez categorizado el

yacimiento, se debe tener en cuenta el principio de uso de cada método, dicha información se encuentra resumida en la Tabla 7.

**Tabla 7 Descripción de los métodos para la estimación del potencial geotérmico**

<b>ESTIMACIÓN DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS</b>	
<b>Modelo Matemático</b>	Utiliza una combinación parámetros como el flujo de calor, la conductividad térmica, el gradiente geotérmico, la capacidad calorífica de la roca, las pérdidas de calor asociadas a la explotación, entre otras. Para calcular la energía almacenada y la recuperable.
<b>Estimación de flujo de calor natural</b>	Se utiliza para estimar el flujo de calor natural basándose en analogías hechas de otros yacimientos que han sido producidos durante un largo periodo de tiempo, es difícil utilizarlo en fases tempranas sin datos disponibles. Este método puede estimar la producción total de calor basándose en estimaciones de flujo y temperaturas tanto de manantiales como de fumarolas.
<b>Análisis del declive</b>	Estudia las curvas de declive generadas a partir de la producción de los campos antiguos, con el objetivo de encontrar como cambiará el caudal con el tiempo en un pozo en concreto.
<b>Modelo Probabilístico</b>	Proporciona un enfoque estructurado que tiene en cuenta incertidumbre en los parámetros y la producción del campo, estos ayudan a garantizar que las cantidades de energía calculadas sean las correctas. Tiene en cuenta valores mínimos y máximos para cada parámetro donde luego de generar un valor aleatorio y con la distribución probabilística se determina el valor de la variable.
<b>Método Volumétrico</b>	Se basa en estimar el calor almacenado dentro de un volumen del yacimiento definido, por lo que se requieren parámetros de áreas.

Elaboracion propia **Fuentes:** Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Committee.

(2008), Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Vargas, C., & Briceño, L. A. (2009), (Okeifufe et al., 2020).

### **2.12 Parametros que impactan la evaluacion del potencial geotermico**

La selección de las variables más influyentes en la evaluación del potencial geotérmico se realizó mediante la aplicación de algoritmos de selección multicriterio (AHP) y metodología MIC-MAC. A continuación, se presenta una lista de las posibles variables de mayor influencia, que fueron obtenidas previamente en la revisión bibliográfica.

**Variables:**

- a) **Temperatura de la zona**
- b) **Conductividad Térmica**
- c) **Capacidad Calorífica**
- d) **Profundidad**
- e) **Área del yacimiento**
- f) **Densidad de Potencia**
- g) **Flujo de calor**

**2.12.1 Método AHP**

El método AHP (Analytic Hierachy Process) introducido por Saaty en los sesenta ( Saaty,1997), consiste en una metodología matemática para estructurar, evaluar, sintetizar y con base a los resultados seleccionar las alternativas. Este algoritmo posee tres niveles o jerarquías; propósito, criterio y alternativas para resolver el problema.

**Propósito.** Seleccionar las variables de mayor influencia en la evaluación del comportamiento mecánico del cemento.

**Criterios.** Grados de importancia (input indispensable para desarrollar y aplicar el modelo de simulación) y grado de independencia (no existe posibilidad de obtener el valor de la variable a partir de otra).

**Alternativas.** Variables listadas con anterioridad.

Una vez definido los criterios y las alternativas, se realiza el análisis por pares, es decir, se comparan cada una de las alternativas frente a cada uno de los criterios de manera

biunívoca, de acuerdo con la escala numérica de comparación de Saaty, la cual se resume en la Tabla 8.

**Tabla 8 Escala Fundamental de Saaty**

Escala numérica	Escala verbal
1	Igualmente, importante
3	Moderadamente importante
5	Fuertemente Importante
7	Importancia muy fuerte o demostrada
9	Importancia extremadamente fuerte
2,4,6,8	intermedio de los valores

**Fuentes:** Adaptado de Saaty, 1990

La matriz de comparación, obtenidas al evaluar las alternativas para cada parámetro se presenta en la Tabla 9.

**Tabla 9 Matriz de comparación al evaluar las alternativas**

Matriz de comparación de criterios							
Criterios	a	b	c	d	e	f	g
a	1	3	3	1	9	5	1
b	1/3	1	1	3	7	3	1
c	1/3	1	1	3	5	3	1
d	1	1/3	1/3	1	5	3	1
e	1/9	1/7	1/5	1/5	1	1/5	1/9
f	1/5	1/3	1/3	1/3	5	1	1/7
g	1	1	1	1	9	7	1

Dicha matriz fue normalizada para obtener el vector de prioridad de las alternativas, cuyos resultados se observan en la Tabla 10.

**Tabla 10 Matriz normalizada para evaluar las alternativas**

matriz normalizada								
Crterios	a	b	c	d	e	f	g	Vector prioridad
a	0,25	0,44	0,44	0,10	0,22	0,23	0,19	0,27
b	0,08	0,15	0,15	0,31	0,17	0,14	0,19	0,17
c	0,08	0,15	0,15	0,31	0,12	0,14	0,19	0,16
d	0,25	0,05	0,05	0,10	0,12	0,14	0,19	0,13
e	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02	0,01	0,02	0,02
f	0,05	0,05	0,05	0,03	0,12	0,05	0,03	0,05
g	0,25	0,15	0,15	0,10	0,22	0,32	0,19	0,20

Una vez obtenido el vector prioridad, se procedió a realizar un análisis de los datos obtenidos, determinando la razón de consistencia, la cual verifica que los resultados valorativos de las alternativas no tengan errores, para eso el valor del  $RC < 0.1$ , se considera aceptable la consistencia de la matriz de comparaciones. Esta se calcula de acuerdo a la siguiente ecuación.

$$c_I = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}; Al = \frac{1.98(n - 2)}{n}; RC = \frac{CI}{Al}$$

Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 11.

**Tabla 11 Análisis de datos obtenidos por medio de la razón de consistencia**

CI	0,1144928
RI	1,41428571
RC	0,08095451

De acuerdo con la Tabla 11, el RC para el criterio fue menor del 10% por lo tanto los resultados obtenidos pueden ser utilizados. Las variables de mayor impacto en la evaluación

del potencial de un yacimiento geotérmico son aquellas con un porcentaje de preferencia mayor al 10%.

### **2.12.2 Metodología MICMAC**

El algoritmo MICMAC (análisis de motricidad y dependencia) es una metodología que permite determinar las variables claves o fundamentales en las cuales se debe basar prioritariamente un estudio y la relación existente entre ellas (Cely,1999).

Con las variables definidas, se construye la matriz de análisis estructural o matriz MICMAC, de acuerdo con la motricidad y la dependencia entre variables, lo cual hace referencia al nivel de influencia y al nivel de subordinación de una variable sobre la otra, respectivamente, cuya relación puede ser directa, potencial o nula, de acuerdo al código establecido según Cely, 1999.La matriz construida se observa en la Tabla 12.

**Tabla 12 Código de relaciones directas**

Influencia	Directa	Nula	Potencial
Código	1	0	0

En la tabla 13 se detalla la matriz de relaciones directas, las cuales fueron resultado del análisis MICMAC

**Tabla 13 Matriz de relaciones directas**

	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>
<b>a</b>		1	0	0	0	1	1
<b>b</b>	1		0	0	0	1	1
<b>c</b>	1	1		0	0	1	0
<b>d</b>	1	0	0		0	1	1
<b>e</b>	1	0	0	0		1	1
<b>f</b>	0	0	0	0	0		0
<b>g</b>	1	0	0	0	1	1	

A partir la matriz anterior, se obtiene el porcentaje de motricidad y dependencia de cada variable, según las siguientes correlaciones:

$$\%M = \frac{IM}{SIM} * 100$$

$$\%D = \frac{ID}{SID} * 100$$

Donde: IM es el índice de motricidad (Filas), SIM es la sumatoria de los índices de motricidad, ID es el índice de dependencia (Columnas) y SID es la sumatoria de los índices de dependencia. El porcentaje de motricidad de las variables se representa en la Tabla 14.

**Tabla 14. Porcentaje de motricidad de las variables**

<b>Variable</b>	<b>a</b>	<b>b</b>	<b>c</b>	<b>d</b>	<b>e</b>	<b>f</b>	<b>g</b>	<b>SIM</b>
<b>IM</b>	3	3	3	3	3	0	3	18
<b>%M</b>	16,67%	16,67%	16,67%	16,67%	16,67%	0,00%	16,67%	100

Así mismo el porcentaje de dependencia de las variables se representa en la Tabla 15.

