

Tecnologías y configuraciones de completamiento de pozos usados en yacimientos geotérmicos

Gianfranco Anaya Durán y José Andrés Sánchez Bermúdez

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero de Petróleos

Director

Zuly Himelda Calderón Carrillo

Doctora en Ingeniería Química

Co -directores

Juan José Rondón López

Ingeniero de Petróleos

Alejandra Peña Mateus

Ingeniera de Petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2024

### **Dedicatoria**

A mi amada familia, pilares indestructibles que han sostenido mi camino hacia este logro académico, agradezco profundamente el amor incondicional, la sabiduría transmitida y la inspiración constante. A mis abuelos, tíos, primos y hermanos, su presencia ha sido mi fuerza y su apoyo mi motor. Cada conversación, cada gesto de aliento, ha fortalecido mi determinación y me ha recordado la importancia de perseverar en busca de mis sueños. Quiero dedicar un espacio especial a mi papá, cuyo ejemplo de tenacidad y sacrificio ha sido mi guía inquebrantable; a mi mamá, fuente inagotable de amor y sabiduría, y a mi hermana, compañera de sueños y confidente en los desafíos. Su amor y apoyo incondicional han sido el motor que me impulsa a superar obstáculos y alcanzar metas cada día.

A mis queridos amigos, los chichones, cómplices de risas y complicidades, cuya lealtad y cariño han enriquecido mi camino. Cada experiencia compartida, cada momento de camaradería, ha sido un regalo invaluable que atesoro con gratitud en mi corazón. A mis ángeles, Nina y Juanda, cuya ausencia física es llenada por el recuerdo de su amor eterno y su presencia espiritual. Su compañía y alegría han dejado una huella imborrable en mi vida, recordándome la importancia de valorar cada instante y de amar incondicionalmente. Agradezco de manera especial a la profesora Zuly, mi pilar académico, por su inquebrantable dedicación, su exigencia constructiva y su inspiración para alcanzar nuevas alturas intelectuales. Su mentoría y orientación han sido fundamentales en mi desarrollo académico y profesional, brindándome las herramientas y el conocimiento necesario para enfrentar desafíos y crecer como persona.

A cada persona que, con sus enseñanzas, consejos o simplemente con su presencia, ha contribuido a mi crecimiento personal y académico, mi más sincero agradecimiento. Cada interacción, cada experiencia compartida, ha dejado una huella imborrable en mi vida, ayudándome a ser quien soy hoy. Y a Dios, fuente de toda luz y fortaleza, reconozco Su guía en cada paso, Su amor en cada desafío y su gracia en cada logro. Esta tesis es el fruto del amor, el esfuerzo y la fe de todos ustedes. ¡Gracias por ser parte de mi historia y por inspirar mi futuro! Su legado vive en cada página de este trabajo, y su influencia perdurará en cada paso que dé en el camino de la vida.

*Gianfranco Anaya Durán*

A Dios, primeramente, fuente de sabiduría y guía constante, quien me ha dado salud y me ha iluminado cada paso a lo largo de toda esta travesía académica. A mi amada madre, Rosmery Bermúdez, cuyo amor incondicional y sacrificio han sido el motor de mi perseverancia, por todas esas noches de apoyo y paciencia que me tuviste. A mi querido abuelo José Emigdio Bermúdez, cuyo legado de tenacidad y sabiduría ha dejado una huella imborrable en mi corazón. Tu ejemplo de vida donde me enseñaste del trabajo arduo y esa dedicación que me ha inspirado a alcanzar mis metas.

A mi querida abuela Nubia Florez, quien ha sido la mujer que me ha brindado un apoyo incondicional, quien ha estado pendiente en cada momento de mí, tus palabras de aliento han sido refugio en las tempestades y tus ánimos y abrazos reconfortantes han sido mi sostén en los momentos de incertidumbre. A mi querido grupo de amigos, chichones, quienes han sido más que compañeros de estudio, han sido una segunda familia a lo largo de todo este trayecto académico a través de las noches de estudio interminables y las celebraciones por los éxitos alcanzados, su amistad ha sido un pilar fundamental y clave que ha hecho este viaje universitario inolvidable.

A la Universidad Industrial de Santander.

*José Andrés Sánchez Bermúdez*

### **Agradecimientos**

Primeramente, a Dios por permitirnos alcanzar este logro, por la salud, la sabiduría y paciencia que nos dio a lo largo de estos años de estudio y trabajo. A nuestras familias, por su amor incondicional, comprensión y sacrificio. Gracias por ser ese pilar fundamental en los momentos de incertidumbre y por brindarnos el apoyo necesario para alcanzar nuestras anheladas metas. A nuestra directora Zuly Calderón, por su liderazgo inspirador, su sabiduría académica y su dedicación incansable. Por esa orientación experta que ha sido fundamental en cada etapa de este proceso.

A nuestros codirectores, Alejandra Peña y Juan José Rondón, por su colaboración, sus valiosos aportes y su compromiso con el desarrollo de este proyecto. A nuestros compañeros de estudio, por su amistad, su apoyo mutuo y por compartir con nosotros esta emocionante travesía académica. A todos nuestros docentes que, a lo largo de estos años de estudio y dedicación, nos llenaron de experiencias y fueron guías en nuestro proceso de aprendizaje. A la Universidad Industrial de Santander, la escuela de Ingeniería de Petróleos, por darnos la oportunidad de crecer profesionalmente.

**Tabla de Contenido**

	<b>Pág.</b>
Introducción.....	15
1. Objetivos.....	18
1.1 Objetivo General .....	18
1.2 Objetivos Específicos .....	18
2. Marco Teórico.....	19
2.1 Energía Geotérmica .....	19
2.2 Gradiente Geotérmico .....	19
2.3 Sistemas hidrotermales convectivos.....	19
2.4 La máquina térmica de la Tierra .....	20
2.5 Sistemas geotérmicos .....	20
2.5.1 Clasificación de los sistemas Geotérmicos según su Entalpía.....	22
2.5.2 Clasificación de los sistemas Geotérmicos según su Geología .....	23
2.5.3 Sistemas geotérmicos mejorados. ....	24
2.6 Yacimiento geotérmico .....	27
2.7 Generación de Energía Eléctrica.....	27
2.8 Secciones del Completamiento de Pozos .....	29
2.9 Pozos geotérmicos.....	34
2.10 Perforación de un pozo geotérmico.....	36
2.10.1 Configuración del diseño de un pozo geotérmico .....	36
2.10.2 Lodos de perforación geotérmica.....	40
2.10.3 Tipos de perforación geotérmica .....	42

2.11 Equipos y tecnologías utilizados en el completamiento de pozos geotérmicos.....	42
3. Variables que influyen en la selección y diseño .....	46
3.1 Temperatura del yacimiento .....	50
3.2 Presión del yacimiento .....	50
3.3 Composición del fluido geotérmico .....	50
3.4 Propiedades petrofísicas del yacimiento.....	51
3.5 Sistema geotérmico y tipos de yacimientos.....	51
3.6 Factores ambientales y regulatorios .....	52
3.7 Costos y disponibilidad de equipos.....	52
3.8 Métodos de estimulación hidráulica.....	52
3.9 Integridad del pozo y cementación.....	52
4. Casos de estudio exitosos a nivel mundial .....	53
4.1 Completamiento de pozos geotérmicos en Laoling y Qingyan, China .....	53
4.1.1 Tecnología de completamiento de pozos con relleno de grava. ....	54
4.1.2 Configuración del completamiento .....	54
4.1.3 Experiencias prácticas del caso de estudio .....	55
4.2 Completamiento de pozos geotérmicos en Zhengzhou, China.....	56
4.2.1 Tecnología de completamiento con tubos PVC-U.....	56
4.2.2 Configuración de los pozos.....	56
4.2.3 Comprobación y manipulación de tuberías de PVC-U .....	57
4.3 Completamiento de pozos geotérmicos en California, USA .....	58
4.3.1 Tecnología de centralizadores cerámicos compuestos .....	58
4.3.2 Configuraciones de completamiento (desafíos de cementación).....	59

4.4 Completamiento para aplicaciones geotérmicas en el sur de Alemania.....	60
4.4.1 Tecnología de tuberías expandibles .....	61
4.4.2 Tecnología de cementación de alta integridad .....	61
4.4.3 Tecnología de completamiento multilateral .....	61
4.4.4 Configuración de los pozos aplicando el concepto mono-díámetro .....	62
4.5 Completamiento de pozos en Los Ángeles Campo Geotérmico Humeros, México.....	64
4.5.1 Técnicas de completamiento multilateral y sistemas de monitoreo continuo .....	65
4.5.2 Configuración de los diferentes pozos.....	65
4.5.3 Sistemas de control de flujo y factores a tener en consideración.....	67
4.6 Completamiento de pozos en Los Ángeles Campo Geotérmico Los Humeros, México .....	68
4.6.1 Tecnología de métodos de producción dual para el completamiento .....	68
4.6.2 Sistemas de separación de vapor.....	69
4.6.3 Desafíos de los completamientos de los pozos .....	69
4.7 Inspección de casing emergente en pozos geotérmicos .....	70
4.7.1 Tecnología de inspección y monitoreo de pozos .....	70
4.7.2 Herramientas de registro en alta temperatura .....	71
4.7.3 Configuraciones de completamiento .....	71
4.7.4 Integridad del cemento .....	71
4.8 Aislamiento multizona en pozos horizontales en un entorno geotérmico .....	72
4.8.1 Tecnología Plug and Perf.....	72
4.8.2 Tecnología Port and Packer .....	72
4.8.3 Desafíos específicos en el completamiento de pozos multizona .....	73
4.9 Completamiento de pozos en Austria, Alemania, Polonia y Hawai. ....	73

4.9.1 Tecnología de intercambiadores de calor de pozo (BHE).....	73
4.9.2 Diseño y configuración del sistema BHE.....	74
4.9.3 Características clave del completamiento con tecnología BHE.....	75
4.10 Completamiento de pozos geotérmicos en Nevada, USA.....	77
4.10.1 Tecnología de optimización de completamientos con fibra óptica.....	77
4.10.2 Componentes y configuraciones de la tecnología de fibra óptica.....	77
4.10.3 Aplicaciones específicas en el completamiento del pozo.....	78
5. Análisis comparativo de las tecnologías.....	82
5.1 Métodos de completamiento geotérmico.....	82
6. Diseño conceptual de completamiento.....	90
6.1 Área de Paipa.....	91
6.2 Modelo conceptual del sistema geotérmico de Paipa.....	93
6.3 Características del yacimiento geotérmico de Paipa.....	96
6.3.1 Ubicación del yacimiento.....	96
6.4 Selección de tecnologías para el completamiento.....	100
6.5 Diseño del estado mecánico.....	103
6.6 Consideraciones.....	115
7. Conclusiones.....	118
8. Recomendaciones.....	120
Referencias Bibliográficas.....	122

**Lista de Tablas**

	<b>Pág.</b>
Tabla 1. <i>Etapas, diámetros, profundidades y características comunes de un pozo</i> .....	35
Tabla 2. <i>Parámetros clave de terminación de pozos geotérmicos, de gas y de petróleo pesado</i> ..	40
Tabla 3. <i>Resumen de los casos de éxito a nivel mundial</i> .....	81
Tabla 4. <i>Tabla comparativa de los diferentes casos de estudio</i> .....	87
Tabla 5. <i>Composición cemento Portland Clase G</i> .....	107
Tabla 6. <i>Cantidad de adición de sílice recomendada</i> .....	108
Tabla 7. <i>Información general del diseño del pozo prospecto UISPaipa-1</i> .....	113

### Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Esquema de un campo geotérmico en ambiente volcánico</i> .....	22
Figura 2. <i>Diseño básico de un sistema geotérmico mejorado (EGS)</i> .....	25
Figura 3. <i>Esquema Conceptual de EGS</i> .....	26
Figura 4. <i>Crecimiento de la capacidad instalada de energía eléctrica producida a partir de energía geotérmica en diferentes países</i> .....	29
Figura 5. <i>Tipos de tubería de revestimiento o "Casings"</i> .....	30
Figura 6. <i>Esquema y configuración común de un pozo geotérmico</i> .....	36
Figura 7. <i>Búsqueda bibliográfica en Scopus</i> .....	47
Figura 8. <i>Exportación CVS</i> .....	47
Figura 9. <i>Entorno aplicativo VOSViewer</i> .....	48
Figura 10. <i>Selección de base de datos</i> .....	48
Figura 11. <i>Mapeo de concurrencias</i> .....	49
Figura 12. <i>Enfoque sobre sistemas geotérmicos</i> .....	49
Figura 13. <i>Estructura de pozo geotérmico con relleno de grava</i> .....	55
Figura 14. <i>Croquis del tubo de pozo de PVC-U</i> .....	58
Figura 15. <i>Centralizadores moldeados a medida en el casing</i> .....	59
Figura 16. <i>Moldes de plástico fijados en la tubería</i> .....	60
Figura 17. <i>Comparación del diseño estándar y mono diámetro para un pozo geotérmico sintético de 4.500 m de profundidad en el sur de Alemania</i> .....	64
Figura 18. <i>Cabeza de pozo H-43 abandonada en LHGF</i> .....	68

Figura 19. <i>El concepto de BHE</i> .....	74
Figura 20. <i>Monitorización del sistema de pozos geotérmicos horizontales</i> .....	80
Figura 21. <i>Mapa geológico y estructural del área geotérmica de Paipa</i> .....	92
Figura 22. <i>Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa</i> .....	95
Figura 23. <i>Sistema geotérmico de Paipa en 2D</i> .....	98
Figura 24. <i>Localización del área de estudio</i> .....	99
Figura 25. <i>Vista panorámica en 3D en Google Earth de la zona prospecto</i> .....	100
Figura 26. <i>Sistema de cabezal de pozo geotérmico compacto Cameron</i> .....	104
Figura 27. <i>Válvula de compuerta de doble expansión WKM Pow-R-Seal</i> .....	105
Figura 28. <i>Aleación 2507 Súper Dúplex</i> .....	106
Figura 29. <i>Sistema geotérmico de circuito cerrado con VIT</i> .....	109
Figura 30. <i>Tipos de configuración de la tecnología de circuito cerrado</i> .....	111
Figura 31. <i>Esquema de estado mecánico del pozo teórico UISPAIPA-1</i> .....	114

## Resumen

**Título:** Tecnologías y configuraciones de completamiento de pozos usados en yacimientos geotérmicos

**Autor:** Gianfranco Anaya Durán, José Andrés Sánchez Bermúdez

**Palabras Clave:** Yacimientos geotérmicos, completamiento de pozos, energía geotérmica.

**Descripción:** Los yacimientos geotérmicos son una fuente relevante de energía renovable y sostenible, los cuales entre sus beneficios permiten la generación de energía eléctrica y la calefacción mediante la extracción de calor del subsuelo. Este estudio se enfoca en la revisión y el análisis bibliográfico de las tecnologías y configuraciones utilizadas en el completamiento de pozos geotérmicos. Además, se determinan aquellas variables fundamentales que son tenidas en cuenta para el proceso de configuración y completamiento de los pozos, como lo son la temperatura, presión y composición del yacimiento, así como las características geológicas y petrofísicas. Se toman en consideración casos de estudio presentados por la comunidad académica y casos de éxito en diferentes condiciones, finalmente con base en esta información obtenida, se presenta un diseño teórico para el completamiento de un pozo teórico en Colombia. El proyecto emplea un método de investigación descriptiva para recopilar información sobre tecnologías y configuraciones en energía geotérmica, desarrollando cuatro fases. En la primera fase, se realiza una búsqueda bibliográfica que recopila documentos científicos sobre el tema, estableciendo variables clave para el diseño de pozos geotérmicos. La segunda fase se centra en la descripción de completamientos, donde se identifican configuraciones típicas en pozos geotérmicos de casos exitosos a nivel mundial, prestando especial atención a su proceso y diseño. En la tercera fase, se lleva a cabo un análisis comparativo, donde se examinan las tecnologías y configuraciones de completamiento de acuerdo con las características geológicas y los tipos de sistemas geotérmicos, creando una tabla de comparación. Finalmente, en la cuarta fase, se establecen configuraciones aplicables a Colombia para el diseño y completamiento de pozos geotérmicos, basados en los casos de éxito identificados.

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Ingeniería de Petróleos. Director: Zuly Himelda Calderón Carrillo. Doctora en Ingeniería Química. Codirector: Alejandra Peña Mateus. Ingeniera de Petróleos, Juan José Rondón López. Ingeniero de Petróleos.

### Abstract

**Title:** Well completion technologies and configurations used in geothermal reservoirs

**Author(s):** Gianfranco Anaya Durán, José Andrés Sánchez Bermúdez

**Key Words:** Geothermal reservoirs, well completion, geothermal energy

**Description:** Geothermal deposits are a relevant source of renewable and sustainable energy, which among their benefits allow the generation of electrical energy and heating by extracting heat from the subsoil. This study focuses on the literature review and analysis of the technologies and configurations used in the completion of geothermal wells. In addition, those fundamental variables that are taken into account for the well configuration and completion process are determined, such as the temperature, pressure and composition of the reservoir, as well as the geological and petrophysics characteristics. Case studies presented by the academic community and success cases in different conditions are taken into consideration. Finally, based on this information obtained, a theoretical design is presented for the completion of a theoretical well in Colombia. The project employs a descriptive research method to gather information on geothermal energy technologies and configurations in four phases. In the first phase, a bibliographic search is carried out to compile scientific documents on the subject, establishing key variables for the design of geothermal wells. The second phase focuses on the description of completions, where typical configurations in geothermal wells of successful cases worldwide are identified, paying special attention to their process and design. In the third phase, a comparative analysis is carried out, where completion technologies and configurations are examined according to geological characteristics and types of geothermal systems, creating a comparison table. Finally, in the fourth phase, configurations applicable to Colombia for the design and completion of geothermal wells are established, based on the identified success cases.

\* Degree Work

\*\* School of Physicochemical Engineering. School of Petroleum Engineering. Petroleum Engineering. Director: Zuly Himelda Calderón Carrillo. PhD in Chemical Engineering. Codirector: Alejandra Peña Mateus. Petroleum Engineer, Juan José Rondón López. Petroleum Engineer.

## Introducción

Este trabajo se centra en el análisis de tecnologías y configuraciones implementadas en operaciones de completamiento de pozos geotérmicos en todo el mundo y enfatiza su importancia como fuente de energía renovable y limpia. Dado que las tecnologías de perforación y completamiento utilizadas en la energía geotérmica son similares a las utilizadas en la industria de los hidrocarburos, esta tesis tiene como objetivo brindar una mirada en profundidad al progreso y las mejores prácticas utilizadas en diferentes partes del mundo. Uno de los principales objetivos es mostrar historias de éxito internacionales que demuestren el impacto y la eficiencia de las tecnologías y configuraciones geotérmicas. Por otro lado, el desarrollo de escenarios teóricos de completamiento de pozos permite explotar el potencial geotérmico en zonas específicas de Colombia, contribuyendo al desarrollo energético sostenible del país. Este trabajo también se complementará con una revisión bibliográfica para recopilar información importante que promueva la investigación y el uso de estas tecnologías.

En el tercer capítulo, se detalla el procedimiento de análisis de revisión bibliográfica llevado a cabo en el estudio, el cual emplea términos clave pertinentes para rastrear publicaciones académicas en plataformas como ScienceDirect, Scopus y Web of Science. La aplicación VOSviewer se utiliza para mostrar la conexión entre las palabras clave elegidas, resaltando su relevancia en el estudio. Se concluye a través de esta revisión que el diseño de completamiento de pozos geotérmicos es complicado y está influenciado por múltiples variables, como la temperatura, la presión, la composición del fluido geotérmico, las propiedades petrofísicas del yacimiento, los sistemas geotérmicos y factores ambientales y regulatorios. Asimismo, factores como los costos, estimulación hidráulica y la integridad del pozo son esenciales para un plan eficaz y protegido.

El cuarto capítulo analiza el completamiento de pozos geotérmicos en varias zonas del mundo, resaltando tecnologías de vanguardia y ejemplos específicos. El uso de relleno de grava para estabilizar pozos profundos está siendo discutido, así como la adopción de tuberías de PVC-U en China debido a su asequibilidad y durabilidad contra la corrosión, y la utilización de aleaciones de acero inoxidable en California para resistir condiciones ambientales corrosivas. Además, se muestran tecnologías importantes tales como tuberías expandibles, técnicas de cementación avanzadas, y sistemas de control de flujo que potencian la integridad y la eficiencia de los pozos. El empleo de la tecnología de fibra óptica para la vigilancia en tiempo real y los sistemas de intercambiadores de calor en Europa y Hawái se resalta igualmente como crucial para disminuir el impacto ambiental y mejorar los costos. Por último, se examinan las estrategias utilizadas en el Campo Geotérmico Los Humeros en México, las cuales garantizan un funcionamiento seguro y efectivo ante situaciones extremas.

El análisis comparativo de varias tecnologías de completamiento en pozos geotérmicos se presenta en el capítulo cinco, las cuales son fundamentales para la extracción eficaz y sostenible de energía geotérmica. Se muestran diversos enfoques como revestimiento de casing con titanio, emplear cemento aireado, usar revestimientos expansibles y aplicar fracturamiento hidráulico, entre otros, analizando sus beneficios, inconvenientes y ejemplos concretos en varios yacimientos geotérmicos a nivel mundial. Los métodos se eligen basándose en las características geológicas y operativas específicas de cada yacimiento, teniendo en cuenta factores como temperatura, presión, durabilidad, costos y regulaciones ambientales, con el fin de mejorar la producción y disminuir los riesgos.

Finalmente, el capítulo seis detalla el concepto de diseño para completar un pozo geotérmico en Paipa, Colombia, tomando en cuenta las propiedades geotérmicas específicas de la

zona. Paipa se encuentra en una región volcánica y tiene un sistema geotérmico que tiene un gran potencial para generar energía debido a la actividad tectónica y volcánica en la zona. El diseño implica la elección de tecnologías como recubrimientos anticorrosivos, cementos capaces de soportar altas temperaturas, y un sistema de circuito cerrado con el fin de mejorar la generación de energía. Aspectos geológicos, tales como la caldera volcánica y las formaciones rocosas, se describen, y se sugiere un diseño y una estructura de un estado mecánico que optimice el rendimiento y la durabilidad del pozo.

El análisis llevado a cabo verificó que la utilización de completamientos multilaterales, tuberías expandibles y monitoreo en tiempo real con fibra óptica incrementa de manera notable la eficiencia operativa, con incrementos de hasta un 30% en la extracción de calor en iniciativas como Cerro Pabellón (Chile) y Los Humeros (México). Además, al utilizar aleaciones de titanio y avanzar en la cementación se ha logrado disminuir los gastos de mantenimiento en un 20% y extender la durabilidad de los pozos. En Paipa, Colombia, el diseño teórico propuesto para el campo geotérmico incorpora intercambiadores de calor coaxiales y tecnología BHE, lo cual tiene un gran potencial para optimizar la generación de energía geotérmica en condiciones locales extremas. En síntesis, este estudio evidencia la factibilidad de incorporar tecnologías de vanguardia con el fin de potenciar la eficacia y durabilidad de los proyectos geotérmicos en varios lugares del globo, incluyendo usos específicos en Colombia.

## **1. Objetivos**

### **1.1 Objetivo General**

Analizar las tecnologías y configuraciones que se usan en el completamiento de pozos en yacimientos geotérmicos.

### **1.2 Objetivos Específicos**

Definir las variables que influyen en la selección y diseño del completamiento de pozos perforados en yacimientos geotérmicos.

Describir los completamientos típicos utilizados a nivel mundial en pozos geotérmicos de casos de estudio exitosos a nivel mundial.

Realizar un análisis comparativo de las tecnologías y configuraciones del completamiento de pozos teniendo en cuenta las características geológicas y el tipo de sistema geotérmico.

Diseñar una configuración teórica de completamiento de un pozo geotérmico para un área de estudio en Colombia considerando los rasgos característicos del yacimiento geotérmico y su viabilidad con las tecnologías estudiadas.

## **2. Marco Teórico**

### **2.1 Energía Geotérmica**

La energía geotérmica se basa en la extracción de calor del subsuelo terrestre. Es una fuente de energía renovable y prácticamente inagotable, capaz de generar electricidad y otras formas de energía. Este tipo de energía se obtiene principalmente a partir del vapor de agua generado en el interior de la Tierra debido a la actividad geotérmica. Su utilización no implica riesgos ambientales significativos, ya que es considerada una energía limpia. La energía geotérmica no produce emisiones contaminantes durante su explotación, lo que la convierte en una opción sostenible y respetuosa con el medio ambiente, contribuyendo significativamente a la reducción de la huella de carbono y al combate del cambio climático (Santoyo, Barragán – Reyes, 2010).

### **2.2 Gradiente Geotérmico**

Relación entre la temperatura y la profundidad de la tierra, es un número que se da en grados Celsius, el cual aumenta la temperatura al profundizar 100 metros en el interior de la corteza terrestre. Cabe mencionar que el gradiente geotérmico varía con la conductividad térmica de las rocas, el tipo de reacciones químicas, la presencia y concentración de elementos radioactivos (Fernández Díez, Energía Geotérmica, 2015).

### **2.3 Sistemas hidrotermales convectivos**

Estos sistemas geotérmicos se caracterizan por la infiltración de fluidos que actúan como fuente de calor. Estos fluidos se atrapan en la corteza terrestre a través de fracturas naturales, donde permanecen almacenados por períodos prolongados. En la superficie, estos sistemas se manifiestan mediante la presencia de manantiales de agua caliente, géiseres y lagos de lodo caliente. Los yacimientos geotérmicos pueden contener vapor o líquidos a altas temperaturas, siendo capaces de aprovecharse para la generación de energía térmica y eléctrica. (Santoyo, Barragan – Reyes, 2010).

## 2.4 La máquina térmica de la Tierra

El gradiente geotérmico es el aumento de la temperatura con la profundidad en la corteza terrestre. A profundidades accesibles mediante perforaciones con tecnología moderna, esto es, sobre 10.000 metros, el gradiente geotérmico promedio es alrededor de 25 a 30 °C/km. Por ejemplo, a temperatura ambiente media anual de 15°C se puede razonablemente asumir una temperatura de 65°C a 75°C a 2000 metros de profundidad, 90°C a 105°C a 3000 metros de profundidad y así para otros miles de metros. Sin embargo, hay regiones de la Tierra en las cuales el gradiente geotérmico es muy diferente al valor promedio. En áreas donde las rocas del basamento han sufrido un rápido hundimiento y la cuenca resultante es rellenada con sedimentos geológicamente “muy jóvenes”, el gradiente geotérmico puede ser menor que 1°C/km. Por otra parte, en algunas “áreas geotermales” el gradiente es más de diez veces el valor promedio (Dickson, Mary H & Fanelli, 2004).

## 2.5 Sistemas geotérmicos

Los sistemas geotérmicos pueden por lo tanto encontrarse en regiones, con un gradiente geotérmico normal o levemente superior, especialmente en regiones alrededor de los márgenes de placas, donde el gradiente geotérmico puede ser significativamente más alto que el valor promedio. En el primer caso, los sistemas se caracterizarán por bajas temperaturas, normalmente inferiores a 100°C, a profundidades económicamente alcanzables (2-3 km); en el segundo caso, las temperaturas podrían cubrir un amplio rango, desde bajas hasta muy altas e incluso sobre 400°C (Dickson et al., 2004).

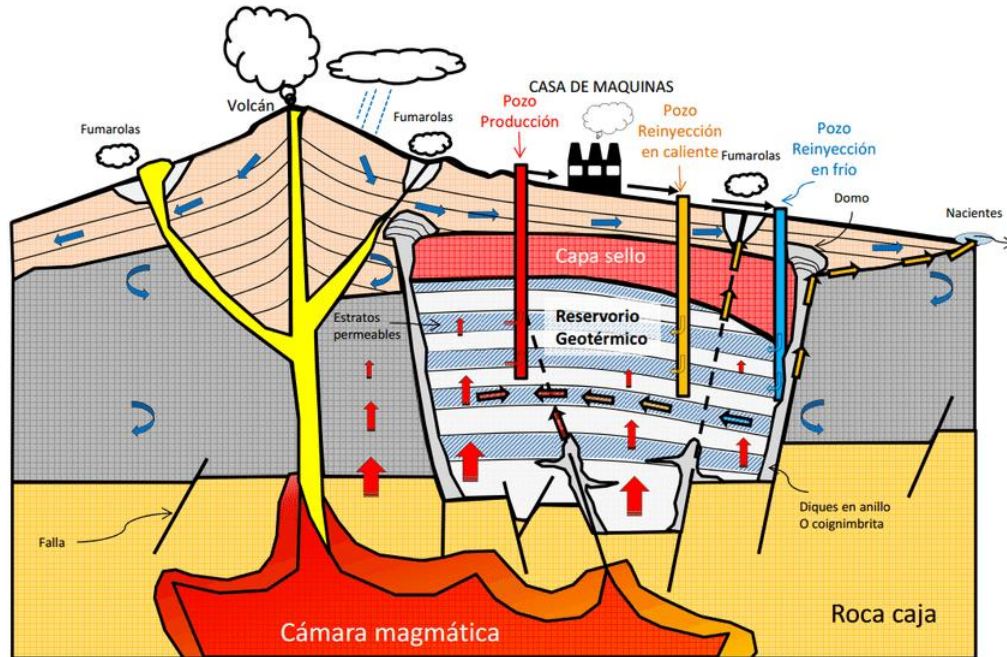
Puede describirse esquemáticamente como "agua convectiva en la corteza superior de la Tierra que transfiere calor en un espacio confinado desde una fuente de calor a una abertura térmica, generalmente una superficie libre" (Hochstein, 1990). Los sistemas geotérmicos constan

de tres elementos principales tal como se puede observar en la figura 1: la fuente de calor, el yacimiento y el fluido (el medio que transfiere calor). Las fuentes de calor pueden ser intrusiones magmáticas extremadamente calientes ( $>600^{\circ}\text{C}$ ) ubicadas a profundidades relativamente poco profundas (5-10 km) o sistemas de baja temperatura donde los gradientes geotérmicos normalizan el calor. Un yacimiento geotérmico es una formación geológica compuesta por una roca sello y una roca permeable que almacena calor, donde los fluidos en circulación producen energía térmica.

Sin embargo, el criterio más común para clasificar los recursos geotérmicos se basa en la entalpía de los fluidos geotérmicos, que actúan como medio de transporte desde las rocas calientes en las profundidades hasta la superficie. Se puede considerar que la entalpía es más o menos proporcional a la temperatura, y el término se utiliza para expresar el contenido de calor (energía térmica) de un fluido y dar una idea de su "valor". Los recursos geotérmicos se clasifican en baja, media y alta entalpía (o temperatura), basándose en criterios generalmente basados en la energía contenida en el fluido y su posible forma de uso. Un método de clasificación estándar y su terminología pueden evitar confusiones y ambigüedades, pero mientras este método no exista, se debe indicar los valores y rangos de temperatura en cada caso, ya que los términos tales como bajo, intermedio y alto tienen poco sentido y son frecuentemente engañosos.

**Figura 1**

*Esquema de un campo geotérmico en ambiente volcánico*



*Nota.* Imagen esquemática de un campo geotérmico en una caldera colapsada. Adaptado de *Propuesta de modelo conceptual para el reservorio del Proyecto Geotérmico Borinquen, basado en análisis unidimensional de la técnica magnetotérmica* por Leonardo Solís, 2016, Instituto Costarricense de Electricidad

### **2.5.1 Clasificación de los sistemas Geotérmicos según su Entalpía**

Los sistemas geotérmicos de forma general se clasifican con base en la temperatura del fluido endógeno que se extrae, o del fluido que se inyecta para la extracción el calor de la roca haciendo referencia en su entalpía (contenido energético).

**Sistemas geotérmicos de alta entalpía.** Son sistemas geotérmicos en que la temperatura del fluido es mayor de 200 grados Celsius, ideales para la producción de electricidad con sistemas convencionales de generación.

**Sistemas geotérmicos de mediana entalpía.** Son sistemas geotérmicos donde la temperatura del fluido está en el intervalo de 100 a 200 grados Celsius. Se puede aprovechar para producir energía eléctrica, aunque con un rendimiento menor que la geotermia de alta entalpía.

**Sistemas geotérmicos de baja entalpía.** Son sistemas geotérmicos en que la temperatura del fluido es menor de 100 grados Celsius. El uso de este tipo de energía se centra en sistemas de calefacción urbanos, procesos industriales y balnearios.

### *2.5.2 Clasificación de los sistemas Geotérmicos según su Geología*

**Sistemas geotérmicos de roca seca caliente.** Como su nombre lo indica, este sistema consiste en una roca caliente de aproximadamente 650 grados Celsius localizada entre 2 y 4 kilómetros de profundidad. Para poder explotar la energía de este sistema, requiere de una red de fracturas en la roca por medio de la inyección de fluidos.

**Sistemas geotérmicos geopresurizados.** Son sistemas que se caracterizan por contener agua y metano disuelto a una alta presión y a mediana temperatura.

**Sistemas geotérmicos marinos.** Su energía geotérmica se localiza en el fondo del mar y se manifiesta como descargas, fumarolas o chimeneas hidrotermales.

**Sistemas geotérmicos magmáticos.** Estos sistemas geotérmicos están asociados a una zona de alta actividad volcánica y consisten en una roca fundida a unos 800 grados Celsius aproximadamente.

**Sistemas geotérmicos supercríticos.** La profundidad de estos sistemas se encuentra entre los 5 y 6 kilómetros y contienen fluidos en estado supercrítico, es decir, un estado intermedio de la presión y la temperatura donde se tiene una fase intermedia entre líquido y gas. Cabe mencionar que estos sistemas supercríticos pueden generar 10 veces más energía que los sistemas geotérmicos convencionales.

### ***2.5.3 Sistemas geotérmicos mejorados.***

Los sistemas mejorados geotérmicos (EGS), también conocidos como Enhanced Geothermal Systems, son una tecnología que posibilita la extracción de energía geotérmica en zonas donde existen recursos de calor subterráneo, pero presentan falta de permeabilidad natural o agua necesaria para generar energía de forma tradicional. Los sistemas están creados para mejorar o crear la conectividad hidráulica en rocas calientes y secas bajo tierra, lo que ayuda en el desplazamiento de los fluidos para producir energía geotérmica.