**Tabla 15 Porcentaje de dependencia de las variables**

Variable	a	b	c	d	e	f	g	SID
ID	5	2	0	0	1	6	4	18
%D	27,78%	11,11%	0,00%	0,00%	5,56%	33,33%	22,22%	100

Posteriormente se relaciona en un plano cartesiano el porcentaje de motricidad de cada variable con su correspondiente porcentaje de dependencia, el cual se evidencia en la Figura 10, el cual se encuentra dividido en 4 zonas según Cely, (1999).

**Zona de poder.** Pertenece las variables más importantes, ya que influyen sobre la mayoría y a la vez dependen poco de ellas (alta motricidad y baja dependencia).

**Zona de conflicto.** En esta zona se ubican las variables de gran influencia sobre las demás, pero a su vez son influidas por éstas (alta motricidad y dependencia), por lo que son también de gran importancia.

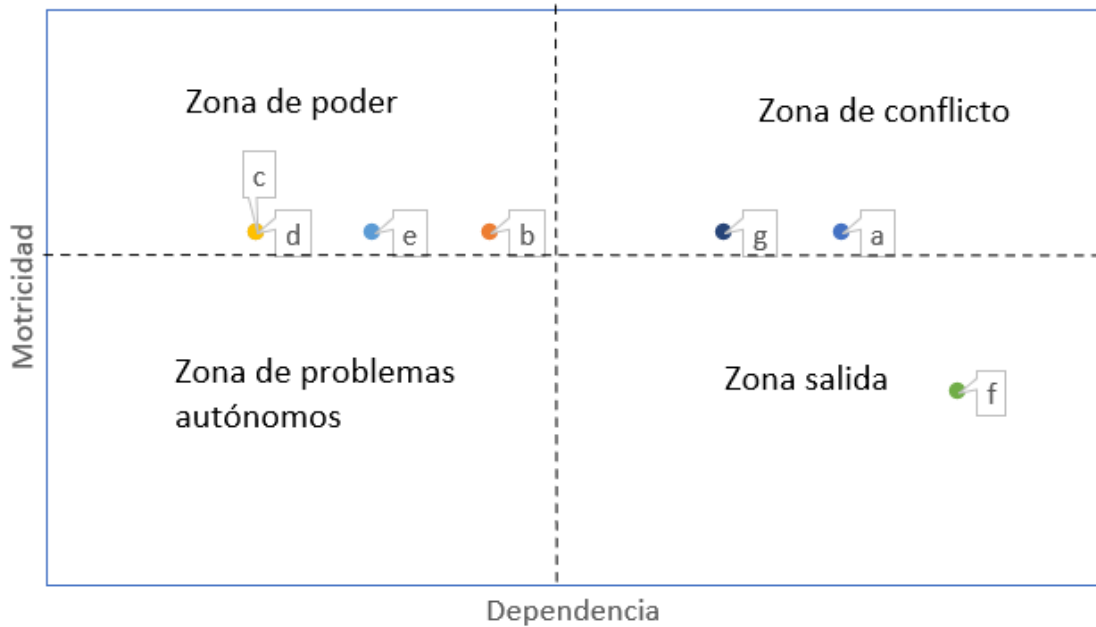
**Zona de problemas autónomos.** Esta zona ubica las variables sin importancia, ya que no influyen significativamente sobre el estudio (baja motricidad y dependencia).

**Zona de salida.** En esta zona se agrupan las variables sin influencia (baja motricidad y alta dependencia), por lo que no se tienen en cuenta como variables para el estudio.

El límite entre las zonas,  $m$ , se obtiene a través de la siguiente ecuación:

$$m = \frac{100}{n}$$

Donde  $n$  es el número de variables.

**Figura 10 Gráfico de relaciones directas**

Nota. Las variables clasificadas en la zona de salida no se consideran influyentes.

### 2.12.3 Parámetros influyentes según los métodos

De acuerdo con los métodos utilizados, se encontró que los parámetros más influyentes son el (a) y el (g), que se encuentran en la zona de conflicto, de igual forma los parámetros de la zona de poder, (c), (b) y (d) también tienen influencia sobre otros parámetros, pero a diferencia de los encontrados en la zona de conflicto estos se pueden ver influenciados en algunos escenarios. Los parámetros de la zona de conflicto corresponden a la temperatura de la zona y el flujo de calor respectivamente. Con dichos métodos se obtuvo el mismo resultado, resaltando así la importancia de estos parámetros que, si bien en su función teórica se tiene que, la temperatura de la zona es la que permite calentar las fuentes hídricas o la roca que es aprovechada para la generación de la energía eléctrica. Así mismo,

el flujo de calor es el encargado de alojar el flujo térmico y calentar las zonas, por lo que ese parámetro es fundamental para la generación de la energía geotérmica.

### **2.13 Tecnologías para la conversión de energía geotérmica a electricidad**

La energía geotérmica es la energía calórica que la tierra transmite desde sus capas más internas hacia las más externas, energía la cual está en forma de calor. Para que haya un mayor aprovechamiento de estos recursos geotérmicos en el sentido económico, se debe transformar la energía en forma de calor a energía eléctrica, teniendo en cuenta la variedad de los tipos de yacimientos geotérmicos con capacidades para la generación de energía eléctrica se han estudiado tecnologías capaces de transformar de una forma más eficiente el calor extraído de estos yacimientos. Los yacimientos geotérmicos con capacidad para generar suficiente calor y ser convertido a energía eléctrica suelen estar dominados por tres tipos de fluidos que a su vez representan tres tipos de recursos.

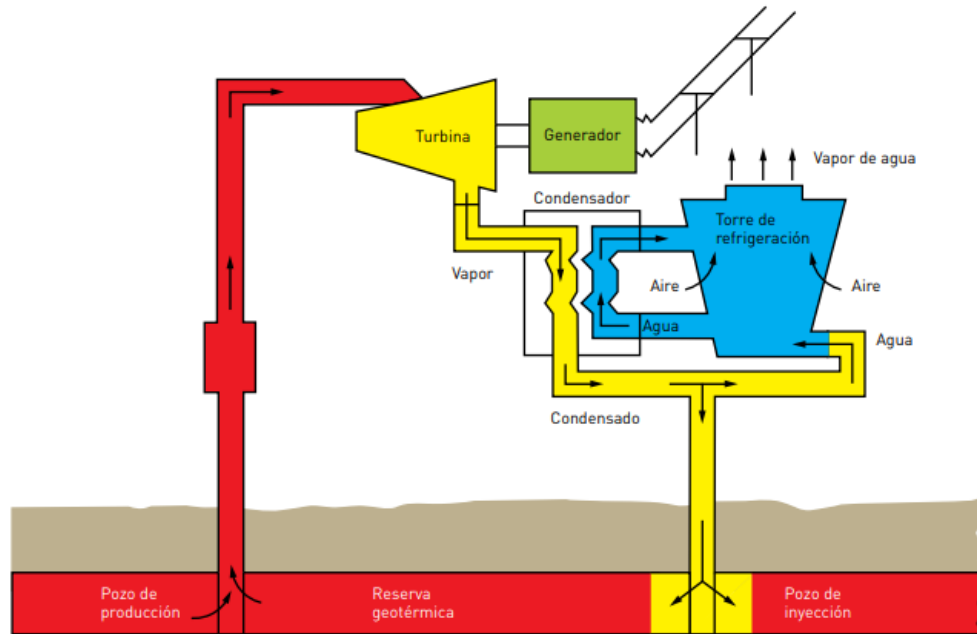
A continuación, se mencionarán las tecnologías más usadas a nivel mundial para la conversión de calor geotérmico a energía eléctrica.

#### **2.13.1 Plantas de vapor seco – Recursos de valor seco**

Los sistemas geotérmicos dominados por vapor, es decir, no hay o es muy escasa la fase líquida asociada al yacimiento, estos yacimientos son de alta temperatura y los poros de las rocas están más saturados por vapor que por agua líquida. Este tipo de sistemas no requieren la separación del vapor del agua, por lo que la energía que contienen es relativamente fácil de aprovechar, convirtiendo a este tipo de yacimientos en los más favorables para la producción de energía eléctrica, pero son los menos frecuentes (IDAE, 2011).