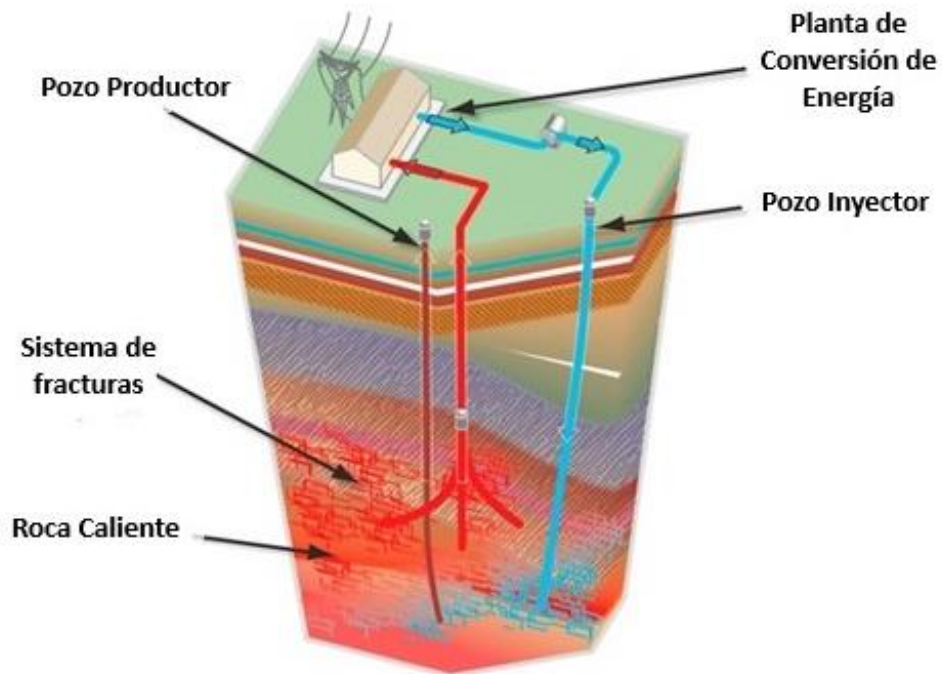
El futuro de la energía geotérmica radica en expandir la cobertura geográfica más allá de los 'puntos calientes' locales que caracterizan casi todas las plantas en funcionamiento actualmente, hacia áreas que tienen gradiente de temperatura y flujos de calor promedio. La metodología que se debe desarrollar para lograr esto se llama 'sistemas geotérmicos mejorados' o EGS. La mayor parte de esta sección está dedicada a este interesante tema. (Santoyo, Barragan – Reyes, 2010).

Otra posibilidad para expandir la energía geotérmica está en la dirección de los recursos de baja temperatura. Como los depósitos de alta temperatura son los más favorables en términos de potencial termodinámico, han sido desarrollados preferentemente. Pero tienen una frecuencia geográfica muy limitada. La gran mayoría de los recursos naturales se encuentran en el extremo inferior del espectro de temperatura.

La dificultad para explotar estos yace en la eficiencia muy baja de conversión de energía y el alto costo específico de construir una planta de tamaño comercial. Hay varias empresas nuevas que intentan aplicar la tecnología binaria a recursos en el rango de temperatura de 100 °C o menos a 120 °C, utilizando sistemas que también pueden ser utilizados para cualquier aplicación de recuperación de calor de baja temperatura.

**Figura 2**

*Diseño básico de un sistema geotérmico mejorado (EGS)*



*Nota:* Adaptado de: Olasolo, P., Juárez, M. C., Morales, M. P., Damico, S., & Liarte, I. A. (2016). Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*

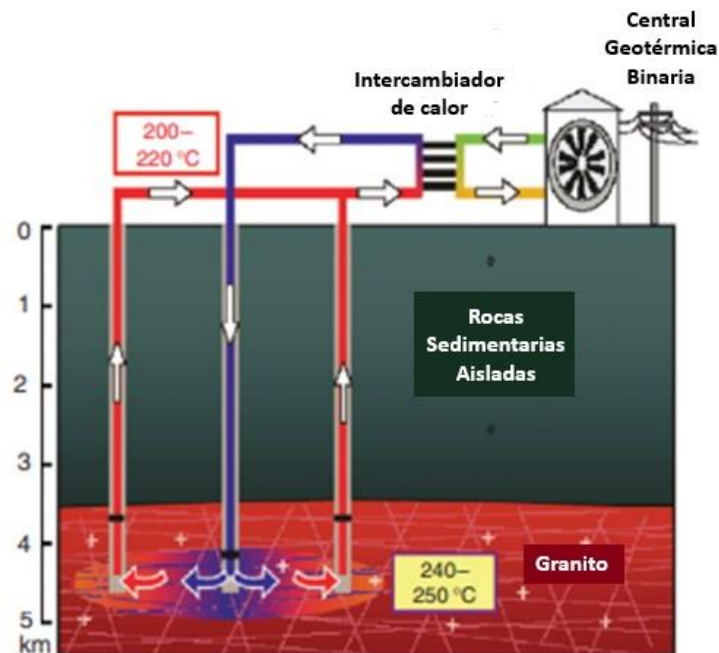
El concepto básico de EGS es que la permeabilidad de las rocas calientes puede mejorarse mediante la aplicación de alta presión sobre la formación, suministrada por líquidos bombeados a pozos profundos. El conocimiento del campo de esfuerzos en la formación es crítico para idear un proceso de estimulación adecuado. Una vez que la formación ha sido fracturada (ver figura 2) sobre un volumen suficientemente grande de roca, unos  $10 \text{ km}^3$ , se perforan pozos adicionales en la roca fracturada para interceptar muchas de las fracturas recién creadas. Así, se forman caminos

entre y entre los pozos que permiten que el fluido sea inyectado desde la superficie en un pozo y capturado en las cabezas de otros pozos.

Entre los pozos, el fluido pasa a través de las fracturas inducidas o mejoradas en la roca caliente, extrayendo calor y elevando así su temperatura a niveles adecuados para la producción de energía. Una vez que el fluido caliente llega a la superficie, se puede desplegar una planta de energía geotérmica bastante simple, típicamente un ciclo binario, para generar electricidad. El fluido enfriado luego se reinyecta para ser rehecho.

### Figura 3

#### *Esquema Conceptual de EGS*



*Nota.* En la figura se muestra el esquema de funcionamiento de un sistema geotérmico mejorado donde se cuenta con un pozo inyector y uno productor, un intercambiador de calor y una planta generadora de energía. Adaptado del libro de DiPippo (2012).

## **2.6 Yacimiento geotérmico**

“El yacimiento es un componente del sistema geotérmico y se caracteriza por ser la zona donde se encuentra la roca permeable que contiene a los fluidos a una temperatura y presión determinada, delimitados por la capa sello y el basamento” (Salvador et al., 2018). La geología de los yacimientos geotérmicos es compleja y puede contener diferentes tipos de rocas, interfaces estratigráficas, fallas, barreras y frentes fluidos. Algunas de estas características pueden afectar el comportamiento transitorio de la presión hasta cierto punto y la mayoría afecta el rendimiento del yacimiento. Para estimar el potencial energético de un yacimiento geotérmico, se parte de una evaluación volumétrica, analizando parámetros como su volumen, capacidad calorífica, temperatura de rechazo y calor almacenado. Dependerá del nivel de detalle del modelo y de los supuestos establecidos en esta etapa. Cuando sea posible, la construcción de pozos geotérmicos y sus pruebas proporcionan información que ayuda a describir el yacimiento y a predecir su desempeño; además, dicha caracterización es útil a la hora de desarrollar el plan de producción de una central geotérmica.

## **2.7 Generación de Energía Eléctrica**

La generación de energía eléctrica a partir de recursos geotérmicos es uno de los medios de producción eléctrica más benignos para el medio ambiente y más confiables. Las plantas de energía geotérmica han estado en operación continua desde 1904, excepto por un breve período cerca del final de la Segunda Guerra Mundial. Durante el último siglo se ha acumulado una vasta cantidad de experiencia que ahora permite aprovechar casi todos los tipos de recursos geotérmicos para la generación de energía.

Hoy en día, 24 países están comprometidos en la producción de energía eléctrica a partir de recursos de energía geotérmica. La capacidad instalada total es de aproximadamente 8,900

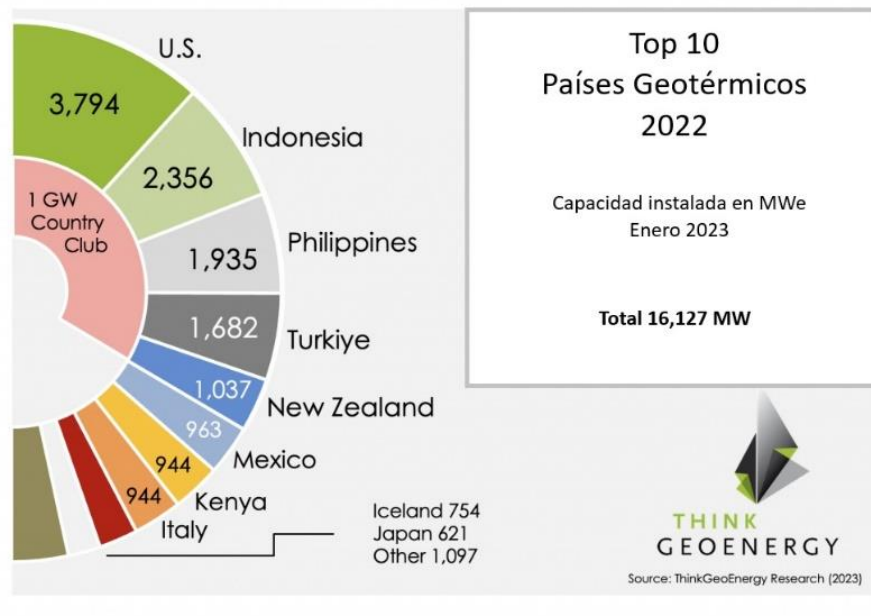
MWe de 468 unidades generadoras de energía (Bertani, 2007). La generación de energía a partir de recursos geotérmicos ha experimentado un crecimiento constante, aunque modesto, en las últimas tres décadas. La energía eléctrica anual producida a partir de recursos geotérmicos en la actualidad es de aproximadamente 57,000 GWh al año, lo que representa menos del 0.4% de toda la generación de electricidad a nivel mundial. Por lo tanto, la contribución de la energía geotérmica a la generación total de electricidad en el mundo es muy modesta.

En contraste, el uso directo de los recursos de energía geotérmica juega un papel importante en varios países. Según Santoyo-Barragán, (2010), 72 países están utilizando este recurso energético para una amplia variedad de aplicaciones, con una estimación aproximada de alrededor de 28,000 MWt de capacidad instalada. Esto equivale a un ahorro energético anual equivalente a aproximadamente 25 millones de toneladas de petróleo y una reducción de emisiones de carbono de 24 millones de toneladas en la atmósfera.

En la figura 4 se puede observar la capacidad instalada en MWe del top 10 países geotérmicos en el año 2022, teniendo a Estados Unidos como principal actor en la producción de esta energía.

**Figura 4**

*Crecimiento de la capacidad instalada de energía eléctrica producida a partir de energía geotérmica en diferentes países*



*Nota.* Obtenido de ThinkEnergy Research 2023

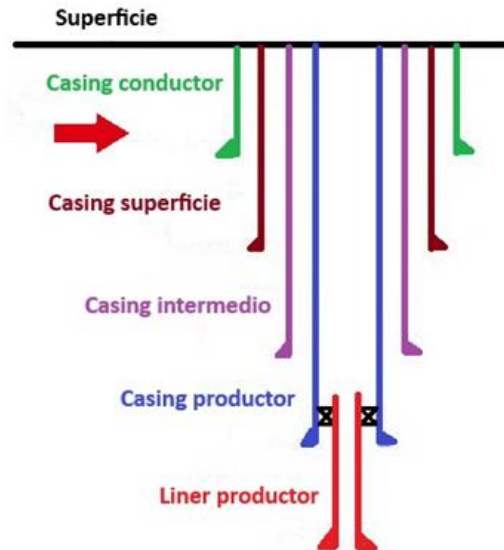
## 2.8 Secciones del Completamiento de Pozos

### Tubería de revestimiento o “casing”

La tubería de revestimiento o “casing” como se le conoce en la industria petrolera, tiene como objetivo revestir el pozo mediante una serie de tuberías metálicas hechas en acero con el fin de que haya una estabilidad en el pozo. Los objetivos principales de la tubería de revestimiento son mantener la estabilidad del sondeo, evitar derrumbes del pozo, aislar zonas de posibles pérdidas de circulación y prevenir contaminación de acuíferos (Herbert, 2020).

**Figura 5**

*Tipos de tubería de revestimiento o "Casings"*



*Nota.* La imagen representa una configuración típica de un pozo durante el proceso de montaje de casings. Adaptado de Herrera (2020). *Ingeniería de la perforación de pozos de petróleo y gas. Vol. III: Sistemas básicos y procesos de los equipos de perforación.* Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

### Tipos de Casing

- **Casing Conductor.** Este casing se instala antes de empezar el proceso de perforación y el objetivo principal es evitar los posibles derrumbes que se puedan presentar en la parte superior del pozo durante este proceso. También facilita la circulación de fluidos desde el momento de la perforación hasta el fondo del pozo (Herbert, 2020).
- **Casing de Superficie.** Es el siguiente tipo de casing después del casing conductor. Su finalidad es proteger los acuíferos superficiales que estén cercanos al pozo con el fin de evitar que las posibles fugas de fluidos geotérmicos o aguas saladas lo contaminen.

- **Casing Intermedio.** Se caracteriza por ser la sección más larga dentro de los tipos de casing. Su función principal es prevenir daños en las paredes del pozo durante las operaciones de perforación debido a las presiones altas que se pueden generar en estos puntos específicos donde se encuentre esta tubería de revestimiento.
- **Casing Productor.** Es la sección final de la instalación completa de las tuberías de revestimiento, y su función principal es poder conectar la formación productora con el pozo para así empezar la etapa de drenaje de fluidos geotérmicos a superficie.

### **Tubing**

También conocida como tubería de producción, por ella los fluidos geotérmicos una vez extraídos ascienden a través de esta tubería hasta la superficie (Herbert, 2020).

### **Accesorios de revestimiento**

- **Zapata guía (guide shoe).** Es una pieza que facilita el descenso del casing para que este pueda roscar los tubos de revestimiento. Se caracteriza porque está hecho de un material, que, en caso de operaciones adicionales, puede ser reperforado.
- **Anillo flotador (float collar).** Primordial en la cementación en varias etapas. Su uso es para el paso de la lechada de cemento y válvulas de corredera de apertura y cierre.
- **Centralizadores (centralizers).** Es un accesorio que funciona como un estabilizador para los tubos con el fin de que estos queden centrados para asegurar que queden totalmente recubiertos por la lechada de cementación.
- **Rascadores (scratchers).** Sirven para despegar la torta de lodo que pudo haber quedado adherida a las paredes del pozo.

- **Cestas de cementación (cement baskets).** Su función principal es retener la lechada durante el periodo de fraguado. La ubicación de las cestas de cementación es en zonas donde haya una posible pérdida de circulación.
- **Tapones de cementación (cement plugs).** Sirven de separación entre la lechada de cementación y el lodo de perforación. La composición de esta pieza es de goma con una armadura de aluminio para en casos especiales poder ser perforada.

### **Cementación del pozo**

La cementación del pozo es una etapa fundamental a la hora de completar un pozo; su función principal es establecer un aislamiento entre la formación y la tubería con el fin de bloquear las posibles fugas de fluidos hacia la superficie y la formación (Herbert, 2020).

- **Cementación primaria.** consiste en la mezcla de cemento y agua en una proporción según el tipo de cemento y las condiciones que se necesiten, por lo general, la relación es 2:1 respectivamente. Su objetivo principal es rellenar el espacio anular entre el revestimiento y las paredes del hueco, con el fin de proteger el revestimiento de la corrosión.
- **Cementación secundaria.** consiste en la inyección a presión de la lechada de cemento con el fin de sellar aquellas cavidades o grietas que están defectuosas para evitar las pérdidas de circulación o corregir posibles defectos de la cementación primaria.
- **Cementación terciaria.** La literatura se suele referir a este tipo de cementación como la colocación de tapones de cementos para fines como taponar zonas productivas antiguas, taponar la entrada de agua por el fondo del sondeo, sellar y taponar el sondeo antes de abandonarlo.

### Tipos de cemento

Existen cuatro tipos de óxidos los cuales son:  $CaO$ ,  $SiO_2$ ,  $AlO_3$  y  $Fe_2O_3$ . Estos óxidos, presentes en las materias primas (la caliza y la arcilla), se combinan a través de procesos térmicos para formar los componentes principales del clinker, el cual es la base del cemento Portland. Los compuestos principales obtenidos en este proceso son el silicato dicálcico ( $C_2S$ ), el silicato tricálcico ( $C_3S$ ), el ferrito aluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ) y el aluminato tricálcico ( $C_3A$ ): (Herbert, 2020).

- **Aluminato tricálcico ( $C_3A$ ).** Favorece una rápida hidratación, reduciendo así el tiempo de fraguado.
- **Ferroaluminato tetracálcico ( $C_4AF$ ).** Proporciona bajo calor de hidratación.
- **Silicato tricálcico ( $C_3S$ ).** Es el componente que se encuentra en mayor proporción y aporta resistencia mecánica, especialmente al inicio de la cementación.
- **Silicato dicálcico ( $C_2S$ ).** Proporciona un incremento gradual de la resistencia durante un periodo de tiempo.

### Tipos de aditivos

Cabe mencionar que las propiedades del cemento se pueden modificar mediante el uso de ciertos aditivos, los cuales se clasifican en los siguientes grupos:

- **Acelerantes.** Este aditivo se usa para poder acelerar el proceso de secado del cemento, antes de reanudar la perforación se espera que el cemento haya adquirido una dureza de al menos 500 psi. Por lo general, el aditivo que más se utiliza es el  $CaCl_2$ .
- **Retardadores.** Así como existen aceleradores, los retardadores realizan el procedimiento opuesto. Cuando aumenta la temperatura debido a la profundidad de

- sondeo, se reduce el tiempo de fraguado, por lo que los retardadores son fundamentales para incrementar el tiempo disponible para el bombeo de la lechada.
- **Modificadores de la densidad de la lechada.** Estos aditivos son necesarios en función de las presiones y gradientes de fractura de la formación.
  - **Dispersantes.** El objetivo principal es arrastrar el lodo que queda adherido a las paredes. Estos aditivos lo hacen por medio de una reducción de la viscosidad al cemento, permitiendo un flujo turbulento para poder arrastrar el lodo.

## 2.9 Pozos geotérmicos

En una planta geotérmica existen dos tipos de pozos, los productores que son utilizados para extraer los fluidos del yacimiento, los cuales son conducidos hasta la turbina para generar electricidad y los pozos reinyectores que conducen el agua residual del campo para ser de vuelta al sistema geotérmico. Por lo general estos pozos poseen una configuración telescópica, conformada por tres o cuatro etapas con diferentes diámetros. La Tabla 1 y Figura 6 presentan las características típicas de un pozo geotérmico.

Para cada etapa de la Figura 6, tomar como referencia las profundidades relacionadas en la Tabla 1, las cuales están asociadas a las diferentes medidas mostradas a continuación.

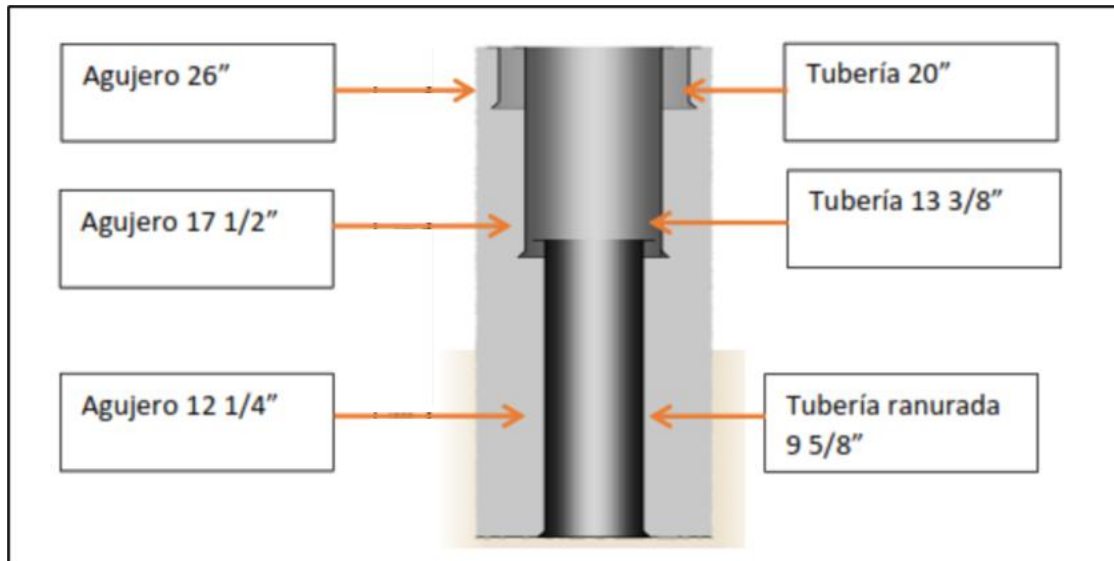
**Tabla 1***Etapas, diámetros, profundidades y características comunes de un pozo*

<b>Etapas</b>	<b>Diámetro del agujero (pulgadas)</b>	<b>Diámetro de tubería (pulgadas)</b>	<b>Profundidad (metros)</b>	<b>Función</b>
<b>Obra civil</b>	40	36	8-12	Estructural
<b>1</b>	32	26	60-150	Superficial
	26	20		
<b>2</b>	23	18 5/8	400-900	Intermedia
	17 ½	13 3/8		
<b>3</b>	17 ½	13 3/8	800-1600	Anclaje / Producción
	12 ¼	8 5/8		
<b>4</b>	12 ¼	9 5/8	1500-2600	Liner
	8 ½	7 5/8 - 7		

*Nota:* adaptado de Geotermia para América Latina. Universidad del Salvador. 2018

**Figura 6**

*Esquema y configuración común de un pozo geotérmico*



*Nota:* adaptado de Geotermia para América Latina. Universidad del Salvador. 2018

## **2.10 Perforación de un pozo geotérmico**

La perforación implica configurar la sarta de perforación, construir el pozo, conectar la tubería de perforación, pesar la tubería de perforación para penetrar la roca, usar lodo de perforación para lubricar la broca y recolectar recortes de la superficie, considerar la perforación direccional, etc. Las principales etapas de la perforación son las siguientes:

### **2.10.1 Configuración del diseño de un pozo geotérmico**

Antes de que un pozo pueda ser perforado, debe tener lugar mucha preparación. Geofísicos, geólogos y otros científicos deben estudiar el sitio para determinar si el lugar debe ser perforado, estudios ambientales se deben hacer en la mayoría de los países. Si el sitio es adecuado, entonces el equipo debe ser movilizado y armado, junto con el personal para hacerlo funcionar. Una vez

que el equipo de perforación se encuentra en el lugar y todo el personal está disponible, se puede comenzar la perforación (Salvador et al., 2018).

### **Construcción del agujero**

La tubería de perforación, o el conjunto de broca y sarta, se arma y se pone en el piso de perforación por debajo de la torre de perforación. La tubería de perforación también subirá y se conectará a la herramienta. El perforador se encuentra en un compartimento llamado comúnmente la "caseta del perro" y opera el motor del taladro, empujando la herramienta contra el suelo. Desde esta posición, puede controlar variables como la presión ejercida por la broca y la velocidad de rotación. Además, debe supervisar a los trabajadores en el piso de perforación y gestionar otras variables operativas simultáneamente.

### **Piso de la plataforma**

Cuando la broca alcanza una cierta profundidad, otro tramo de tubería de perforación debe ser añadido. Los trabajadores de piso separan el motor del taladro de la tubería de perforación y usando cabestrantes junto con otros tipos de dispositivos de elevación extraen otro tramo de la tubería hasta el piso de perforación. Algunos equipos están diseñados para almacenar los tubos en la torre de perforación para ahorrar espacio y para ayudar a hacer cambios más rápidos. El nuevo stand de tubería se conectará al motor del taladro mediante un mecanismo en la parte superior de la torre de perforación. El otro extremo de la nueva tubería alzada se conecta a la posición anterior que está ya en el agujero por los cuñeros. El perforador puede entonces comenzar a operar el taladro, una vez más.

### **Perforación Direccional**

Cuando es necesario alcanzar un objetivo específico del subsuelo que no es accesible a través de las prácticas convencionales de perforación vertical, se utiliza una ruta o dirección,

orientando ángulos. El uso de equipos de perforación direccional permite alcanzar puntos en el fondo del agujero previamente inalcanzables. Es por eso por lo que los resultados de la perforación direccional dan una ventaja significativa sobre la perforación convencional vertical en ambientes de baja permeabilidad o en situaciones en las que los operadores desean acelerar la producción del yacimiento. (PSB, 2011).

### **Casing**

Durante el proceso de perforación profunda, es común añadir una tubería de revestimiento, conocida como "casing", al pozo. Esta tubería está diseñada específicamente para actuar como una barrera estructural de refuerzo, evitando el colapso durante la perforación de zonas más profundas y asegurando la integridad durante las etapas posteriores de producción y la vida útil del pozo. Inicialmente, se coloca una base de cemento en el fondo del yacimiento, formulada por un ingeniero especializado en cementaciones para garantizar que pueda soportar diferentes esfuerzos. Luego, la tubería de revestimiento se desciende al pozo mediante un proceso de conexión y desconexión similar al utilizado para la tubería de perforación.

### **Parámetros clave en la configuración de pozos geotérmicos**

La configuración de estos pozos se realiza teniendo en cuenta los parámetros tales como el tamaño de revestimiento. Los pozos geotérmicos requieren casings de mayor diámetro para manejar grandes volúmenes de fluidos calientes. Por ejemplo, se mencionan casings de hasta 18-5/8 pulgadas (473 mm) en Europa y de 13-3/8 pulgadas (340 mm) en sistemas de energía grandes.

Por otro lado, las grandes dimensiones de los casings aumentan significativamente los costos de los materiales y la perforación. Sin embargo, estas dimensiones son necesarias para garantizar un flujo adecuado de fluidos geotérmicos y mantener la eficiencia del pozo.

Adicionalmente las variaciones de temperatura en los pozos geotérmicos pueden generar esfuerzos térmicos que exceden el límite elástico del revestimiento. Esto puede causar deformaciones y fallos en el revestimiento si no se maneja adecuadamente.

De igual forma el comportamiento de fatiga es una preocupación significativa debido a las fluctuaciones de temperatura. Las conexiones de revestimiento, como las conexiones roscadas Buttress, deben ser diseñadas para soportar la fatiga de ciclo bajo, lo que puede ser tan bajo como 10 ciclos bajo cargas extremas.

La cementación del revestimiento es crucial para mantener la estabilidad del pozo y prevenir la migración de fluidos entre las formaciones. Los esfuerzos térmicos pueden afectar la integridad del cemento, por lo que es importante usar cementos que puedan soportar estos esfuerzos. Además, se realizan análisis para evaluar cómo los esfuerzos térmicos afectan el cemento y el revestimiento. Esto ayuda a diseñar configuraciones de completamiento que minimicen el riesgo de fallos estructurales.

En cuanto los materiales utilizados en el revestimiento y las conexiones deben ser seleccionados cuidadosamente para soportar las condiciones térmicas y de presión específicas de los yacimientos geotérmicos. Las conexiones roscadas y otras tecnologías de conexión deben ser evaluadas y seleccionadas en función de su capacidad para manejar esfuerzos térmicos y ciclos de fatiga. Adicionalmente, se realiza una evaluación de riesgos para identificar posibles fallos y planificar medidas de mitigación. Esto incluye la selección de tecnologías de completamiento y la planificación de operaciones de mantenimiento teniendo en cuenta un monitoreo continuo de la integridad del pozo y el mantenimiento regular ya que son esenciales para asegurar el rendimiento a largo plazo del pozo geotérmico (Teodoriu & Falcone, 2009).

En la tabla 2 se puede observar la comparación de un pozo geotérmico, un pozo de gas y un pozo de aceite pesado en base a los parámetros tales como temperatura, profundidad, diámetro de casing y tipo de conexión ya que son criterios claves para el diseño de la configuración de cada pozo.

**Tabla 2**

*Parámetros clave de terminación de pozos geotérmicos, de gas y de petróleo pesado*

<b>Parámetro</b>	<b>Geotérmico</b>	<b>Gas</b>	<b>Aceite pesado</b>
<b>Temperatura [°C]</b>	80-250	60-150	60-305
<b>Profundidad [m]</b>	1000-5000	3000-6000	300-1200
<b>Casing</b>	9-5/8in y 7in revestimiento	9-5/8in con cruce a 7in	5 in o 7in
<b>Tipo de conexión</b>	API Buttress	De primera calidad	API largo/contrafuerte

*Nota.* adaptado de Comparing completion design in hydrocarbon and geothermal wells: The need to evaluate the integrity of casing connections subject to thermal stresses (Teodoriu & Falcone, 2009)

### **2.10.2 Lodos de perforación geotérmica**

El fluido de perforación o lodo de perforación se bombea a través de la tubería de perforación para lubricar la sarta que se opera. El lodo está muy específicamente formulado para cada agujero e incluso para los diferentes estratos del agujero. Un ingeniero de lodos está en el sitio para asegurarse de que la fórmula cumple con las especificaciones requeridas para el trabajo.

En el caso de la implementación del lodo de perforación en un pozo geotérmico, se utilizan compuestos adicionales a los de un lodo de perforación convencional para contrarrestar las altas temperaturas y los ambientes corrosivos que se manejan en los sistemas geotérmicos. Adicional,

se cuenta con una técnica de perforación en la que se utiliza aire, lodos aireados y espuma (Ortíz, 2024)

Los lodos que se utilizan en pozos geotérmicos son los siguientes:

**Lodo de bentonita (base agua).** El lodo principalmente está compuesto por agua, bentonita y sosa cáustica, además de aditivos para controlar algunas condiciones del fondo del pozo, como lo son: diluyentes (controlan viscosidad y fuerza del gel), agentes de control de pérdida de fluidos, densificantes, materiales para pérdida de circulación (controlan la pérdida del fluido de perforación a la formación) y aditivos para el control de corrosión (Hole, 2008). La sosa cáustica tiene la función de controlar el pH del sistema (9 – 10), se emplea también carbonato de sodio para el tratamiento del agua de reposición antes de agregar la bentonita, no se requiere controlador de pérdida de fluido porque la bentonita también cumple esta función. Cabe mencionar que el sistema es económico y tienden los sistemas a cuidar las fuentes de agua cercanas (Erge et al., 2020).

**Lodo polimérico.** Los aditivos poliméricos principalmente cumplen funciones de mantener las condiciones reológicas y evitar que el pozo colapse. Un aspecto importante para tener en cuenta en lodos poliméricos es la selección del polímero a emplear, lo anterior debido a que funcionan usualmente por rangos de temperatura, con lo cual hay que tener principal cuidado, pues puede darse el caso de que el lodo empiece un proceso de degradación (Chemwotei, 2011).

**Lodos mezcla bentonita – polímeros.** Se suelen utilizar en secciones intermedias donde no se esperan problemas de estabilidad de pozo. Usualmente están compuestos por bentonita, defloculantes y polímeros. Las contaminaciones percibidas durante la perforación usualmente requieren de carbonato de sodio y defloculantes para su tratamiento, aunque depende del pozo principalmente (Erge et al., 2020).

**Lodos base aceite.** El diesel y aceite mineral presentan mayor estabilidad térmica y reológica, además, en términos de eficiencia de perforación son mucho mejores que los lodos a base de agua y son más costosos en comparación, además que tienen mayores implicaciones ambientales asociadas a ellos (Mohamed et al., 2021).

### ***2.10.3 Tipos de perforación geotérmica***

**Perforación con agua.** El agua es un fluido de perforación relativamente económico, puede ser usada agua dulce o salmuera de pozo. Es usada usualmente para perforar luego de una zona de pérdida no sellable. Sin embargo, los recortes no son eliminados completamente en formación, lo que puede hacer que la sarta de perforación se atasque (Hole, 2008).

**Perforación con aire y lodos aireados.** La perforación con aire se realiza al agregarse aire comprimido al sistema de circulación de fluido de perforación, dado que mantiene la circulación en éste y limpia los recortes de pozo, reduciendo el riesgo de atasco en la sarta de perforación. Se presenta reducción en la densidad de la columna a diferentes profundidades, sin embargo, en el fondo del pozo la presión hidrostática es mayor, por lo que la densidad será mayor, por otra parte, en la parte superior, la densidad del fluido será menor (Hole, 2008). Usualmente en este tipo de fluido se emplea aire o nitrógeno a alta velocidad (Karakosta et al., 2021).

**Perforación con aire y espuma.** Con la tecnología de perforación bajo balance, la espuma actúa limpiando la broca de manera más eficiente, lo que prolonga su vida útil, el proceso es más rápido, no hay atascamiento diferencial y hay mínimo daño o erosión al pozo (Ortíz, 2024).

## **2.11 Equipos y tecnologías utilizados en el completamiento de pozos geotérmicos**

### **Brocas de perforación:**

- **Brocas de rodillo con insertos de carburo de Tungsteno.** Las brocas de cono de rodillos se utilizan desde la década de 1970. Los rodillos cónicos presentes en el fondo

de estas brocas trituran y perforan la superficie de la roca, la broca gira y el cono rueda por el fondo del pozo. Hay principalmente dos tipos de dientes que se usan en los conos: (1) conos de acero fresado usadas generalmente en formaciones más blandas y (2) insertos de carburo de tungsteno que generalmente se usan para rocas más duras y una vida útil más prolongada (Lasso, 2024).

- **Brocas de compactos de diamante policristalino (PDC).** En este tipo de brocas, los diamantes están incrustados en el cuerpo de la broca. En la técnica de broca de perforación PDC, la incrustación de diamante se realiza en la formación y luego se arrastra a través de la cara de la roca en condiciones de arado, las brocas de diamante siguen el mecanismo de falla por corte. Las brocas de PDC tienen un costo más alto, pero tienen la ventaja de una vida útil larga siendo económicamente viables (Lasso, 2024).

#### **Casings:**

- **Revestimiento (Casing).** Los pozos geotérmicos necesitan tuberías de gran tamaño para poder gestionar altos volúmenes de fluido. El recubrimiento de estas tuberías debe ser capaz de resistir la corrosión y la erosión, ya que estas condiciones se ven intensificadas por las altas temperaturas y la calidad variable del fluido geotérmico.
- **Casing de Titanio.** En regiones con alta corrosión, como el Valle Imperial en California, se ha empleado revestimiento de titanio. A pesar de su alto costo, ha demostrado ser efectivo para prolongar la vida útil de los pozos en condiciones adversas.

#### **Cementación:**

- **Cementos de alta temperatura.** Los cementos empleados en pozos geotérmicos deben resistir temperaturas extremas, lo cual es fundamental para asegurar la integridad del pozo a largo plazo. Se utilizan cementos especializados a los cuales se les añade sílice para que sean capaces de soportar las altas temperaturas y las fluctuaciones térmicas características de yacimientos geotérmicos.

#### **Control y monitoreo:**

- **Sensores de temperatura y presión.** Los sistemas de sensores integrados permiten un monitoreo constante y preciso de las condiciones dentro del pozo. Este instrumento cumple la función de medir y registrar la profundidad, presión y temperatura del agua de forma simultánea cada un cierto intervalo de tiempo por lo general el instrumento se manipula mediante software, es posible configurar ciertas características del funcionamiento del sensor, entre las cuales se encuentran: unidades de medida, método de registro, intervalo de tiempo para almacenamiento, tiempo de partida y término de cada medición, nivel de agua y densidad del agua (Ochoa, 2019).
- **Herramientas de dirección de perforación.** Las herramientas rotativas direccionales permiten el direccionamiento durante la rotación, generalmente con velocidades de penetración más altas y, en última instancia, pozos más parejos. La perforación direccional es común en yacimientos de lutitas porque permite que los perforadores logren que el pozo contacte la roca prospectiva más productiva (SLB, nd).