Las plantas de vapor seco son la tecnología de conversión de energía geotérmica a energía eléctrica más antiguas, su proceso se da debido a que el fluido que llega a la superficie es vapor en estado de saturación o ligeramente recalentado, que se dirige directamente a una turbina para producir electricidad. Por la forma en la que se da el proceso, siendo prácticamente de forma directa, los costes de producción de la planta resultan muy bajos, puesto que solo requieren vapor, un pozo para la inyección del condensado y un mínimo de dispositivos de limpieza de vapor, además se necesita de un colector para retirar sólidos de gran tamaño, un centrifugador para separar el condensado y las partículas sólidas de pequeño tamaño, puntos para el drenaje del condensado a lo largo de las tuberías y un filtro para eliminar las partículas pequeñas y sólidos disueltos.

En la Figura 11 se muestra el esquema de funcionamiento de una planta de conversión de energía calórica a energía eléctrica, teniendo como fluido de trabajo vapor seco, por lo que recibe ese mismo nombre.

**Figura 11** Esquema de funcionamiento de una planta de vapor seco

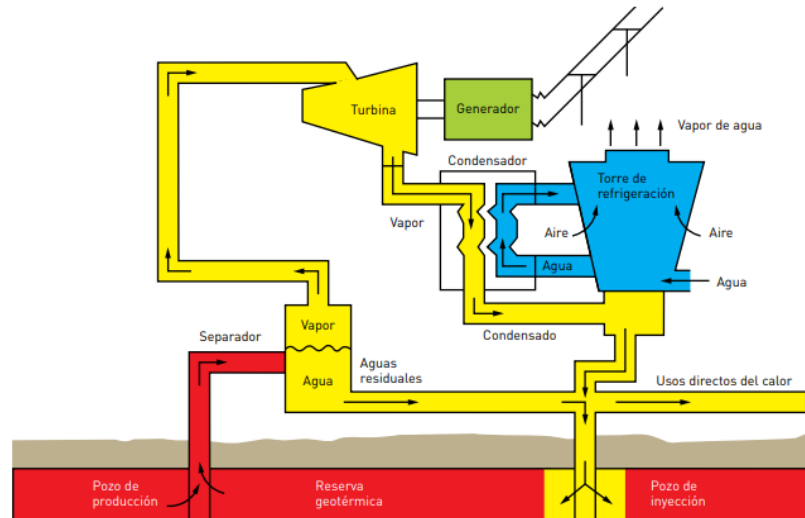
**Fuente:** KAGEL, A. The State of Geothermal Technology – Part II: Surface Technology. Geothermal Energy Association. January 2008

### 2.13.2 Plantas flash y Doble flash

Este tipo de tecnología son las más recomendadas para el aprovechamiento de los recursos geotérmicos de alta entalpía, que comúnmente consisten en un yacimiento dominado por una mezcla de vapor y salmuera. Los recursos se encuentran a temperaturas entre los 150 y 250 °C, por lo que el fluido que llega a la superficie es una mezcla de vapor-líquido, obligando a que sea necesario separar ambas fases. El fluido se conduce por unos separadores vapor/líquido, de allí una fracción de vapor resultante se envía a una turbina para producir electricidad, por su parte la fracción líquida se utiliza en otras aplicaciones como agricultura y procesos de calor industriales (IDAE, 2011).

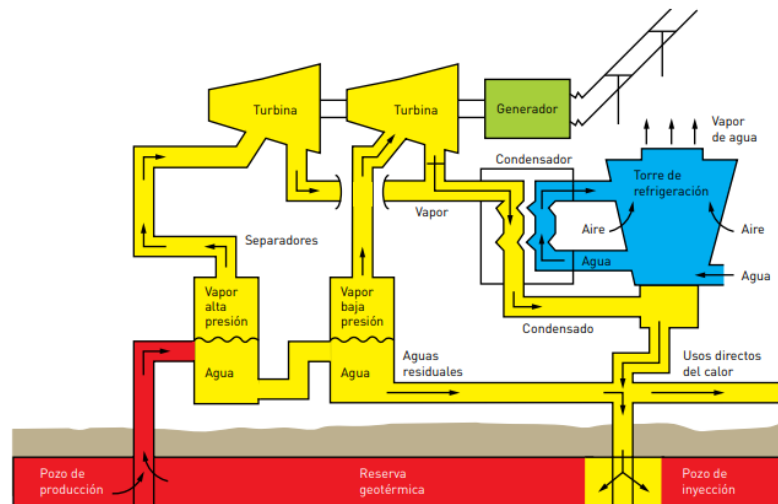
Este tipo de plantas cumplen con un ciclo que puede constar de una o varias etapas, que ya dependerá de la entalpía del agua separada. Los sistemas de vapor doble-flash suelen recircular la salmuera caliente por varios separadores que se encuentran sucesivos y cada vez a una menor presión. El vapor que se separa a bajas presiones es enviado a una turbina de baja presión, o en algunos casos a turbinas multietapas; el tratamiento del vapor es lo principal en este tipo de plantas, por lo cual los separadores utilizados tienen como objetivo aislar el vapor geotérmico antes de enviarlo a las turbinas. Los sistemas geotérmicos en donde la tecnología usada son las plantas flash necesitan instalar varias etapas de separación y limpieza, los dispositivos instalados son generalmente separadores que aíslen el vapor del líquido geotérmico, depósitos de goteo a lo largo de la línea de vapor y un filtro-separador de limpieza. Para una mayor eficiencia todas las plantas geotérmicas de este tipo necesitan un sistema de tuberías que dispondrán para el transporte de agua o vapor. Este sistema de tuberías permitirá que el ciclo de producción eléctrica y reinyección de salmuera aumente su rendimiento. En la Figura 12 se muestra el funcionamiento de una planta de conversión de energía calórica a energía eléctrica por medio del proceso flash, así mismo en la Figura 13 se muestra el funcionamiento a base del proceso doble flash.

**Figura 12** Esquema de funcionamiento de una planta flash



**Fuente:** KAGEL, A. The State of Geothermal Technology – Part II: Surface Technology. Geothermal Energy Association. January 2008

**Figura 13** Esquema de funcionamiento de una planta doble-flash

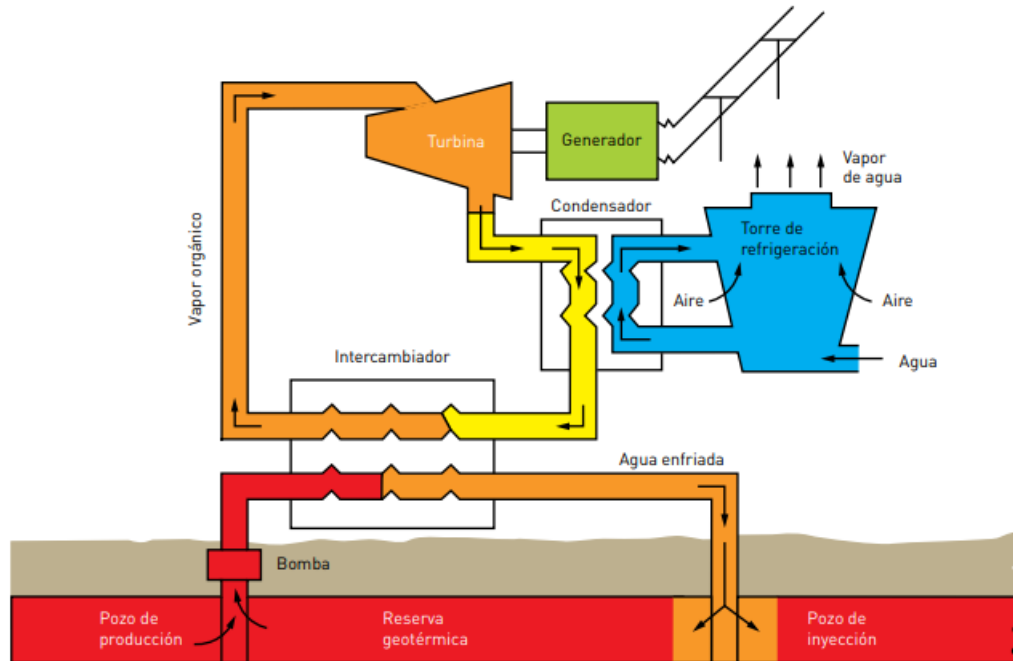


**Fuente:** KAGEL, A. The State of Geothermal Technology – Part II: Surface Technology. Geothermal Energy Association. January 2008

### 2.13.3 Plantas de ciclo binario

En yacimientos geotérmicos de media temperatura, entre 100 y 150°C, presentan recursos geotérmicos con alta salinidad, por lo que el uso de plantas de ciclo binario presenta una mayor eficiencia en comparación a las plantas flash. El proceso que se presenta en este tipo de plantas se fundamenta en la utilización de un fluido secundario con un buen comportamiento termodinámico, es decir, bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a altas temperaturas, se suele usar como fluido de trabajo mezclas de hidrocarburos altamente volátiles como el propano, n-butano, isobutano o isopentano. Este tipo de plantas han evolucionado de tal forma que puede ser rentable convertir recursos geotérmicos de 75°C a energía eléctrica, el proceso se desarrolla mediante un intercambiador de calor, el fluido termal que puede ser agua caliente, vapor o una mezcla de ambos; este se encargará de ceder calor al fluido secundario que posteriormente se calentará y se vaporizará. El vapor resultante acciona una turbina, luego se condensa para ser bombeado nuevamente al intercambiador donde nuevamente desarrollará el ciclo, el fluido secundario se encuentra en un circuito cerrado, lo que hace que el proceso reduzca su costo económico y ambiental, ya que se evita emitir gases a la atmósfera (IDAE, 2011).