#### **Wellhead (Cabezal de pozo):**

- **Diseño de wellheads.** Los cabezales de pozos geotérmicos están diseñados para manejar las variaciones de fluido (vapor, agua caliente, etc.) y deben ser capaces de

operar de manera segura y eficiente bajo condiciones extremas de temperatura y presión (SLB, n.d.).

**Sistemas de completamiento:**

- **Completamiento abierto (open hole).** En algunos casos, los pozos geotérmicos se completan sin revestimiento en la zona productiva para maximizar el flujo de fluido, aprovechando la permeabilidad natural de la formación (PetroWiki, 2023).
- **Liners perforados.** Utilizados en zonas productivas para controlar la producción y proteger la estructura del pozo, los liners perforados permiten la extracción eficiente del fluido geotérmico mientras protegen contra la entrada de materiales indeseables (SLB, n.d.).

### 3. Variables que influyen en la selección y diseño

Durante esta fase del proyecto, se llevó a cabo una revisión bibliográfica. En este proceso, una estrategia común para buscar artículos científicos es seleccionar o identificar palabras clave que sean relevantes y cruciales en el campo específico de estudio. Esto facilita la búsqueda y la selección inicial de publicaciones disponibles en bases de datos como ScienceDirect, Scopus o Web of Science. La aplicación libre VOSviewer se utilizó para visualizar de manera panorámica las palabras clave seleccionadas por los autores en sus artículos, destacando así la importancia y el enfoque temático de la investigación revisada. De esta manera, se determinan qué palabras clave se utilizan con más frecuencia, así como la relación entre ellas. VOSviewer proporciona una red de enlaces, un mapa visual que contiene palabras clave que se han utilizado en artículos de investigación seleccionados, a través de *clusters*, donde se organizan en grupos de enlaces entre palabras clave.

Para utilizar la aplicación VOSViewer para presentar un mapa de relaciones entre palabras clave, primero se debe estipular la ecuación de búsqueda con base en palabras específicas del tema de investigación tales como: “Completion”, “Technology” y “Geothermal well” y luego seleccionar artículos de investigación. Por tanto, el primer paso es seleccionar los artículos de investigación que serán analizados para identificar y crear un mapa de palabras clave.

**Figura 7**

*Búsqueda bibliográfica en Scopus*



Luego de realizar la búsqueda en la base de datos, se exporta un archivo .csv compatible con la aplicación VOSViewer para crear el mapa de relación.

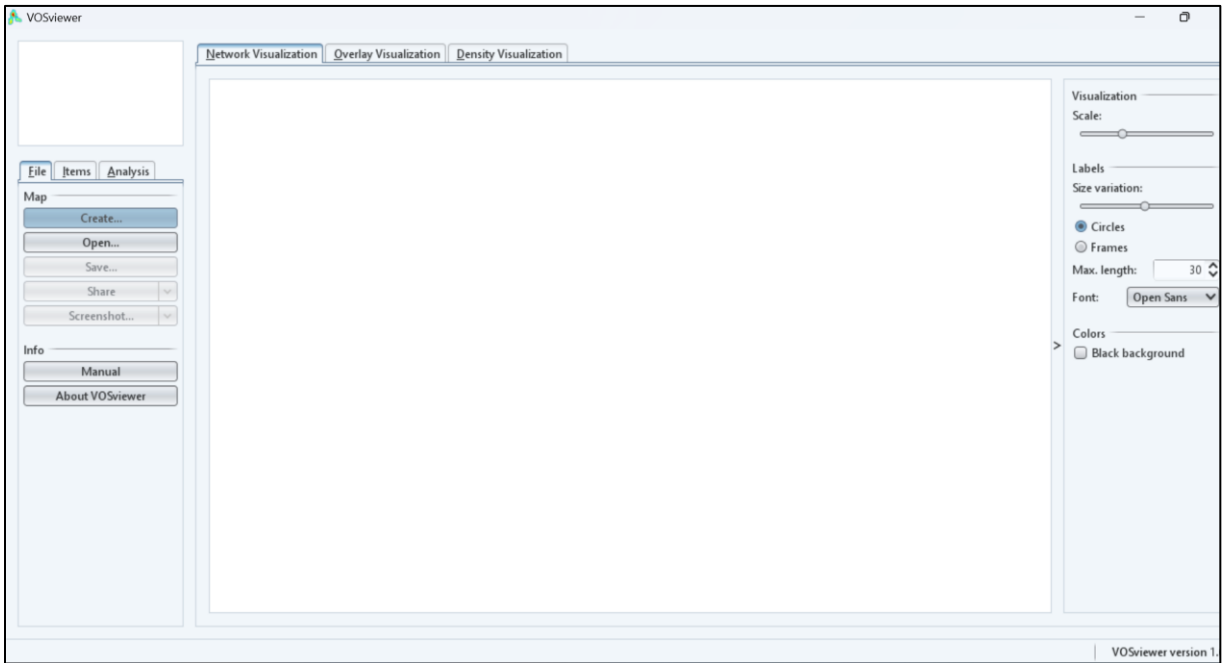
**Figura 8**

*Exportación CSV*



**Figura 9**

*Entorno aplicativo VOSViewer*

**Figura 10**

*Selección de base de datos*

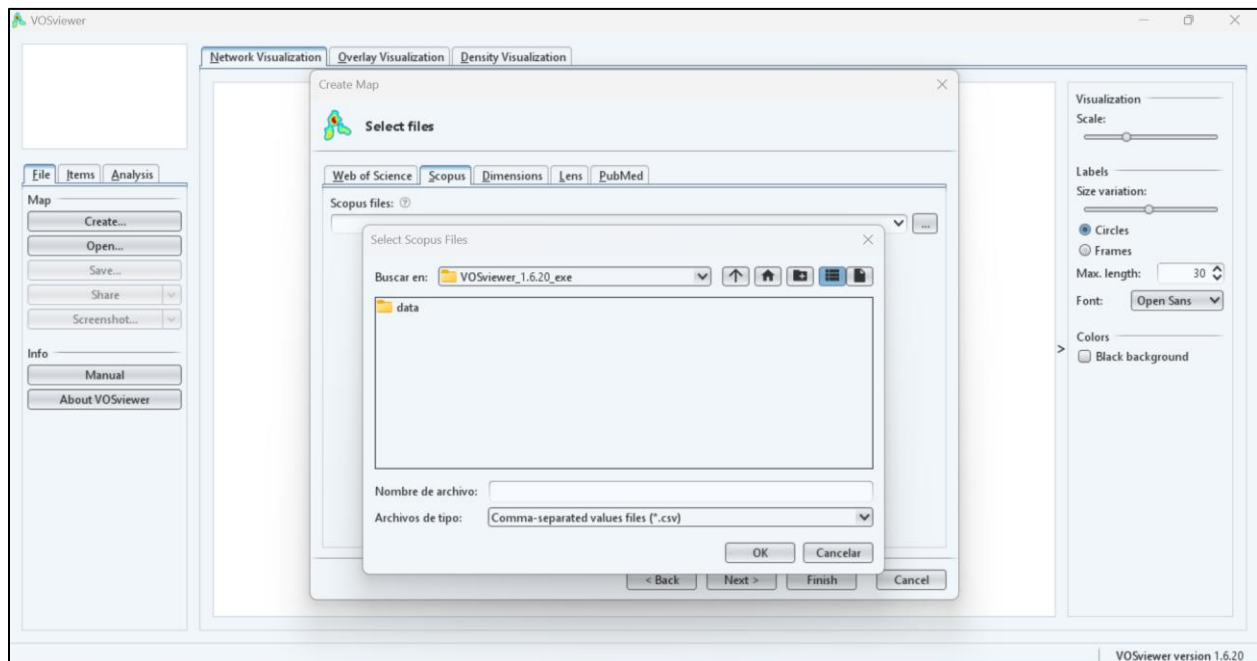


Figura 11

*Mapeo de concurrencias*

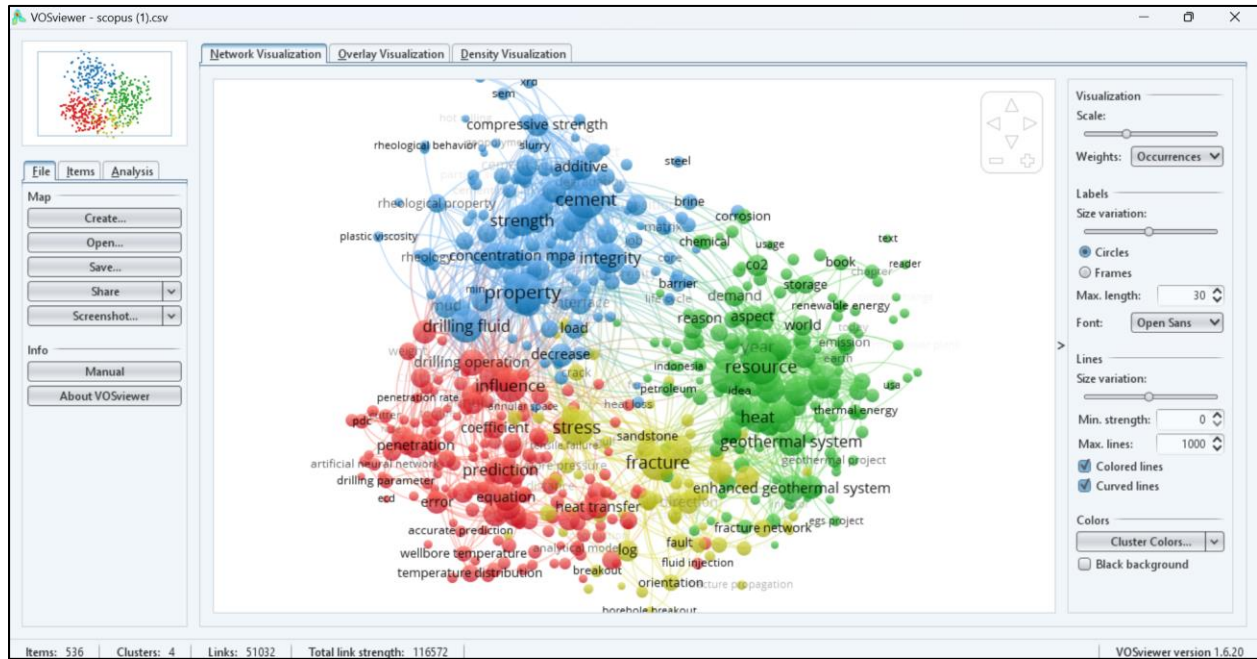
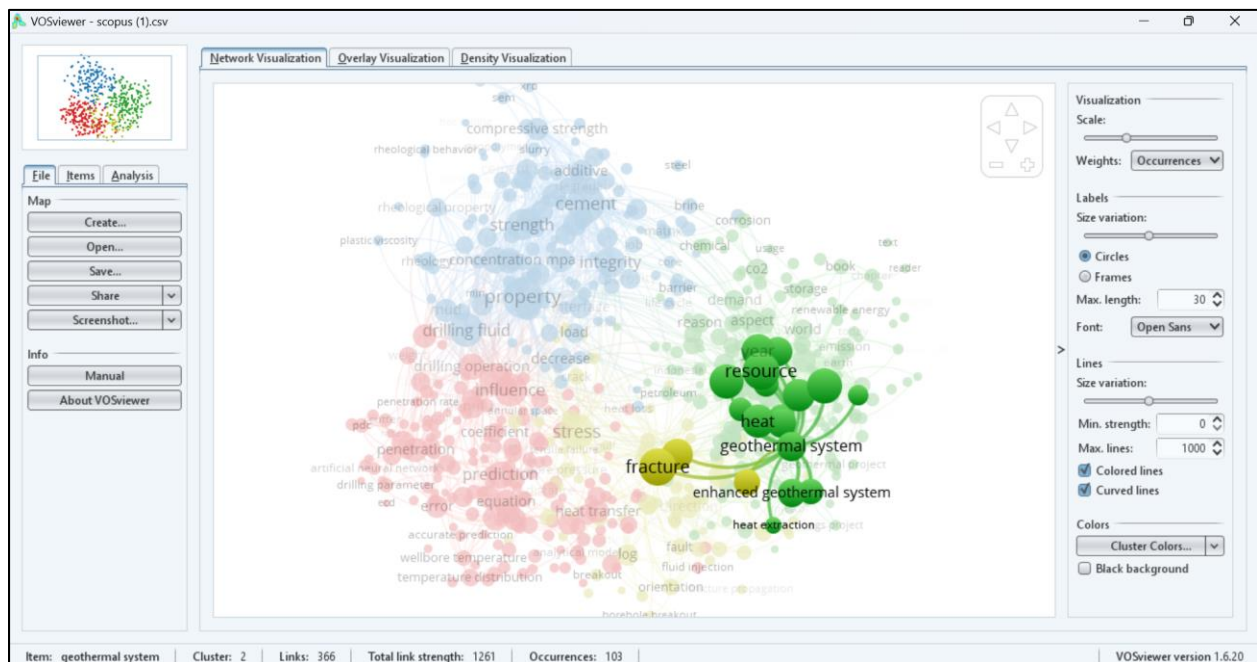


Figura 12

*Enfoque sobre sistemas geotérmicos*



Al enfocar la búsqueda bibliográfica sobre los sistemas geotérmicos, se evidencia que las concurrencias en esta búsqueda son muy bajas, por ende, se escogen los parámetros de búsqueda enfocados en documentos y textos de referencia que permiten entender cuáles son las variables que influyen sobre el proceso de revisión bibliográfica y de análisis futuro.

De la búsqueda bibliográfica y el análisis de los documentos encontrados se pudo determinar que el diseño de completamiento de pozos geotérmicos es un proceso complejo que requiere un análisis exhaustivo de diversas variables del yacimiento y del fluido geotérmico. A continuación, se detallan las propiedades y factores clave a considerar para garantizar un diseño eficiente y seguro (Merzoug & Okoroafor, 2023):

### **3.1 Temperatura del yacimiento**

La temperatura es fundamental para la eficiencia del sistema de extracción de energía. Yacimientos con temperaturas más altas permiten una mayor conversión de calor a energía eléctrica, aunque requieren materiales capaces de soportar altas temperaturas para evitar daños y fallos prematuros.

### **3.2 Presión del yacimiento**

La presión del yacimiento determina el diseño de las tuberías y las técnicas de cementación. Presiones elevadas pueden mejorar la producción de fluido, pero también exigen mayor resistencia estructural y materiales específicos para evitar fallos debido a la alta presión.

### **3.3 Composición del fluido geotérmico**

La composición química del fluido, incluyendo la salinidad y la presencia de gases disueltos, influye en la selección de materiales para las tuberías y sistemas de aislamiento. La corrosión y la incrustación son problemas comunes que deben ser mitigados mediante materiales adecuados y técnicas de completamiento específicas.

### **3.4 Propiedades petrofísicas del yacimiento**

Las propiedades petrofísicas, como la permeabilidad y porosidad del yacimiento, son cruciales para diseñar sistemas de fracturación y otros métodos de estimulación. Estos métodos mejoran la extracción de fluido en yacimientos de baja permeabilidad.

Si la porosidad de un yacimiento es alta, esto indica que tiene la capacidad de retener una mayor cantidad de fluidos, lo cual resulta beneficioso para la eficiencia en la extracción del pozo. En el proceso de diseño de completamiento, los profesionales deben escoger herramientas y métodos que aumenten al máximo la interacción con áreas de alta porosidad, ya que es en estas áreas donde se retiene la mayor cantidad de fluido geotérmico. Si la porosidad es baja, se pueden usar métodos como la fracturación hidráulica para incrementar la cantidad de espacio poroso disponible.

Si la permeabilidad del yacimiento es alta, el diseño del completamiento puede ser más simple, debido a que los fluidos pueden moverse sin limitaciones significativas. No obstante, en un yacimiento con baja permeabilidad, se requiere el uso de métodos avanzados, como la estimulación del yacimiento o la utilización de tuberías expandibles y monitoreo con fibra óptica para mejorar la producción. La permeabilidad es crucial para los pozos geotérmicos, ya que impacta directamente en la eficiencia térmica de estos. Se necesitarán más intervenciones en los sistemas de baja permeabilidad, tales como la inyección de fluidos o la estimulación térmica.

### **3.5 Sistema geotérmico y tipos de yacimientos**

Los sistemas geotérmicos se clasifican en varios tipos, como sistemas hidrotermales convectivos y sistemas de roca seca caliente. Cada tipo requiere un enfoque de diseño específico basado en sus características únicas y en las técnicas de estimulación necesarias para maximizar la producción.

### **3.6 Factores ambientales y regulatorios**

Las regulaciones ambientales y de seguridad son esenciales en el diseño del completamiento. Es necesario prevenir la contaminación del agua subterránea y minimizar las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, el diseño debe cumplir con todas las normativas locales e internacionales.

### **3.7 Costos y disponibilidad de equipos**

Los costos y la disponibilidad de equipos específicos para la industria geotérmica son factores económicos importantes. Es crucial encontrar un equilibrio entre la viabilidad económica y la eficiencia técnica del sistema, asegurando que los materiales y tecnologías utilizados sean coste-efectivos y sostenibles a largo plazo.

### **3.8 Métodos de estimulación hidráulica**

En sistemas geotérmicos mejorados (EGS), la estimulación hidráulica se utiliza para aumentar el flujo durante la circulación entre los pozos geotérmicos. Esta técnica ha demostrado ser eficaz para aumentar significativamente la producción geotérmica, aplicando principios de fracturación hidráulica en múltiples etapas.