En la Figura 14 se puede evidenciar el esquema de una planta de conversión de energía calórica a energía eléctrica en yacimientos de media entalpía, basando su proceso en la introducción de un fluido secundario.

**Figura 14** Esquema de funcionamiento de una planta de ciclo binario

**Fuente:** KAGEL, A. The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology. Geothermal Energy Association. January 2008

## 2.14 Desarrollo de herramienta informática el lenguaje de programación Python

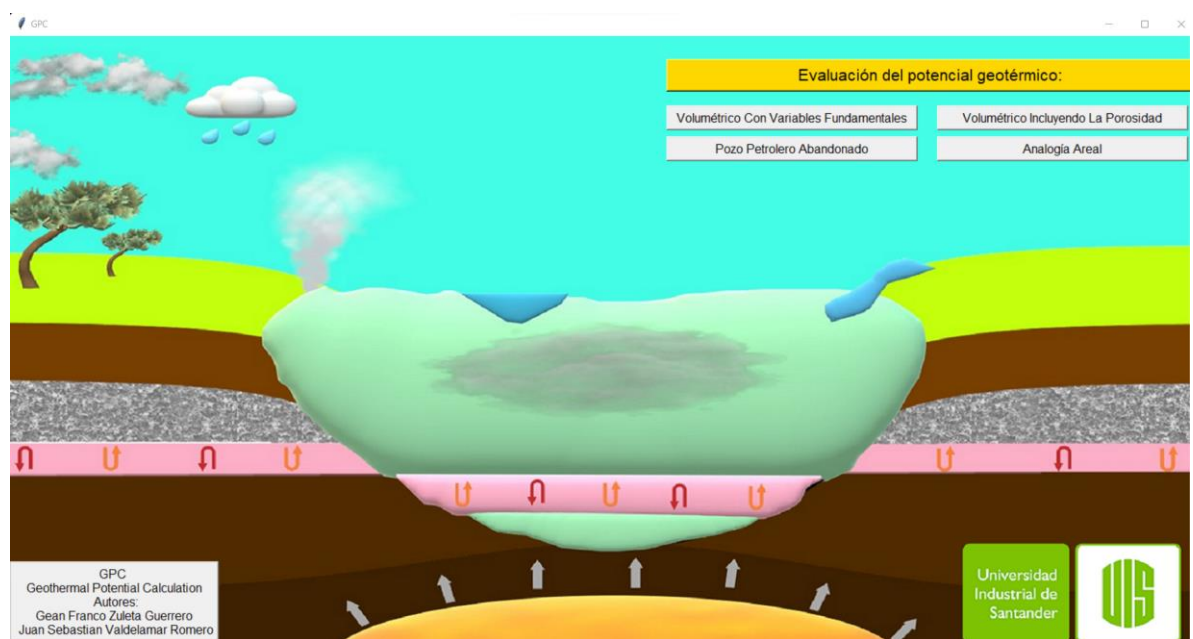
### 2.14.1 Manual técnico del software

GPC: Geothermal Potential Calculation es un software desarrollado en lenguaje de programación Python, como herramienta de aprendizaje para estudiantes de ingeniería de petróleos, cuya función principal es el cálculo del potencial geotérmico de un yacimiento, basándose en correlaciones encontradas en la literatura correspondiente a estudios y experiencia en el ámbito del desarrollo de proyectos geotérmicos. En este capítulo se describirán los aspectos técnicos básicos para que cualquier persona sea capaz de manejar el

programa sin inconvenientes. A continuación, se brindará información acerca de la funcionalidad técnica de la estructura, diseño y definición de la aplicación, así como las herramientas utilizadas para su desarrollo.

En la Figura 15 se puede observar la interfaz principal del software donde se muestran cuatro métodos de evaluación de los recursos geotérmicos.

**Figura 15 Interfaz gráfica del software Geothermal Potential Calculation (GPC)**



#### ***2.14.2 Herramientas utilizadas para el desarrollo de la herramienta informática***

Para el desarrollo del software se utilizó Python, el cual es un lenguaje de programación interpretado, que tiene como fin la legibilidad del código que puede llegar a ser multiparadigma el cual permite realizar múltiples tareas de forma sencilla e intuitiva. Python posee un entorno de desarrollo que integra un editor de texto para la edición del código.

### 2.14.3 Casos de uso de la Herramienta

La herramienta posee casos muy particulares para utilizarse los cuales son:

- I. Estimar la zona de entalpia a la cual pertenece el yacimiento.
- II. Estimar el potencial geotérmico de un yacimiento.
- III. Estimar la energía almacenada y recuperable en el yacimiento.
- IV. Estimar la densidad de potencia eléctrica de un yacimiento.

### 2.14.4 Modelos utilizados para calcular el potencial geotérmico mediante la herramienta

**2.14.4.1 Método volumétrico teniendo en cuenta variables fundamentales del yacimiento.** Este método tiene en cuenta variables fundamentales del yacimiento como lo son: Densidad de roca, Volumen de la roca, Calor específico, Temperatura de fondo y temperatura de corte. E implementa la ecuación:

$$Q = PV_{C_p} \Delta t$$

Así mismo, la herramienta es capaz de calcular el valor de dichas variables con las siguientes ecuaciones:

$$G = \frac{(Td - To)}{h}$$

$$\rho = m/v$$

$$k = \frac{\gamma}{C_p \rho}$$

El resultado obtenido se tendrá en unidades de Petajulios térmicos debido al gran valor de la energía almacenada.

En caso de no contar con alguno de los datos necesarios la herramienta es capaz de asumir alguno de estos valores teniendo en cuenta información experimental de proyectos geotérmicos que se encontraron en la literatura, posiblemente se tendrá un mayor grado de inexactitud debido a la variabilidad de los datos reales y los ideales. los valores que la herramienta puede asumir para este método se detallan en la Tabla 16, estos valores corresponden a las formaciones y características típicas de los yacimientos geotérmicos actualmente explotados donde el material rocoso que compone la columna arrojó valores promedios entre esos rangos.

**Tabla 16 Valores ideales de parámetros para calcular el potencial geotérmico utilizados por la herramienta en el método volumétrico con variables fundamentales del yacimiento.**

<b>Variable</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad de formación</b>	2600-2700 [kg/m <sup>3</sup> ]
<b>Calor Especifico</b>	825-1.080 [julios/kg°C]
<b>Gradiente de temperatura</b>	30 [°C/km]

**Fuente:** IDEA, Sanchez Guzman, J., Sanz Lopez, L., & Ocaña Robles, L. (2020).

Evaluación del potencial de energía geotérmica.

**2.14.4.2 Método volumétrico teniendo en cuenta la porosidad de la formación.** Este método consiste en estimar el calor almacenado dentro del volumen del depósito definido,

tanto en el yacimiento como en los fluidos que se encuentran por encima de una cierta temperatura base, basada en la tecnología de conversión de energía asumida. Con la que se utilizará la siguiente ecuación:

$$H_o = [(1 - \Phi) * \rho_r * C_r + \Phi * \rho_a * C_a] * (T_t - T_o) * S * e$$

En caso de no contar con alguno de los datos necesarios la herramienta es capaz de asumir estos valores teniendo en cuenta que se tendrá un mayor grado de inexactitud debido a la variabilidad de los datos reales y los ideales. Los valores que la herramienta puede asumir para este método se detallan en la Tabla 17, donde los valores correspondientes al fluido se recomiendan tomar los correspondiente al agua, ya que este es el fluido más utilizado en la extracción de los recursos geotérmicos, los valores correspondientes a la formación son los promedios que arrojaron las formaciones de yacimientos geotérmicos ya explotados.

**Tabla 17 Valores ideales de parámetros para calcular el potencial geotérmico utilizados por la herramienta en el método volumétrico con variables fundamentales del yacimiento.**

Variable	Valor
Densidad de formación	2600-2700 [kg/m <sup>3</sup> ]
Calor Especifico de la formación	825-1.080 [julios/kg°C]
Gradiente de temperatura	30 [°C/km]
Densidad de agua de formación	1000 [kg/m <sup>3</sup> ]

**Capacidad calorífica del** 4186 [julios/kg°C]  
**agua de formación**

**Fuente:** IDEA, Sanchez Guzman, J., Sanz Lopez, L., & Ocaña Robles, L. (2020).

Evaluación del potencial de energía geotérmica.

**2.14.4.3 Método volumétrico para pozos petroleros abandonados.** Este método consiste en la rehabilitación de pozos petroleros o gasíferos abandonados, se procede a ubicar un sello a la altura de la formación de interés, buscando simular un intercambiador de calor vertical, se aplica una cubierta aislante que mantenga al flujo descendente aislado del fluido ascendente.

El fluido circulante se inyecta por la tubería exterior (casing) y fluye hacia abajo, en donde se calentará gradualmente por acción de las formaciones circundantes, al llegar al fondo del pozo el fluido cambia su sentido y empieza a ascender a través de la tubería coaxial interior, dirigiéndose hacia la superficie. La extracción del calor por medio de este proceso impide la filtración hacia el interior del pozo de otros fluidos geotermales que podrían dañar las instalaciones producto de la precipitación mineral y corrosión.

**2.14.4.4 Método analogía areal mediante gráfica.** Este método depende de una gráfica la cual fue construida con la recopilación de varios campos importantes, la gráfica empleada en la realización del software se tomó de acuerdo con lo publicado en Geothermal Lexicon for Resources and Reserves Definition and Reporting. Hay que tener en cuenta que esta grafica puede no ajustarse a algunos yacimientos con propiedades diferentes por lo que el método puede no ser eficiente en zonas con poca exploración. En zonas con buen desarrollo

geotérmico es posible generar gráficas más confiables, teniendo resultados más acordes a las propiedades geológicas de cada zona.

El resultado obtenido estará ligado a el conocimiento del área del yacimiento y así saber su potencial de generación en Mwe.

En la Figura 16 se muestra la posible utilización de cada método dependiendo de la etapa en la cual se encuentre el proyecto de explotación de energía geotérmica, es necesario tener en cuenta la cantidad y calidad de los datos, ya que para cada método se requieren en algunos casos información distinta. Para el método areal la información necesaria es poca, que se puede recolectar en algunos casos sin necesidad de perforación del área, sin embargo, los métodos volumétricos requieren de más datos geológicos y de la formación, por su parte el método de estimación de los recursos geotérmicos de un pozo petrolero abandonado ya se cuenta con suficiente información geológica y viene siendo más relevante el fluido de trabajo y sus propiedades termodinámicas.

**Figura 16 Utilización de cada método según la etapa del proyecto geotérmico**

Método	Fase 1 - Identificación del área a explotar	Fase 2 - Exploración media (Inicio de perforaciones)	Fase 3 - Inicio de producción	Rehabilitación de pozos petroleros
Analogía Areal	■			
Volumétrico con Variables Fundamentales		■		
Volumétrico Incluyendo la Porosidad			■	
Pozo Petrolero Abandonado				■

**2.15 Validación del Software.**

La validación del Software GPC: Geothermal Potential Calculation se realizó para cuatro yacimientos, a los cuales se les encontró la correspondiente data necesaria para la aplicación de los modelos. El resultado obtenido fue validado con información de la literatura. Los métodos fueron evaluados con zonas o campos que poseen la data disponible y cumplen con los requisitos para la aplicación de las ecuaciones correspondientes. En la Tabla 18 se encuentra el método y la zona con la que fueron evaluados. En la figura 17 se puede observar el recorrido que ejecuta el programa una vez iniciado uno de los métodos elegidos para el cálculo del potencial.

**Figura 17 Diagrama de flujo para los modelos utilizados para el cálculo del potencial geotérmico**

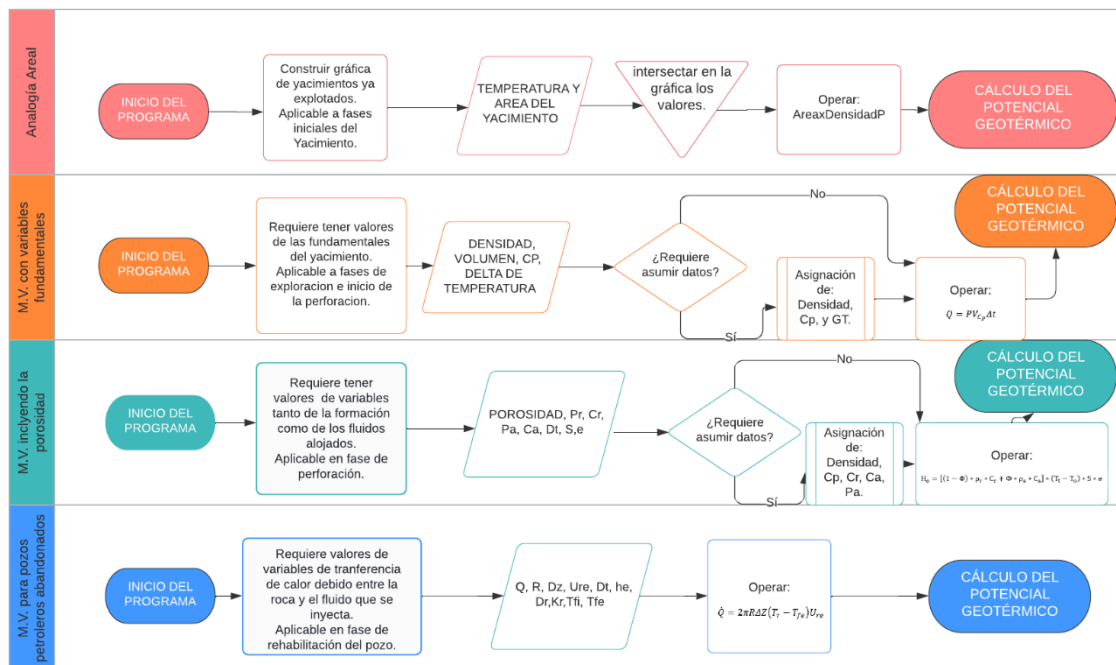


Tabla 18 Reporte de validación del software

Método de evaluación de potencial geotérmico	Zona Evaluada
Analogía areal	Campo Habanero
Volumétrico con variables fundamentales	Campo Habanero
Volumétrico incluyendo la porosidad	Fosa Ciudad Rodrigo
Volumétrico para pozos petroleros abandonados	Campo Chulengo 1

### 2.15.1 Validación método analogía areal

En la Tabla 22 se muestran los datos encontrados en la literatura correspondientes al campo Habanero, este campo cuenta con gran valor en su entalpía, lo que lo hace un buen prospecto para la utilización del método de analogía areal.

Tabla 19 Variables del campo Habanero

Variable	Valores de la literatura
Temperatura del yacimiento [°C]	243
Área del yacimiento [km <sup>2</sup> ]	4
Energía Potencial [PJ]	330

**Fuente:** Humphreys, B., Hodson-Clarke, A., & Hogarth, R. (2014). Habanero Geothermal Project Field Development Plan. October.