### **3.9 Integridad del pozo y cementación**

La integridad del pozo es crucial para prevenir fugas y garantizar la seguridad a largo plazo. Los métodos de cementación y los materiales utilizados deben ser seleccionados cuidadosamente para resistir las condiciones extremas del yacimiento, incluyendo altas temperaturas y presiones. Al considerar todas estas variables en el diseño de completamiento de pozos geotérmicos, se pueden optimizar las operaciones para maximizar la eficiencia y sostenibilidad del proyecto. Este enfoque integral asegura que todas las variables críticas sean consideradas, permitiendo una explotación segura y eficiente de los recursos geotérmicos.

#### **4. Casos de estudio exitosos a nivel mundial**

De la búsqueda bibliográfica en las bases de datos mencionadas se obtuvieron los siguientes documentos académicos asociados al objetivo de la presente investigación.

##### **4.1 Completamiento de pozos geotérmicos en Laoling y Qingyan, China**

Debido a las condiciones geológicas, los pozos geotérmicos profundos en Laoling, Qingyuan y otras regiones son fáciles de producir arena y otros problemas que se presentan a largo plazo, con el fin de evitar que los pozos sean abandonados o fracasen por la producción de arena de estos se selecciona la tecnología de llenado de grava en el completamiento de pozos geotérmicos.

En el contexto del yacimiento descrito, se implementa el completamiento con grava debido a la naturaleza de la formación geológica, que es poco consolidada y presenta un alto riesgo de producción de arena y otros sedimentos durante la extracción de recursos. Este tipo de yacimientos, caracterizados por rocas sueltas y frágiles que no tienen la cohesión suficiente para mantener la integridad del pozo, requieren un soporte adicional para evitar el colapso y asegurar un flujo de producción constante y libre de partículas indeseadas. La grava actúa como un filtro y soporte estructural que estabiliza la formación sin necesidad de cementado, lo cual es beneficioso en escenarios donde el cementado podría ser ineficaz o complicado de implementar debido a las condiciones del subsuelo. Además, en este caso particular, la grava se coloca en hueco abierto, lo que permite un mejor control y manejo de las formaciones poco consolidadas, reduciendo la posibilidad de que las partículas se desplacen y entren en el flujo de producción, protegiendo así la infraestructura del pozo y optimizando la extracción del recurso.

El documento aborda de manera detallada el uso de la tecnología de relleno de grava en el completamiento de pozos geotérmicos. Con base en lo mencionado en el documento, se puede obtener la siguiente información relevante sobre el completamiento de pozos geotérmicos (Wang et al., 2014):

#### ***4.1.1 Tecnología de completamiento de pozos con relleno de grava.***

La tecnología de relleno de grava se utiliza para prevenir la producción de arena en los pozos geotérmicos. Consiste en llenar el espacio anular entre el revestimiento y la formación con grava seleccionada cuidadosamente en hueco abierto como se muestra en la Figura 13.

#### ***4.1.2 Configuración del completamiento***

##### **Selección de grava**

La gradación de la grava es crucial. Debe ser lo suficientemente fina para prevenir la entrada de arena, pero lo suficientemente gruesa para permitir el flujo de fluidos geotérmicos.

##### **Diseño del pozo**

Es esencial seleccionar una densidad de la grava adecuada para la formación geológica específica. Esto asegura que la grava pueda filtrar eficazmente la arena sin obstruir el flujo de fluidos.

##### **Espesor del relleno de grava**

Un diseño adecuado debe asegurar un espesor uniforme del relleno de la grava. Cualquier irregularidad puede comprometer la integridad del pozo y su capacidad para prevenir la producción de arena. En el documento, se mencionan casos exitosos de aplicación de esta tecnología en áreas como Renqiu, donde ha sido efectiva en reducir la producción de arena.

### Consideraciones de integridad

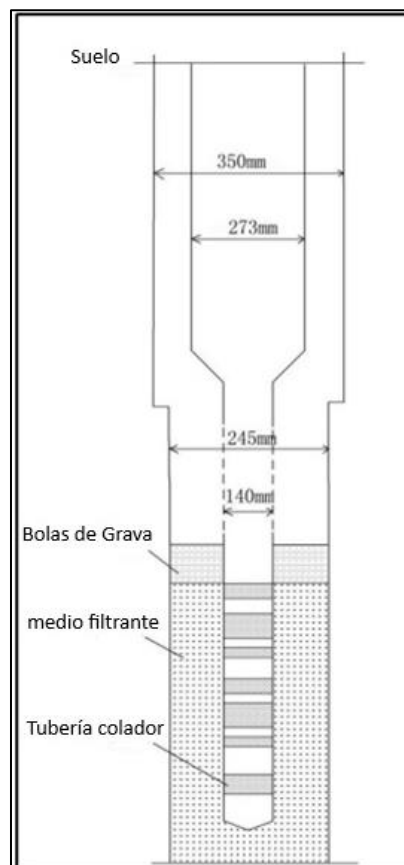
La integridad del pozo depende de la correcta implementación de la tecnología de relleno de grava, asegurando que el revestimiento permanezca estable y funcional bajo las condiciones operativas.

#### 4.1.3 Experiencias prácticas del caso de estudio

El documento presenta un caso de estudio en Qingyan, donde los pozos geotérmicos enfrentan una disminución del nivel del agua debido a la sobreexplotación, lo cual exacerba los problemas de producción de arena. La aplicación del relleno de grava en esta región ha sido crucial para mantener la funcionalidad del yacimiento.

### Figura 13

*Estructura de pozo geotérmico con relleno de grava*



*Nota:* adaptado de *Study on application of geothermal well gravel-filling technology in loose rock areas* (Wang et al., 2014)

## **4.2 Completamiento de pozos geotérmicos en Zhengzhou, China**

### **4.2.1 Tecnología de completamiento con tubos PVC-U**

El documento analiza la tecnología de completamiento con tubos de PVC-U en proyectos de desarrollo geotérmico poco profundo. Se describen dos proyectos específicos de completamiento de pozos geotérmicos en la ciudad de Zhengzhou, China, utilizando tuberías de PVC-U a profundidades de 400 y 437 metros. El documento menciona que la temperatura máxima ambiental permitida para la operación de los tubos de PVC-U es de 60 °C, y se deben evitar los impactos en los procesos de transporte y completamiento si la temperatura ambiente supera este valor, más, sin embargo, en el documento no se especifican las temperaturas asociadas al yacimiento. Se destacan las ventajas y desafíos de usar tuberías de PVC-U en comparación con las tuberías de acero tradicionales (Lu & Ying, 2010).

### **4.2.2 Configuración de los pozos**

El documento se centra en pozos geotérmicos de baja profundidad, utilizando tuberías de PVC-U. Para esto se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros:

#### **Equipos de perforación**

Se utilizó una máquina perforadora Hongxing-400, adecuada para profundidades de hasta 600 metros. Se empleó una bomba de lodo BW850/50 con una broca de roca de tres conos y un tubo de perforación de  $\Phi$  89 mm.

## **Materiales de completamiento**

PVC-U, tuberías de cloruro de polivinilo de alta intensidad, livianas, no corrosivas, y con una vida útil estimada de 50 años. Acero, tradicionalmente utilizado, pero presenta problemas de corrosión e incrustaciones.

## **Diseño del Pozo**

La estructura del pozo requiere un mayor espacio entre el yacimiento y el revestimiento cuando se utilizan tubos de PVC-U. Ejemplos de diseño en el documento muestran estructuras de  $\Phi$  450 mm y  $\Phi$  315 mm para profundidades de 0 a 150 metros (ver Figura 14).

### ***4.2.3 Comprobación y manipulación de tuberías de PVC-U***

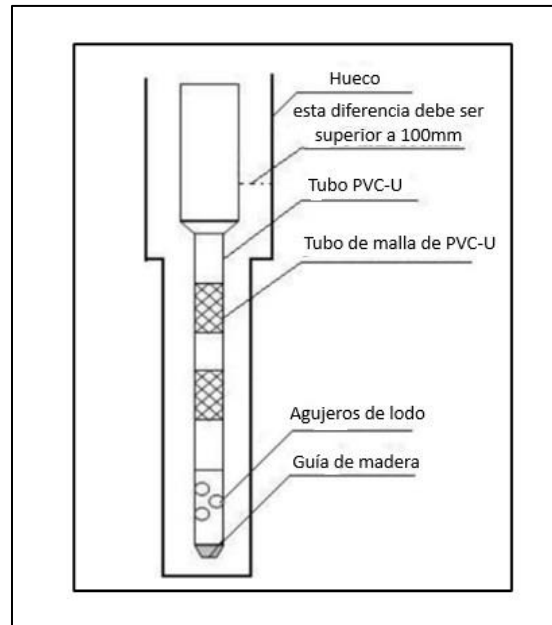
Las tuberías de PVC-U tienen menos resistencia al impacto y pueden dañarse fácilmente durante el transporte y manipulación. Se necesita una revisión exhaustiva para evitar la introducción de tubos dañados en el pozo.

**Ventajas:** Livianas, no corrosivas y más fáciles de manejar en comparación con las tuberías de acero. Mayor vida útil y menores costos de transporte y producción.

El uso de tuberías de PVC-U en completamiento de pozos geotérmicos de baja profundidad representa una alternativa viable y eficiente en comparación con las tuberías de acero tradicionales. A pesar de los desafíos, como la menor resistencia al impacto y las restricciones de temperatura, las ventajas en términos de peso, resistencia a la corrosión y vida útil prolongada las convierten en una opción atractiva para proyectos de desarrollo geotérmico.

**Figura 14**

*Croquis del tubo de pozo de PVC-U.*



*Nota:* adaptado de *PVC U-tube Drilling and Completion Technology in Shallow Geothermal Development* (Lu & Ying, 2010).

### **4.3 Completamiento de pozos geotérmicos en California, USA**

En el completamiento de pozos en yacimientos geotérmicos es crucial tener presentes las condiciones extremas, como altas temperaturas, salmueras corrosivas, y la presencia de gases, como  $CO_2$  y  $H_2S$  para el diseño del completamiento y la selección de materiales. A continuación, se analizan las tecnologías y configuraciones utilizadas en estos escenarios (Hernández et al., n.d.)

#### **4.3.1 Tecnología de centralizadores cerámicos compuestos**

El uso de centralizadores de compuestos cerámicos y de fibra de carbono mejora el soporte estructural, lo que es crucial para mantener la integridad del pozo bajo condiciones extremas.

**Materiales utilizados en el completamiento del pozo (aleaciones de acero inoxidable)**

El uso de aleaciones de acero inoxidable es fundamental debido a la corrosión severa causada por las salmueras calientes y de alta salinidad. Se ha identificado una aleación de acero inoxidable que es resistente a estas condiciones y puede ser una alternativa rentable al titanio. En los pozos geotérmicos, todas las sartas están cementadas a la superficie. Esto previene el pandeo causado por la expansión térmica y protege la tubería de la corrosión externa.

#### **Materiales utilizados en el completamiento del pozo (centralizadores compuestos)**

Para evitar la corrosión galvánica, se utilizan centralizadores compuestos de cerámica y fibra de carbono en una matriz de resina novolaca. Estos materiales son completamente no metálicos e inertes, proporcionando resistencia a la abrasión y al impacto, además de soportar altas temperaturas y resistir químicamente.

#### **Figura 15**

*Centralizadores moldeados a medida en el casing*



*Nota.* Adaptado de *Composite Ceramic Centralizers—An Innovative Solution for Geothermal Well Construction in Highly Corrosive Environments: Case History* (Hernandez, Chandarjit, Levie, 2010).

#### **4.3.2 Configuraciones de completamiento (desafíos de cementación)**

Un desafío específico es asegurar la integridad del revestimiento superdúplex (casing de acero inoxidable) y evitar la corrosión galvánica, que ocurre cuando dos metales diferentes se conectan eléctricamente en una solución electrolítica.

#### **Consideraciones específicas de completamiento (prevención de la corrosión galvánica)**

La corrosión galvánica es un problema significativo debido a la naturaleza electrolítica de la salmuera. Para mitigarlo, se recomienda una separación adecuada durante la cementación para asegurar el desplazamiento del lodo y la colocación adecuada del cemento.

### **Figura 16**

*Moldes de plástico fijados en la tubería*



*Nota.* Adaptado de *Composite Ceramic Centralizers—An Innovative Solution for Geothermal Well Construction in Highly Corrosive Environments: Case History* (Hernandez, Chandarjit, Levie, 2010).

El completamiento de pozos en yacimientos geotérmicos requiere materiales y configuraciones que puedan soportar condiciones extremas de corrosión y temperatura. Las aleaciones de acero inoxidable, las tuberías compuestas, han demostrado ser efectivas en diversas aplicaciones. La cementación adecuada y el uso de centralizadores avanzados son esenciales para mantener la integridad del pozo y prolongar su vida útil.

#### **4.4 Completamiento para aplicaciones geotérmicas en el sur de Alemania**

Para proporcionar un enfoque más detallado y específico sobre el completamiento del pozo en yacimientos geotérmicos, se le dará enfoque a la información relevante del documento relacionada con este tema. Se analizaron las tecnologías y métodos de completamiento utilizados, sus ventajas y desventajas, así como recomendaciones específicas (Oppelt & Lehr, 2012).

Las tecnologías y métodos de completamiento identificados en el documento fueron los siguientes:

#### ***4.4.1 Tecnología de tuberías expandibles***

Las tuberías expandibles se insertan en el pozo y se expanden para formar una barrera continua y ajustada contra la pared del pozo.

Algunas ventajas son la reducción de la necesidad de diferentes diámetros de revestimiento, mejorando la integridad del pozo al eliminar las discontinuidades en las paredes y facilitando la reparación y mantenimiento posterior del pozo.

Entre las desventajas a mencionar es que dicha tecnología requiere equipos especializados y técnicas avanzadas para la expansión in situ, así como costos iniciales más altos en comparación con las tuberías tradicionales.

#### ***4.4.2 Tecnología de cementación de alta integridad***

Uso de cementos avanzados que se adaptan a las altas temperaturas y presiones de los yacimientos geotérmicos, proporcionando una barrera efectiva contra la migración de fluidos.

Como ventajas, se tiene que dicho cemento asegura la estabilidad estructural del pozo, previene la contaminación de acuíferos y la pérdida de fluido geotérmico y mejora la eficiencia térmica del pozo.

El costo debido a la necesidad de cementos especiales y técnicas de aplicación avanzadas puede ser tomado como una desventaja.

#### ***4.4.3 Tecnología de completamiento multilateral***

Utilización de múltiples ramas de pozo que se extienden desde un único pozo vertical principal para acceder a una mayor área del reservorio geotérmico.

El completamiento multilateral aumenta la eficiencia de extracción al cubrir una mayor superficie del reservorio, reduciendo la necesidad de perforar múltiples pozos verticales y mejora la recuperación de calor y la eficiencia del sistema geotérmico.

Como desventajas, se tiene que el diseño y la construcción son complejos y requieren de habilidades especializadas y costos iniciales más elevados debido a la tecnología avanzada necesaria.

### **Sistemas de Control de Flujo**

Implementación de válvulas y dispositivos de control para regular la entrada y salida de fluidos geotérmicos y controlar la presión dentro del pozo.

Estos sistemas, al permitir el control preciso de la producción y la inyección de fluidos, permiten obtener mayor seguridad operativa y una mejor gestión de la presión en el pozo, facilitando la optimización de la extracción de energía.

Al ser sistemas complejos que requieren mantenimiento regular, están expuestos a una posibilidad de fallos mecánicos en condiciones extremas, generando una desventaja.

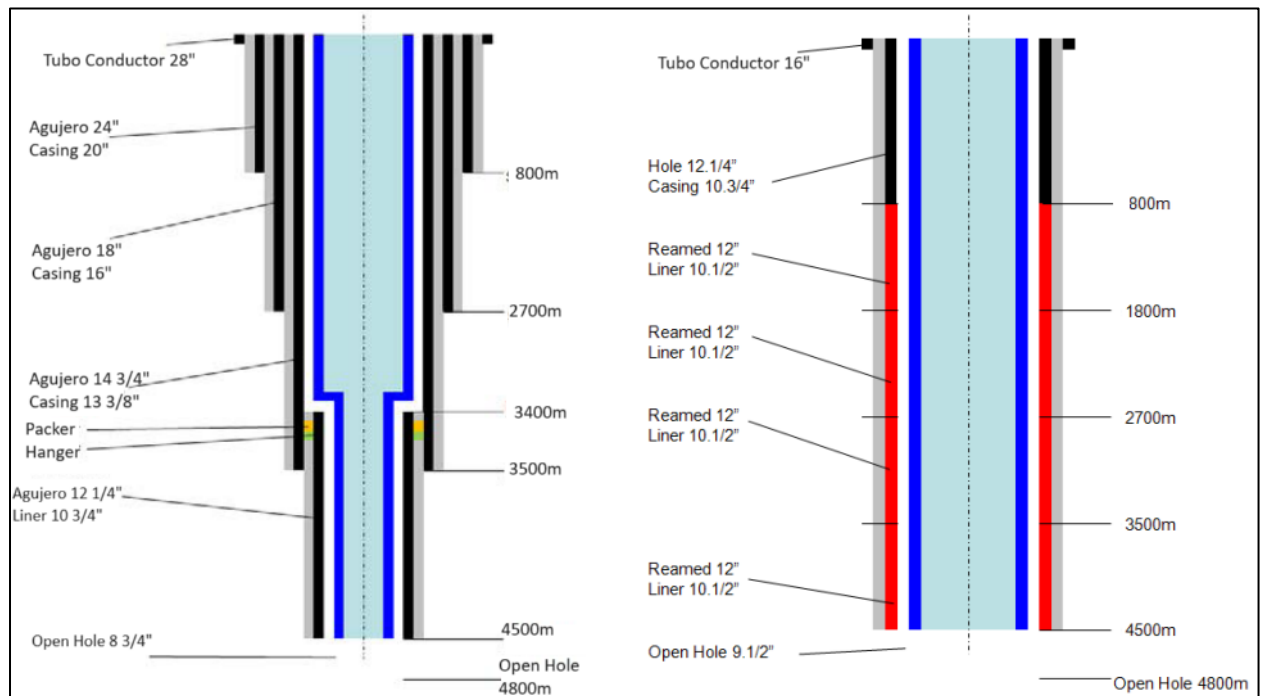
#### ***4.4.4 Configuración de los pozos aplicando el concepto mono-diámetro***

El completamiento de pozos en yacimientos geotérmicos es un proceso complejo que requiere la integración de diversas tecnologías y métodos para asegurar la eficiencia y la sostenibilidad de las operaciones. Las tecnologías de tuberías expandibles, cementación avanzada, y sistemas de control de flujo son esenciales para maximizar la producción y minimizar los riesgos. Aunque los costos iniciales pueden ser altos, la inversión en tecnologías avanzadas y prácticas de completamiento efectivas puede llevar a ahorros significativos y a una operación más segura y eficiente a largo plazo.