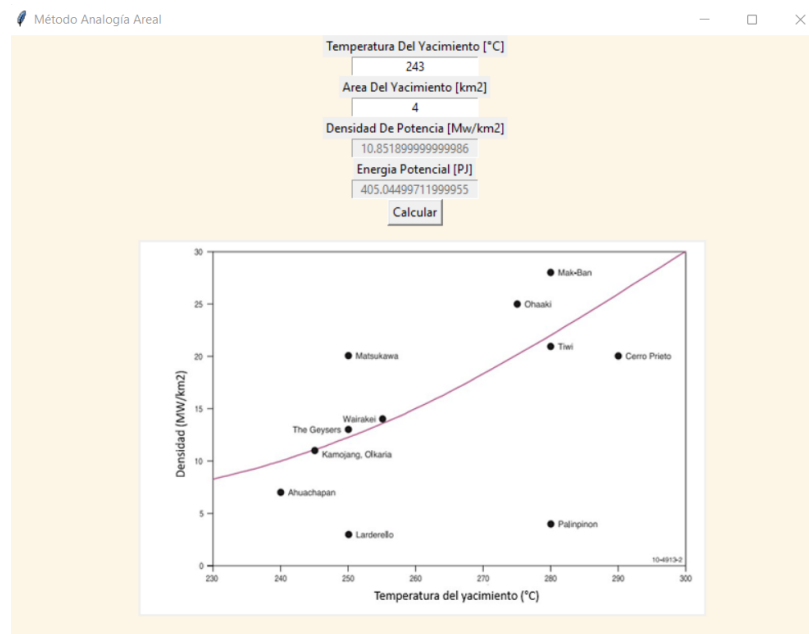
Con el valor de las variables, el software realiza el cálculo del potencial geotérmico, utilizando la ecuación que describe la gráfica obtenida por los datos graficados:

$$y=0.0021x^2-0.794x+79.791$$

Donde la variable X es la temperatura del yacimiento, y la variable Y es la densidad de potencia, la cual multiplicada por el área del yacimiento obtenemos el potencial geotérmico del mismo.

En la Figura 18 se muestra la interfaz del software GPC con los datos y resultados obtenidos en la estimación del potencial del campo Habanero, ese método no necesita una gran cantidad de datos, por lo que la calidad de estos es quienes direccionarán si los resultados son acordes a la realidad de la zona.

**Figura 18 Resultados obtenidos con el software GPC mediante el modelo analogía areal**



De acuerdo con lo calculado con el modelo, obtenemos un valor de 405.04 PJ como potencial geotérmico, el cual posee un error de 22.73%. Es necesario tener en cuenta que la curva utilizada para modelar el método se elaboró para yacimiento con temperaturas mayores a 230 °C, el campo Habanero cuenta con una temperatura dentro del rango, pero muy cercana al límite, por lo que la variación en esa zona de la gráfica es mayor.

### ***2.15.2 Validación método volumétrico con variables fundamentales Campo Habanero.***

A continuación, en la Tabla 19 se muestran los datos del campo Habanero, que fueron recolectados de la literatura y utilizados en la validación del método volumétrico con variables fundamentales, de igual forma se usaron las recomendaciones sugeridas por quienes modelaron este método, para así tener unos resultados más acordes a lo que se calculó en la realización del proyecto.

**Tabla 20 Variables del campo Habanero**

<b>Variables</b>	<b>Valor en la literatura</b>
<b>Densidad [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2700
<b>Volumen [km<sup>3</sup>]</b>	20
<b>Calor específico [j/kg°C]</b>	960
<b>Temperatura en Fondo [°C]</b>	243
<b>Temperatura en superficie [°C]</b>	180
<b>Calor almacenado [PJ]</b>	330

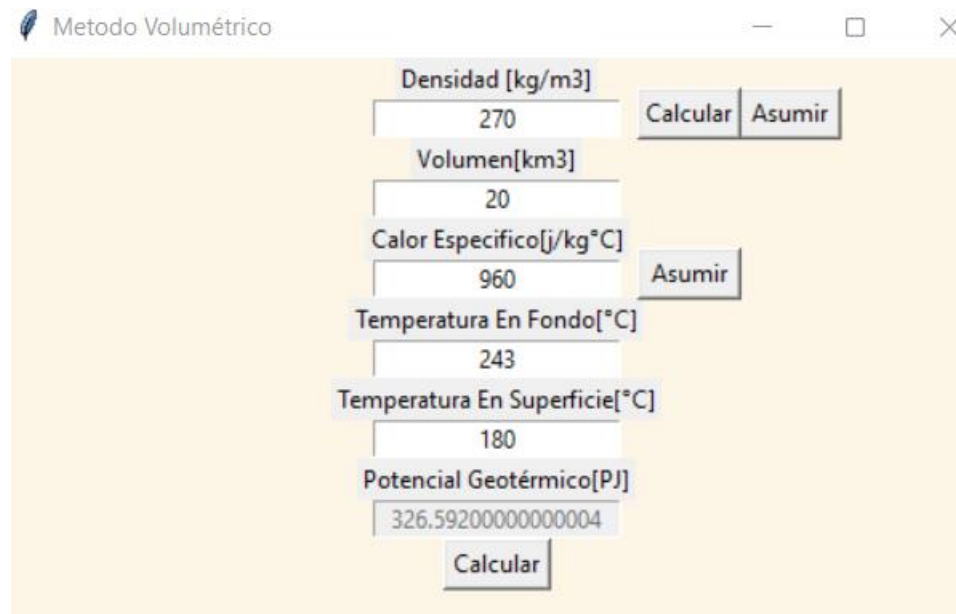
**Fuente:** Humphreys, B., Hodson-Clarke, A., & Hogarth, R. (2014). Habanero Geothermal Project Field Development Plan. October.

Con el valor de las variables, el software realiza el cálculo del potencial geotérmico aplicando la siguiente ecuación:

$$Q = PV_{C_p}\Delta t$$

En la Figura 19 se observa la interfaz correspondiente al método volumétrico con variables fundamentales, donde se puede comparar los resultados que se obtuvieron en el desarrollo del proyecto (tabla 19) y los calculados mediante la implementación del software diseñado.

**Figura 19 Resultados obtenidos con el software GPC mediante el modelo volumétrico con variables fundamentales.**



The screenshot shows a software window titled "Metodo Volumétrico" with a yellow background. It contains several input fields and buttons for calculating geothermal potential. The values are as follows:

Variable	Value	Action
Densidad [kg/m3]	270	Calcular, Asumir
Volumen[km3]	20	
Calor Especifico[j/kg°C]	960	Asumir
Temperatura En Fondo[°C]	243	
Temperatura En Superficie[°C]	180	
Potencial Geotérmico[PJ]	326.59200000000004	Calcular

De acuerdo con lo calculado con el modelo, obtenemos un valor de 326,59 PJ como potencial geotérmico, el cual posee un error de 1,03% en cuanto a los obtenidos en el proyecto Habanero, encontrados en la literatura.

### ***2.15.3 Validación método volumétrico incluyendo la porosidad.***

En la Tabla 20 se muestran los datos recolectados en la literatura que corresponden a lo realizado en el estudio geotérmico que se realizó en la zona de la Fosa Ciudad Rodrigo, con dichos datos se estimaron los recursos geotérmicos mediante la utilización del software GPC.

**Tabla 21 Variables de la Fosa Ciudad Rodrigo**

<b>Variables</b>	<b>Valores en la literatura</b>
<b>Densidad de la roca [kg/m<sup>3</sup>]</b>	2700
<b>Calor específico de la roca [j/kg°C]</b>	900
<b>Densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>]</b>	1000
<b>Calor específico del agua [j/kg°C]</b>	4186
<b>Porosidad</b>	0.05
<b>Temperatura en superficie [°C]</b>	13
<b>Temperatura en fondo [°C]</b>	180
<b>Superficie efectiva de la formación [km]</b>	15000
<b>Espesor medio útil del almacén [km]</b>	0.5
<b>Potencial geotérmico [PJ]</b>	3153

**Fuente:** IDEA, Sanchez Guzman, J., Sanz Lopez, L., & Ocaña Robles, L. (2020).

Evaluación del potencial de energía geotérmica.

Con el valor de las variables, el software realiza el cálculo del potencial geotérmico aplicando la siguiente ecuación:

$$H_o = [(1 - \Phi) * \rho_r * C_r + \Phi * \rho_a * C_a] * (T_t - T_o) * S * e$$

En la Figura 18 se muestra la interfaz del software correspondiente al método volumétrico que incluye los valores de porosidad, se evidencian los datos tomados para el cálculo y el resultado obtenido.

**Figura 20 Resultados obtenidos con el software GPC mediante el modelo volumétrico incluyendo la porosidad**

The screenshot shows a software window titled "Metodo Volumétrico Incluyendo La porosidad". It contains a series of input fields and buttons for calculating the geothermal potential. The inputs are as follows:

Variable	Value	Action
Densidad de la Roca[kg/m3]	2700	Calcular / Asumir
Densidad del Agua[kg/m3]	1000	Calcular / Asumir
Porosidad	0.05	
Capacidad Calorífica del agua[j/kg°C]	4186	Asumir
Capacidad Calorífica de la formación[j/kg°C]	900	Asumir
Temperatura En Superficie[°C]	13	
Temperatura En Fondo[°C]	180	
Superficie Efectiva De La Formacion Geologica[km]	15000	
Espesor Medio Util del Almacén Geotérmico[km]	0.5	
Potencial Geotérmico[PJ]	3153.5445000000004	Calcular

De acuerdo con el modelo, el valor del potencial geotérmico es de 3153.544 PJ, el cual posee un 0.015% con respecto al valor teórico, este método obtuvo una gran exactitud con respecto a los datos de la estimación que se encontró en la literatura, es necesario tener en cuenta que, al ser un método utilizado en una etapa avanzada del proyecto, la calidad de los datos juega un papel fundamental para que todo esté más acorde a la realidad.