De acuerdo con la Figura 17, el uso de un pozo de un mono diámetro tiene varias ventajas importantes. En primer lugar, puede generar importantes ahorros en los costos de construcción; se estima que los costos totales se pueden reducir hasta en un 30 % mediante tecnologías innovadoras y automatizadas. Además, este diseño simplifica la estructura del pozo, elimina la necesidad de estructuras telescópicas tradicionales y reduce la cantidad de materiales necesarios, optimizando la eficiencia de la construcción. La consistencia del diámetro hace que las operaciones de perforación y terminación sean más fáciles de administrar, mejorando la eficiencia operativa mediante la implementación de sistemas automatizados de perforación y perforación de circuito cerrado. De manera similar, aunque su aplicación depende de las condiciones geológicas, el diseño de diámetro único es particularmente ventajoso en zonas de presión normal, aunque puede tener limitaciones en zonas de sobrepresión. En resumen, este diseño se enfoca en reducir costos, simplificar la estructura, mejorar la eficiencia operativa y adaptarse a condiciones geológicas específicas, lo que lo convierte en una opción factible y efectiva para la construcción de pozos.

**Figura 17**

*Comparación del diseño estándar y mono diámetro para un pozo geotérmico sintético de 4.500 m de profundidad en el sur de Alemania*



*Nota:* adaptado de *Innovative Drilling and Completion Concept for Geothermal Applications* (Oppelt & Lehr, 2012)

#### 4.5 Completamiento de pozos en Los Ángeles Campo Geotérmico Humeros, México

El completamiento de pozos en el Campo Geotérmico Los Humeros (LHGF) es un proceso clave que se enfoca en preparar el pozo para la producción de fluidos geotérmicos. Esto incluye la instalación de tuberías de revestimiento, cementación, y la implementación de sistemas de control de flujo y mantenimiento de la integridad estructural del pozo en condiciones extremas de temperatura y presión (Kruszewski et al., 2018):

#### ***4.5.1 Técnicas de completamiento multilateral y sistemas de monitoreo continuo***

Se considera el uso de técnicas de completamiento multilateral, donde múltiples ramas del pozo se extienden desde un pozo principal, permitiendo un acceso más amplio al reservorio geotérmico y mejorando la eficiencia de extracción.

Al mejorar la recuperación de calor, permite la producción de fluidos geotérmicos de forma más eficiente, reduciendo la necesidad de perforar múltiples pozos verticales, generando una ventaja en la técnica.

Asimismo, se implementan tecnologías de monitoreo continuo para detectar problemas de flujo, corrosión e integridad estructural en tiempo real, permitiendo una intervención temprana y reduciendo el riesgo de fallas.

El completamiento de pozos en el Campo Geotérmico Los Humeros presenta desafíos significativos debido a las condiciones extremas de temperatura y la naturaleza corrosiva de los fluidos geotérmicos. La implementación de tecnologías avanzadas, la selección cuidadosa de materiales y el uso de técnicas innovadoras son esenciales para asegurar la integridad y la eficiencia de los pozos. Al abordar estos desafíos con soluciones específicas y efectivas, se puede mejorar la producción geotérmica y asegurar una operación segura y sostenible a largo plazo.

#### ***4.5.2 Configuración de los diferentes pozos***

##### **Revestimiento del pozo**

El diseño típico en el LHGF incluye múltiples secciones de revestimiento que aseguran la integridad estructural del pozo y previenen la comunicación entre diferentes zonas de formación. El revestimiento es crucial para mantener la estabilidad del pozo y protegerlo contra la corrosión y la acción agresiva de los fluidos geotérmicos.

**Materiales usados**

Se seleccionan materiales de alta resistencia a la corrosión como el acero inoxidable, las aleaciones a base de níquel, los aceros de titanio y los materiales metálicos compuestos para soportar la presencia de compuestos corrosivos como boro, amoníaco y arsénico en los fluidos geotérmicos.

**Uso de revestimientos especiales**

Implementación de revestimientos con alta resistencia a la corrosión y capacidad de soportar altas temperaturas, incluyendo el uso de tuberías expandibles para mejorar la integridad del pozo.

**Cementación del pozo**

La cementación es fundamental para aislar las diferentes capas geológicas, prevenir la migración de fluidos y asegurar la integridad estructural del pozo.

**Materiales y técnicas**

Se utilizan cementos especializados capaces de soportar altas temperaturas y resistir la corrosión. Además, se emplean técnicas avanzadas para asegurar la correcta colocación y fraguado del cemento, minimizando el riesgo de fallas estructurales.

**Pérdida de integridad del cemento**

Las fluctuaciones térmicas y las altas temperaturas pueden causar fisuras y deterioro en el cemento, comprometiendo la seguridad y efectividad del pozo.

**Cementación avanzada**

Empleo de cementos de alta tecnología que mantengan su integridad a temperaturas extremas y resistan la acción de fluidos agresivos. Se recomiendan técnicas de cementación que aseguren una adherencia y durabilidad óptimas.

***4.5.3 Sistemas de control de flujo y factores a tener en consideración***

Estos sistemas permiten el control preciso de la entrada y salida de fluidos geotérmicos, lo que es esencial para la operación eficiente y segura del pozo.

Entre los componentes se incluyen válvulas de control, sensores de presión y temperatura, y dispositivos para regular el flujo de fluidos, asegurando una operación óptima bajo condiciones extremas.

**Incrustaciones**

Los depósitos de minerales en las tuberías pueden obstruir el flujo y reducir la eficiencia del pozo.

**Corrosión**

La naturaleza corrosiva de los fluidos geotérmicos en el LHGF plantea un riesgo significativo para la integridad del revestimiento y otros componentes del pozo. Como se puede evidenciar en la Figura 18, los altos niveles de corrosión hacen que el fenómeno esté presente incluso en el wellhead del pozo, llegando a tomar medidas drásticas como lo es el abandono de este.

**Figura 18**

*Cabeza de pozo H-43 abandonada en LHGF*



*Nota.* Fotografía tomada por Michal Kruszewski. Adaptado de *Drilling and Well Completion Challenges in the Los Humeros Geothermal Field, Mexico* (Kruszewski et al., 2018).

#### **4.6 Completamiento de pozos en Los Ángeles Campo Geotérmico Los Humeros, México**

El completamiento de pozos geotérmicos es un proceso crucial que implica el uso de tecnologías avanzadas y configuraciones específicas para asegurar la eficiencia y sostenibilidad de la extracción de energía geotérmica. Este análisis se basa en las prácticas y técnicas empleadas en el campo geotérmico de Los Humeros en México (Kruszewski et al., 2018).

El documento aborda factores a consideración, como lo son las temperaturas extremas (a menudo superiores a 300 °C), las cuales requieren materiales y tecnologías capaces de resistir estas condiciones.

##### ***4.6.1 Tecnología de métodos de producción dual para el completamiento***

Esta tecnología permite la producción simultánea de vapor y líquido desde diferentes zonas del pozo empleando revestimientos duales. A veces se utilizan dos capas de revestimiento para proporcionar una protección adicional contra las altas temperaturas y la corrosión.

#### ***4.6.2 Sistemas de separación de vapor***

Diseñados para maximizar la eficiencia de la producción de vapor, separando eficazmente el líquido geotérmico y reinyectando el exceso.

Para mejorar el completamiento de pozos geotérmicos, se recomienda la implementación de Sensores Avanzados: para un monitoreo continuo y en tiempo real de las condiciones del pozo.

El análisis del documento subraya la importancia de utilizar tecnologías avanzadas y configuraciones específicas en el completamiento de pozos geotérmicos para superar los desafíos técnicos y operacionales. La implementación de revestimientos especializados, cementos resistentes a altas temperaturas, y sistemas de manejo de fluidos son esenciales para la eficiencia y sostenibilidad de los proyectos geotérmicos.

#### ***4.6.3 Desafíos de los completamientos de los pozos***

Los fluidos geotérmicos suelen ser altamente corrosivos debido a la presencia de gases disueltos como el H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>.

La precipitación de minerales en el interior del pozo puede obstruir el flujo de fluidos.

Los materiales que se empleen deben ser resistentes a la corrosión. En el documento especifican que los tubos de revestimiento están hechos de materiales como aceros de alta aleación y compuestos no metálicos para resistir la corrosión.

En el documento también se mencionan los inhibidores de corrosión e incrustaciones, los cuales se aplican a través de tratamientos químicos para prevenir tanto la corrosión como la formación de depósitos en el interior del pozo y en los equipos de superficie.

Para contrarrestar los diferentes desafíos, emplean cementos especiales formulados para soportar altas temperaturas y minimizar la expansión térmica que podría comprometer la

integridad del pozo, empleando técnicas de cementación avanzada que incluyen métodos como la cementación forzada y la cementación con aditivos para mejorar la resistencia y durabilidad del sello.

### **Separación y manejo de fluidos**

Se utilizan sistemas avanzados de separación de vapor y líquidos geotérmicos, con reinyección del líquido para mantener la presión del yacimiento y minimizar el impacto ambiental, teniendo en cuenta que la reinyección de líquidos es importante para mantener la presión del yacimiento y la sostenibilidad del recurso geotérmico.

### **4.7 Inspección de casing emergente en pozos geotérmicos**

El documento proporciona una visión detallada sobre diversas tecnologías y metodologías utilizadas en la industria geotérmica, con un enfoque particular en el completamiento de pozos geotérmicos. A continuación, se presenta un análisis detallado de los aspectos más relevantes relacionados con el completamiento de estos pozos, destacando las tecnologías avanzadas y las configuraciones empleadas para maximizar la eficiencia y la seguridad de las operaciones geotérmicas (Sledz et al., 2020).

#### ***4.7.1 Tecnología de inspección y monitoreo de pozos***

Una de las tecnologías destacadas en el documento es el uso de herramientas avanzadas de inspección de casings como el Vulcan MFT-40, que permiten a los operadores realizar investigaciones in situ sobre la integridad del pozo sin necesidad de enfriamiento. Esta tecnología es crucial para mantener la integridad estructural de los pozos geotérmicos que operan a altas temperaturas, minimizando los riesgos asociados con los ciclos térmicos que pueden afectar negativamente tanto al revestimiento como al cemento del pozo.

#### ***4.7.2 Herramientas de registro en alta temperatura***

El documento resalta la limitación histórica de herramientas de registro de fondo de pozo capaces de operar a temperaturas superiores a 175°C. Para superar estas limitaciones, se han desarrollado nuevas tecnologías que permiten la adquisición de datos en condiciones extremas sin la necesidad de enfriar el pozo, lo cual es esencial para reducir el tiempo de inactividad y los costos operativos asociados con el enfriamiento y el reacondicionamiento de pozos.

#### ***4.7.3 Configuraciones de completamiento***

El diseño de programas de revestimiento y la selección de fluidos de perforación adecuados son elementos críticos en el completamiento de pozos geotérmicos. El documento menciona las prácticas adoptadas en el Campo Geotérmico Los Humeros (LHGF), donde se enfrentan desafíos como la corrosión, incrustaciones y pérdidas de circulación. La adecuada selección y manejo de estos componentes son vitales para asegurar la estabilidad del pozo y la eficiencia en la producción de fluidos geotérmicos.

#### ***4.7.4 Integridad del cemento***

El análisis estructural del cemento utilizado en los pozos geotérmicos es fundamental para asegurar la integridad a largo plazo del pozo. El documento subraya la importancia de evaluar las condiciones críticas del esfuerzo del cemento y su propagación de daño, especialmente en áreas con altos gradientes de temperatura. Este tipo de análisis permite derivar requisitos y recomendaciones clave para el diseño de la terminación del pozo, garantizando así la seguridad y eficiencia de las operaciones.

El análisis del documento evidencia la importancia de utilizar tecnologías avanzadas de inspección y monitoreo, así como la correcta configuración de programas de revestimiento y fluidos de perforación, para el completamiento efectivo de pozos geotérmicos. Estas prácticas no

solo mejoran la eficiencia operativa, sino que también aseguran la integridad estructural de los pozos, permitiendo una explotación más segura y sostenible de los recursos geotérmicos.

#### **4.8 Aislamiento multizona en pozos horizontales en un entorno geotérmico**

El completamiento de pozos geotérmicos, especialmente en sistemas geotérmicos mejorados (EGS), requiere técnicas avanzadas de aislamiento multizona para maximizar la eficiencia de la extracción de calor y minimizar los costos operativos. La adopción de estas técnicas de la industria petrolera puede ofrecer soluciones innovadoras, pero se deben abordar ciertos desafíos específicos del entorno geotérmico (Olson et al., 2015).

##### ***4.8.1 Tecnología Plug and Perf***

Consiste en la colocación de tapones de cemento o de otros materiales en el pozo, seguido de la perforación de intervalos específicos a través de los cuales se realizará la estimulación hidráulica.

La flexibilidad en la creación de múltiples fracturas en ubicaciones precisas dentro del pozo se considera una ventaja.

**Materiales resilientes.** Los tapones y herramientas utilizadas deben soportar temperaturas extremas, típicamente superiores a 150-200°C, y presiones elevadas.

**Procedimientos térmicos.** Ajustes en los procedimientos para manejar la expansión térmica y los cambios en la viscosidad de los fluidos de trabajo.

##### ***4.8.2 Tecnología Port and Packer***

Utiliza sistemas de empaquetadores (packers) y puertos para aislar zonas específicas del pozo y facilitar la estimulación controlada en esas zonas.

Este sistema proporciona un aislamiento efectivo y permite el control preciso de las fracturas inducidas.

**Empaquetadores de alta temperatura.** Desarrollo de empaquetadores que mantengan su integridad y funcionen eficazmente en condiciones geotérmicas de alta temperatura.

**Sistemas de control.** Integración de sistemas avanzados de monitoreo para garantizar que el aislamiento se mantenga durante la vida útil del pozo.

#### ***4.8.3 Desafíos específicos en el completamiento de pozos multizona***

**Desempeño de materiales.** Los materiales utilizados en el completamiento deben mantener su integridad estructural y funcional en condiciones de alta temperatura ( $>200^{\circ}\text{C}$ ) y alta presión ( $>5000$  psi).

**Estabilidad química.** Los materiales deben ser químicamente estables y no reaccionar con los fluidos geotérmicos, que pueden contener minerales y compuestos corrosivos.

**Aislamiento eficaz.** Mantener un aislamiento zonal efectivo para prevenir la comunicación entre zonas de producción y de inyección.

**Sellos duraderos.** Uso de empaquetadores y sellos que no se degraden bajo condiciones de alta temperatura y presión.

**Selección de materiales.** Elegir materiales que sean compatibles con los fluidos geotérmicos y que no sufran degradación prematura.

**Resistencia al desgaste.** Los componentes deben resistir el desgaste mecánico causado por los sólidos en suspensión en los fluidos geotérmicos.

### **4.9 Completamiento de pozos en Austria, Alemania, Polonia y Hawaii.**

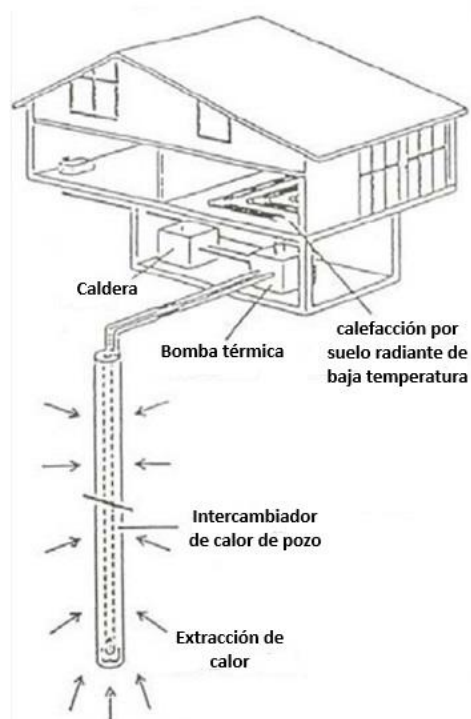
#### ***4.9.1 Tecnología de intercambiadores de calor de pozo (BHE)***

La tecnología de intercambiadores de calor de pozo (BHE) es una solución innovadora utilizada en el completamiento de pozos para la explotación geotérmica. Esta tecnología permite la transferencia de calor desde el subsuelo hacia la superficie a través de un sistema de bucle

cerrado, evitando la extracción directa de fluidos geotérmicos. Es particularmente útil en aplicaciones de energía geotérmica tanto poco profunda como profunda (Okech et al., 2015).