#### ***2.15.4 Validación método volumétrico para pozos petroleros abandonados***

En la tabla 21 se observan los datos encontrados en la literatura, en donde en el Campo Chulengo-1 se procede a una rehabilitación de pozos petrolíferos para aprovechar el calor que se encuentra en el subsuelo de esa zona.

**Tabla 22 Variables del campo Chulengo-1**

<b>Variable</b>	<b>Valores de la literatura</b>
<b>Coefficiente de transferencia de calor global [W/m<sup>2</sup>°C)</b>	4.21
<b>Temperatura de la roca [°C]</b>	112
<b>Temperatura del fluido [°C]</b>	76.1
<b>Distancia vertical del tramo [m]</b>	2822
<b>Radio de la tubería exterior [m]</b>	0.122
<b>Tasa de transferencia de calor [MW]</b>	0.33

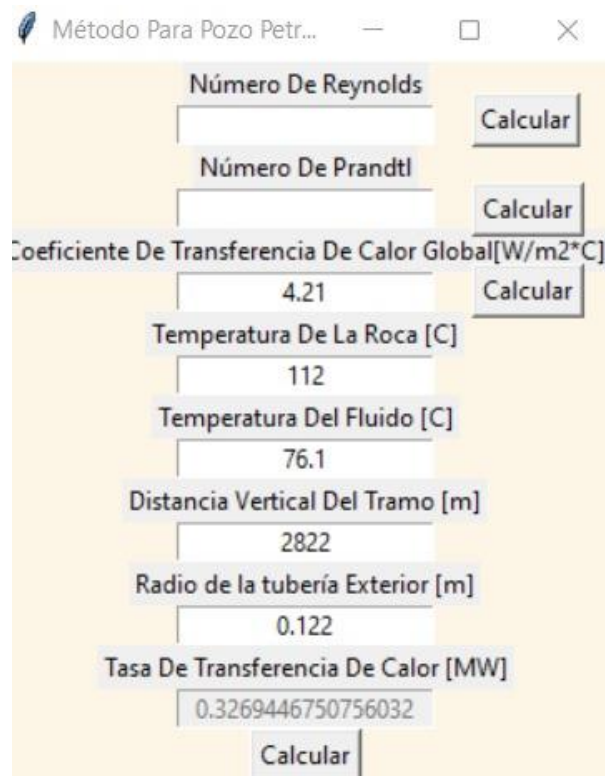
**Fuente:** Autoridad Nacional del Servicio Civil, Muñoz Morales, M., Rojas Galliani, L., & Daniele, L. (2021). ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL GEOTÉRMICO DE POZOS PROFUNDOS DE ACUERDO CON LA DEMANDA ENERGÉTICO-TÉRMICA EN MAGALLANES. *Angewandte Chemie International Edition*, 6(11), 951–952., 2013–2015.

Con el valor de las variables, el software realiza el cálculo del potencial geotérmico aplicando la siguiente ecuación:

$$\dot{Q} = 2\pi R\Delta Z(T_r - T_{fe})U_{re}$$

En la Figura 20 se muestra la interfaz del software GPC correspondiente al apartado del modelo para pozos abandonados, cabe resaltar que este tipo de iniciativas le brindan a la industria de los hidrocarburos una gran oportunidad de negocio o en algunos casos de reducción de costos, la que la energía recuperada de estos pozos se puede utilizar para la venta o para suplir las necesidades de la zona de pozos de producción.

**Figura 21 Resultados obtenidos con el software GPC mediante el modelo volumétrico para pozos petroleros abandonados**



Método Para Pozo Petr...

Número De Reynolds		Calcular
Número De Prandtl		Calcular
Coefficiente De Transferencia De Calor Global [W/m <sup>2</sup> *C]	4.21	Calcular
Temperatura De La Roca [C]	112	
Temperatura Del Fluido [C]	76.1	
Distancia Vertical Del Tramo [m]	2822	
Radio de la tubería Exterior [m]	0.122	
Tasa De Transferencia De Calor [MW]	0.3269446750756032	Calcular

De acuerdo con lo calculado con el modelo, se obtiene un valor de 0.3269 MW como potencial geotérmico, el cual comparado con lo encontrado en la literatura correspondiente al campo Chulengo-1 arroja un error de 1,21%.

### 3. Conclusiones

El cálculo del potencial geotérmico permite la estimación de la capacidad de producción de un yacimiento geotérmico, reduciendo el riesgo de inversión en este tipo de proyectos. Dicha evaluación debe realizarse teniendo en cuenta las cualidades del yacimiento, como lo es la región geotérmica, el tipo de yacimiento, la profundidad de los recursos entre otros, debido a que la calidad de los datos juega un papel primordial para que haya mayor exactitud en las estimaciones.

Se propone una línea de tiempo para saber cuándo usar los modelos para evaluar el potencial en yacimientos geotérmicos teniendo en cuenta la fase en la que este se encuentre (exploración, explotación y rehabilitación), y la experiencia de casos de estudio mostrados en la literatura. La correcta elección del método es fundamental para obtener un resultado que tenga una mayor veracidad. Una vez comparados los modelos se logra identificar que el modelo volumétrico con variables fundamentales es el que mayor aplicabilidad tiene debido a su versatilidad a la hora de calcular el potencial teniendo en cuenta la mayor cantidad de variables generales de un yacimiento disponible.

Según los cálculos realizados, mediante las metodologías AHP y MICMAC para la clasificación de las variables, se encuentra que concuerdan con las características más influyentes son la temperatura de la zona y el flujo de calor. También se encontró que las características pertenecientes a la zona de poder son la capacidad calorífica, conductividad térmica y profundidad.

El desarrollo de “GPC – Geothermal Potential Calculation”, permite estimar el potencial geotérmico de un yacimiento, para la validación de la herramienta se aplica el

método de analogía areal y volumétrico con variable fundamental para el campo Habanero obteniendo un porcentaje de error de 22,73% y 1,03% respectivamente, para la Fosa ciudad Rodrigo se aplica el método volumétrico incluyendo la porosidad obteniendo un 0,015% de error, y para el Campo chulengo 1 se aplica el método volumétrico para pozos petroleros abandonados obteniendo un error de 1,21% con respecto al valor teórico del potencial geotérmico.

El error obtenido en el modelo de analogía areal para el campo Habanero, se le asocia a la diferencia de las características entre los yacimientos graficados para la construcción del modelo y el campo original, que teniendo en cuenta que la disponibilidad de los datos es limitada para la construcción de una nueva gráfica.

#### **4. Recomendaciones**

Se recomienda tener en cuenta las propiedades de los yacimientos las cuales influyen en el modelo que se debe usar, teniendo en cuenta que para mayor exactitud se requiere cumplir con los requisitos de los métodos. Con todo esto se busca calcular de manera correcta el potencial geotérmico del yacimiento.

Realizar la búsqueda de datos para la construcción de la una gráfica caudal vs tiempo para obtener la tasa de disminución armónica inicial y la exponencial constante para la implementación del método de análisis de curvas de declive.

Agregar al software el método de evaluación probabilística de reservas, realizando un screening de información sobre campos con litología y propiedades similares.

Enfatizar en la aplicabilidad del programa con datos de campos colombianos con lo que no se tenga un porcentaje de incertidumbre grande, para estudiar la viabilidad de la energía geotérmica en regiones de media y baja entalpía en Colombia.

Estudiar posibles métodos para yacimientos de baja entalpía, donde se pueda tener en cuenta diferentes condiciones de repotenciación o reciclaje para obtener un mayor calor a la hora de extraer los fluidos.

## 5. Referencias

- Alfaro, C., Alvarado, I., Quintero, W., Vargas, C., & Briceño, L. A. (2009). *Mapa Preliminar De Gradientes Geotérmicos De Colombia Ministerio De Minas Y Energía Instituto Colombiano De Geología Y Minería Ingeominas Instituto Colombiano De Geología Y Minería Ingeominas Agencia Nacional De Hidrocarburos Proyecto Mapa Geotérmico De C.*
- Alimonti, C., Conti, P., & Soldo, E. (2021). *Producing geothermal energy with a deep borehole heat exchanger: Exergy optimization of different and preliminary design criteria. Energy, 220, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119679>*
- Anderson, T. C. (2013). *Geothermal potential of deep sedimentary basins in the United States. Unconventional Resources Technology Conference 2013, URTC 2013, Figure 2. <https://doi.org/10.1190/urtec2013-202>*
- Angel, M., Cristina, S., Farf, A., & Gonz, D. (2022). *Geothermics Assessment of the geothermal potential in the region of Avila (Spain): An. 98.*
- Ashari, M. R., Putra, Z. M. D. C. W., & Malindo, K. N. (2020). *Estimating geothermal reservoir characteristics by using Landsat 8 satellite imagery data: A case study in Mount Tangkuban Perahu area, West Java, Indonesia. SPWLA 25th Formation Evaluation Symposium of Japan, JFES 2019, 1-9.*
- Australian Geothermal Energy Group Geothermal Code Comittee. (2008). *Geothermal Lexicon For Resources and Reserves Definition and Reporting. Geothermal Energy, August, 1–105.*

- Baba, A., Uzelli, T., & Sozbilir, H. (2021). *Distribution of geothermal arsenic in relation to geothermal play types: A global review and case study from the Anatolian plate (Turkey)*. *Journal of Hazardous Materials*, 414(February), 125510. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125510>
- Brehme, M., Giese, R., Dokuz, U. E., & Bulut, F. (2021). *Fluid pathways identified beneath Narlı Lake (Central Anatolia) show the geothermal potential of former volcanoes*. *Scientific Reports*, 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87743-5>
- Córdova Zapata, L. F. (2007). *Diseño de una planta geotérmica de generación eléctrica 50 MW*. Lima.
- Elder, J. (1981). *Geothermal Systems*. Academic Press. London
- Endo, M., Gribenko, A., Sunwall, D., Zhdanov, M. S., Miura, T., Mochinaga, H., Aoki, N., & Mouri, T. (2019). *Integrated interpretation of multimodal geophysical data for exploration of geothermal resources - Case study: Yamagawa geothermal field in Japan*. 2018 SEG International Exposition and Annual Meeting, SEG 2018, 2322-2326. <https://doi.org/10.1190/segam2018-2997562.1>
- Feder, J. (2020). *Geothermal Digging Beneath the Surface*. *Journal of Petroleum Technology*, 10(2020), 30–34.
- Feder, J. (2021). *Geothermal Well Construction A Step Change in Oil and Gas Technologies*. *Journal of Petroleum Technology*, 1(2021), 32–35.
- IDAE, & IGME. (2008). *De Geotermia*. En *3C Tecnología\_Glosas de innovación aplicadas a la pyme* (Vol. 4, Número 3). <http://www.igme.es/Geotermia/Ficheros>

*PDF/Manual\_Geotermia\_2, 5.pdf*

*IDAE, Sanchez Guzman, J., Sanz Lopez, L., & Ocaña Robles, L. (2020). Evaluacion del potencial de energía geotérmica.*

*Jiang, S., & Zuo, Y. (2020). Present geothermal fields and geothermal resource in the Dongpu Depression. ARMA-CUPB Geothermal International Conference 2019.*

*Kent, T., Louie, J., & Echols, J. (2013). Correlating azimuthal anisotropy to geothermal resource potential using a 3D-3C seismic survey of Soda Lake geothermal field, Nevada. Society of Exploration Geophysicists International Exposition and 83rd Annual Meeting, SEG 2013: Expanding Geophysical Frontiers, 341-346. <https://doi.org/10.1190/segam2013-1398.1>*

*Kolker, A., Holdmann, G., Eichelberger, J., & Newberry, R. (2005). Geothermal potential of Alaska: An update. American Rock Mechanics Association - 40th US Rock Mechanics Symposium, ALASKA ROCKS 2005: Rock Mechanics for Energy, Mineral and Infrastructure Development in the Northern Regions.*

*Lebbihiat, N., Atia, A., Ar, M., & Meneceur, N. (2021). Geothermal energy use in Algeria: A review on the current status compared to the worldwide, utilization opportunities and countermeasures. 302. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126950>*

*Luís C. A. Gutiérrez - Negrin Geocónsul, S. A. de C. V; Morelia, Michoacán, 58170, México: "La energía geotérmica en México"*

*Mosquera, P. (2017, 16 octubre). Una planta energética de Islandia se convierte en la primera del mundo en tener «emisiones negativas». Energías Renovables, el*

- periodismo de las energías limpias. <https://www.energias-renovables.com/geotermica/una-geotermica-de-islandia-demuestra-que-es-20171016>*
- Ocampo DJ de D, Rojas BMR. Production problems review of Las Tres Vírgenes Geothermal Field, Mexico. GRC Trans. 2004; 28: 499-502.*
- Okamoto, K., Asanuma, H., & Nimiya, H. (2021). Fluid activity detection in geothermal areas using a single seismic station by monitoring horizontal-to-vertical spectral ratios. Scientific Reports, 11(1), 1-9. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86775-1>*
- Oort, E. Van, Chen, D., Ashok, P., & Fallah, A. (2021). SPE / IADC-204097-MS Constructing Deep Closed-Loop Geothermal Wells for Globally Scalable Energy Production by Leveraging Oil and Gas ERD and HPHT Well Construction Expertise.*
- Phi, T., Elgaddafi, R., Al Ramadan, M., Fahd, K., Ahmed, R., & Teodoriu, C. (2019). Well integrity issues: Extreme high-pressure high-temperature wells and geothermal wells a review. Society of Petroleum Engineers - SPE Thermal Well Integrity and Design Symposium 2019, TWID 2019. <https://doi.org/10.2118/198687-ms>*
- Potten, M., & Thuro, K. (2017). DEEP geothermal energy: A geomechanical view. ISRM Progressive Rock Failure Conference, PRF 2017, 2017-June (June), 10-11.*
- Reinecker, J., Gutmanis, J., Foxford, A., Cotton, L., Dalby, C., & Law, R. (2021). Geothermal exploration and reservoir modelling of the united downs deep geothermal project, Cornwall (UK). Geothermics, 97(April). <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102226>*

- Richter, A. (2022, 11 enero). *ThinkGeoEnergy's Top 10 Geothermal Countries 2021 – installed power generation capacity (MWe)*. *Think GeoEnergy - Geothermal Energy News*. <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2021-installed-power-generation-capacity-mwe/>
- Roca, J. (2016). *Las 10 mayores plantas geotérmicas del mundo*. *El periódico de la energía*. <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-mayores-plantas-geotermicas-del-mundo/>
- Santoso, R., Hoteit, H., & Vahrenkamp, V. (2019). *Optimization of energy recovery from geothermal reservoirs undergoing re-injection: Conceptual application in Saudi Arabia*. *SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference, MEOS, Proceedings, 2019-March 1-17*. <https://doi.org/10.2118/195155-ms>
- Sanyal, S. K., and Sarmiento, Z. F., 2007: *Booking Geothermal Energy Reserves*. Transaction, Geothermal Resources Council, 2005.
- Seal, K. E., Energy, G., & Zealand, N. (s. f.). *The Geothennal Potential of Indonesia <: It*.  
*Session, G. (1985). Philippine Geothennal Potential and National Strategi ~ for its Development*.
- Technologies, G. (2021). *Geothermal Well Construction*. January, 32-35.
- Tecnología y Recursos de la tierra, S.A.: José Sánchez Guzmán, Laura Sanz López, Luis Ocaña Robles: “*Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*”, (2011).
- Ullah, S. Z., & Bukhari, S. R. S. (2008). *Geothermal reservoirs: A renewable source of energy*

*and an extension of petroleum engineering. Society of Petroleum Engineers - SPE Gas Technology Symposium, 1, 420-429. <https://doi.org/10.2118/114718-ms>*

*Wisian, K.W., D.D. Blackwell, and M. Richards, 2001, Correlation of surface heat loss and total energy production for geothermal systems, Geothermal Resources Council, Transactions, v. 25.*

*Wright, P. M., Ward, S. H., Ross, H. P., & West, R. C. (1985). State-of-the-art geophysical exploration for geothermal resources. Geophysics, 50(12), 2666-2699. <https://doi.org/10.1190/1.1441889>*