### Figura 19

*El concepto de BHE*



*Nota.* El concepto BHE puede ampliarse para su instalación en pozos más profundos, que suelen ser pozos geotérmicos secos abandonados o pozos exploratorios. Adaptado de *Unconventional Completion Design for Deep Geothermal Wells* (Okech et al., 2015).

#### 4.9.2 Diseño y configuración del sistema BHE

**Bucle cerrado.** El sistema BHE utiliza un circuito cerrado de tuberías, a menudo llenas de un fluido térmico, que se instala en el pozo. Este bucle cerrado permite la circulación continua del fluido, que se calienta al pasar por la zona geotérmica caliente y transfiere ese calor a la superficie.

**Materiales y estructura.** Las tuberías del BHE están hechas de materiales resistentes a altas temperaturas y presiones, como el acero inoxidable o polímeros específicos, para garantizar durabilidad y eficiencia térmica.

#### ***4.9.3 Características clave del completamiento con tecnología BHE***

**Eficiencia térmica.** La eficiencia en la transferencia de calor es una característica esencial del sistema BHE. La configuración del pozo y la elección del fluido térmico son cruciales para maximizar la eficiencia.

**Compatibilidad geológica.** Los BHE pueden adaptarse a diferentes formaciones geológicas. La estructura del pozo y el diseño del intercambiador de calor deben considerar las características del subsuelo, como la conductividad térmica y la permeabilidad de las rocas.

**Minimización del impacto ambiental.** Al no requerir la extracción de fluidos geotérmicos, los sistemas BHE reducen significativamente el impacto ambiental, evitando problemas asociados con la reinyección de fluidos y la sismicidad inducida.

**Costos y viabilidad económica.** Aunque la instalación inicial de los BHE puede ser costosa, los costos operativos a largo plazo son relativamente bajos. La vida útil prolongada y el bajo mantenimiento contribuyen a la viabilidad económica del sistema.

Para realizar el completamiento del pozo con tecnología BHE se tienen en cuenta los siguientes pasos.

**1. Evaluación geológica.** Se realiza un estudio geológico para determinar la idoneidad del sitio y las características térmicas del subsuelo.

**2. Perforación del pozo.** Se perfora el pozo hasta la profundidad deseada, asegurando que las paredes del pozo sean estables y adecuadas para la instalación del sistema BHE.

**3. Instalación del BHE.** Las tuberías del intercambiador de calor se instalan dentro del pozo. Este proceso incluye la colocación de las tuberías en una configuración que maximice la transferencia de calor.

**4. Conexión y sellado.** Las tuberías del BHE se conectan al sistema de superficie para permitir la circulación del fluido térmico. El pozo se sella adecuadamente para prevenir fugas y asegurar la integridad del sistema.

**5. Puesta en marcha y monitoreo.** El sistema se pone en funcionamiento y se monitoriza para asegurar que la transferencia de calor se realice de manera eficiente y segura.

Los beneficios que resalta el documento en cuanto al uso de la tecnología BHE:

- **Sostenibilidad.** Los sistemas BHE proporcionan una fuente de energía renovable y sostenible, contribuyendo a la reducción de la dependencia de combustibles fósiles.
- **Reducción de riesgos.** Al eliminar la necesidad de extraer fluidos geotérmicos, se reducen los riesgos asociados con la sismicidad inducida y la contaminación de acuíferos.
- **Flexibilidad de aplicación.** Los BHE pueden ser utilizados tanto en aplicaciones de calefacción y refrigeración residencial como en proyectos de generación eléctrica a mayor escala.

Por otro lado, también se presentan algunos desafíos y consideraciones técnicas que se deben tener en cuenta al implementar esta tecnología, los cuales son:

**Costos iniciales.** La instalación inicial de un sistema BHE puede ser costosa, requiriendo una inversión significativa en la perforación y la instalación del intercambiador de calor.

**Condiciones geotérmicas.** La eficacia del sistema BHE depende en gran medida de las condiciones geotérmicas del subsuelo, como la temperatura y la conductividad térmica de las formaciones rocosas.

**Tecnología de materiales.** La selección de materiales resistentes y duraderos es crucial para asegurar la longevidad y eficiencia del sistema.

La tecnología BHE ofrece una solución eficiente y sostenible para el completamiento de pozos geotérmicos. Su capacidad para transferir calor sin extraer fluidos geotérmicos presenta ventajas significativas en términos de impacto ambiental y viabilidad económica a largo plazo. No obstante, la implementación exitosa de esta tecnología requiere una cuidadosa planificación y evaluación geológica, así como una inversión inicial considerable. Integrar estos aspectos en el completamiento del pozo garantiza una explotación geotérmica eficiente y sostenible.

#### **4.10 Completamiento de pozos geotérmicos en Nevada, USA**

##### ***4.10.1 Tecnología de optimización de completamientos con fibra óptica***

La tecnología de fibra óptica se ha convertido en una herramienta crucial para el completamiento de pozos, proporcionando datos precisos y en tiempo real sobre diversas condiciones dentro del pozo. Esto incluye la detección distribuida de temperatura (DTS), acústica (DAS) y esfuerzo (DSS). Estas tecnologías permiten una monitorización continua y detallada, mejorando la eficiencia y eficacia del proceso de completamiento del pozo (Titov et al., 2023).

##### ***4.10.2 Componentes y configuraciones de la tecnología de fibra óptica***

**Cables de fibra óptica cementados.** Los cables de fibra óptica se cementan detrás de la carcasa del pozo, permitiendo la adquisición continua de datos durante y después del proceso de completamiento.

**Sensores DTS, DAS y DSS.** Estos sensores integrados en los cables de fibra óptica permiten la detección distribuida de temperatura, acústica y esfuerzo, respectivamente, proporcionando una imagen completa de las condiciones del pozo.

#### ***4.10.3 Aplicaciones específicas en el completamiento del pozo***

**Monitoreo de la fractura hidráulica.** Los datos DTS y DAS se utilizan para monitorear la creación y propagación de fracturas durante la estimulación hidráulica, asegurando una distribución uniforme del fluido de fractura y del apuntalante.

**Evaluación del comportamiento de la fractura.** La tecnología de fibra óptica permite evaluar el inicio y la extensión de las fracturas, así como la interacción entre múltiples fracturas en el yacimiento. Esta información es crucial para ajustar el diseño del completamiento y mejorar la eficiencia de la estimulación.

La caracterización del yacimiento se realiza con dos procesos diferentes:

- **Medición de temperatura distribuida (DTS).** La DTS permite medir las variaciones de temperatura a lo largo del yacimiento, proporcionando información sobre la dinámica de fluidos y la transferencia de calor en el yacimiento.
- **Detección de flujo acústico (DAS).** La DAS ayuda a identificar los patrones de flujo dentro del yacimiento y detectar posibles fugas o zonas de alta permeabilidad. Esto es esencial para caracterizar el yacimiento y planificar estrategias de producción.

El documento señala la importancia del monitoreo continuo y en tiempo real, supervisando el proceso de completamiento. La monitorización en tiempo real permite detectar y corregir problemas durante el proceso de completamiento, como zonas de baja productividad o anomalías en la inyección de fluidos. Asimismo, realizar una evaluación post-estimulación. Después de la estimulación, los datos de fibra óptica se utilizan para evaluar la efectividad del tratamiento y

ajustar las estrategias de producción. En la figura 20 se puede evidenciar detalladamente el proceso de monitorización cuando se desarrollan un sistema de pozos geotérmicos horizontales.

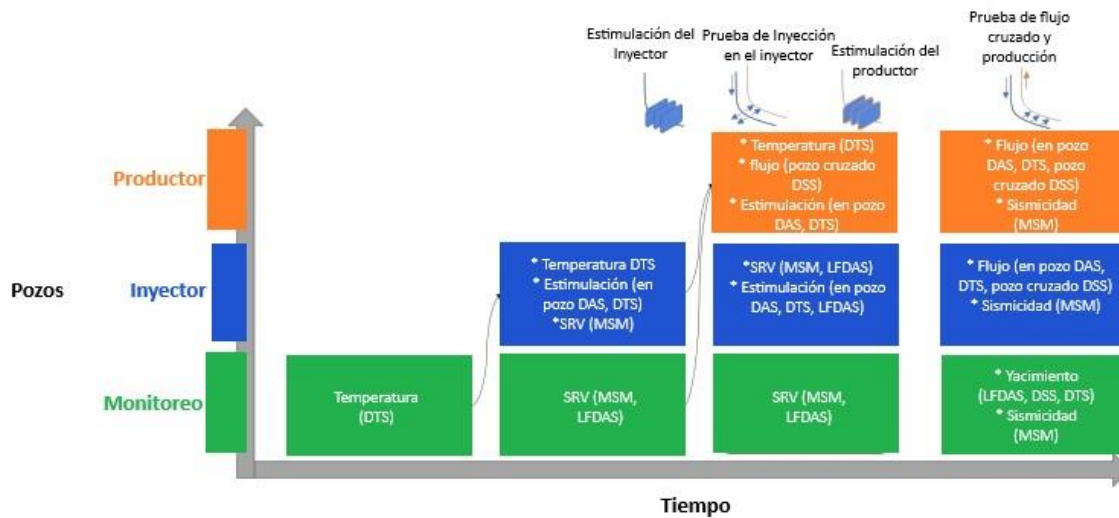
Esta tecnología de fibra óptica tiene beneficios como lo son:

- **Precisión y detalle.** La tecnología de fibra óptica proporciona datos detallados y precisos, permitiendo una comprensión profunda de las condiciones del pozo.
- **Monitorización continua.** La capacidad de monitorizar continuamente las condiciones del pozo permite una respuesta rápida a cualquier problema que surja durante el completamiento.
- **Optimización de la producción.** Al proporcionar información detallada sobre la fractura y la dinámica de fluidos, la tecnología de fibra óptica ayuda a optimizar las estrategias de producción y maximizar la recuperación de recursos.

Cabe destacar que se presentan desafíos y consideraciones técnicas como lo son los costos de implementación, ya que la instalación inicial de sistemas de fibra óptica puede ser costosa, aunque los beneficios a largo plazo en términos de eficiencia y productividad pueden justificar esta inversión. Por otro lado, la integridad de los datos porque es crucial asegurar la integridad y precisión de los datos obtenidos, lo que requiere una calibración y mantenimiento adecuados de los sensores de fibra óptica.

**Figura 20**

*Monitorización del sistema de pozos geotérmicos horizontales*



*Nota.* Monitorización DFOS durante el desarrollo de un sistema de pozos geotérmicos horizontales. Las flechas negras indican los conjuntos de datos utilizados para optimizar la colocación del siguiente pozo perforado. Adaptado de *Completion and Well Placement Optimization Using Distributed Fiber Optic Sensing in Next-Generation Geothermal Projects* (Titov et al., 2023).

La tecnología de fibra óptica ha revolucionado el completamiento de pozos, proporcionando una herramienta poderosa para la monitorización y optimización de este proceso. Su capacidad para ofrecer datos precisos y en tiempo real sobre la temperatura, la acústica y el esfuerzo dentro del pozo permite mejorar significativamente la eficiencia de la estimulación hidráulica y la caracterización del yacimiento. Al integrar estos datos en el diseño y operación del completamiento del pozo, se pueden maximizar los rendimientos y minimizar los riesgos,

convirtiendo a la tecnología de fibra óptica en un componente esencial para el desarrollo de sistemas geotérmicos de próxima generación.

A continuación, en la Tabla 3, se muestra un breve resumen de lo que abarca el capítulo 4, donde se define el tipo de completamiento, su ubicación y su característica más relevante.

**Tabla 3**

*Resumen de los casos de éxito a nivel mundial*

<b>Completamiento</b>	<b>Ubicación</b>	<b>Características</b>
Relleno de Grava	Laoling y Qingyan (China)	Prevenir la producción de arena en los pozos geotérmicos.
Tubos PVC-U	Zhengzhou, China	Evitar corrosión y menores costos
Centralizadores cerámicos	California, USA	Mejorar el soporte estructural del pozo
Tuberías expansibles	Sur de Alemania	Mejorar integridad de pozo al reducir discontinuidades
Completamiento Multilateral	México	Mejorar la eficiencia de extracción
Intercambiador BHE	Austria	Reducción de riesgos y sostenibilidad
Fibra óptica	Nevada, USA	Monitorización continua del pozo

## **5. Análisis comparativo de las tecnologías**

En la explotación de yacimientos geotérmicos, el completamiento de pozos es una etapa crucial que determina la eficiencia y seguridad de la producción de energía geotérmica. Existen diversos métodos de completamiento geotérmico, cada uno con características específicas que los hacen más adecuados para distintas condiciones geológicas y objetivos de producción. Este análisis se enfoca en comparar estos métodos en términos de eficiencia operativa, costos, viabilidad técnica, durabilidad y otros factores relevantes.

El completamiento de pozos geotérmicos involucra diversas tecnologías que deben ser seleccionadas en función de las características específicas del yacimiento. La eficiencia de la extracción de calor y la sostenibilidad del pozo a largo plazo dependen en gran medida de la tecnología de completamiento seleccionada. En este apartado, se describen y comparan los principales métodos de completamiento geotérmico identificados en los estudios de caso. Para desarrollar esta comparativa, se realizó un análisis detallado de once casos de estudio de diferentes pozos geotérmicos en todo el mundo. Estos casos se seleccionaron para representar una variedad de condiciones geológicas y tecnológicas, permitiendo así una evaluación exhaustiva de cada método de completamiento. Los datos recopilados incluyen la temperatura del yacimiento, la presión, la profundidad del pozo y los resultados operativos de cada tecnología aplicada.

### **5.1 Métodos de completamiento geotérmico**

#### **Revestimiento de casing con titanio**

Este método se implementa debido a la alta resistencia del titanio a la corrosión, especialmente en presencia de salmueras geotérmicas altamente corrosivas. Mejora la durabilidad del pozo y reduce los costos de mantenimiento y reparación (Teodoriu & Falcone, 2009).

**Ejemplo de aplicación:** Proyecto Cerro Pabellón, Chile.

**Temperatura:** 250-300°C

**Presión:** 100-200 bar

**Profundidad:** 2000-3000 m

### **Cemento aireado**

Utiliza cemento inyectado con nitrógeno para resolver problemas de subpresión en las formaciones geotérmicas, mejorando la durabilidad y reduciendo la corrosión (Khaemba, 2014).

**Ejemplo de aplicación:** Campo geotérmico de Cerro Prieto, México.

**Temperatura:** 200-250°C

**Presión:** 80-150 bar

**Profundidad:** 1500-2500 m

### **Revestimientos expansibles**

Revestimientos que se expanden mecánicamente dentro del pozo, proporcionando un mejor sellado y soporte estructural en condiciones de subpresión y pérdida de circulación (Hodson-clarke et al., 2016).

**Ejemplo de aplicación:** Proyecto Habanero, Australia.

**Temperatura:** 220-280°C

**Presión:** 90-180 bar

**Profundidad:** 2500-3500 m

### **Tubing de producción y perforaciones laterales**

Utilización de tubing de producción y perforaciones horizontales para aumentar la superficie de extracción y mejorar el flujo de calor (Wang et al., 2014)

**Ejemplo de aplicación:** Hellisheidi, Islandia.

**Temperatura:** 180-230°C

**Presión:** 70-130 bar

**Profundidad:** 2000-3000 m

### **Fracturamiento hidráulico**

Técnica que incrementa la permeabilidad del yacimiento mediante la inyección de fluidos a alta presión para fracturar la roca, mejorando el flujo de fluidos geotérmicos (Olson et al., 2015).

**Ejemplo de aplicación:** Soultz-sous-Forêts, Francia.

**Temperatura:** 160-220°C

**Presión:** 60-120 bar

**Profundidad:** 2000-5000 m

### **Completamiento abierto con reinyección**

Este método permite la extracción del fluido geotérmico, su utilización en la generación de energía y posterior reinyección en la formación geológica para mantener la presión del yacimiento (Lu & Ying, 2010).

**Ejemplo de aplicación:** Campo geotérmico de Larderello, Italia.

**Temperatura:** 250-350°C

**Presión:** 150-250 bar

**Profundidad:** 1000-3000 m

### **Tecnología con fibra óptica**

Utiliza sensores de fibra óptica para monitorear en tiempo real la temperatura y la presión a lo largo del pozo, mejorando el control y la eficiencia del completamiento (Titov et al., 2023).

**Ejemplo de Aplicación:** Proyecto Krafla, Islandia.

**Temperatura:** 200-300°C

**Presión:** 80-180 bar

**Profundidad:** 1500-2500 m

### **Intercambiador de calor de pozo (BHE)**

Sistema de intercambio de calor que permite la transferencia eficiente de energía térmica entre el fluido geotérmico y el fluido de trabajo en el pozo (Okech et al., 2015).

**Ejemplo de aplicación:** Proyecto GeneSys Alemania, Austria, Polonia, HGP-A Hawai

**Temperatura:** 150-200°C

**Presión:** 50-100 bar

**Profundidad:** 2000-3000 m

### **Completamiento con tubo en U de PVC**

Este sistema de completamiento se lleva a cabo utilizando tubos de PVC-U (Cloruro de Polivinilo), un material novedoso compuesto por colofonia de PVC de alta densidad. Este tipo de tubería representa una innovación significativa en la construcción de pozos, ya que no solo prolonga la vida útil de los pozos, sino que también mejora la calidad general de pozo, adicionalmente reduce la intensidad del trabajo requerido, gracias a su ligereza en comparación con otros materiales tradicionales.

**Ejemplo de aplicación:** Proyecto de dos pozos someros en Zhengzhou, China.

**Temperatura:** La temperatura máxima de operación para esta tubería es de 60°C

**Presión:** —

**Profundidad:** Pozo de producción (400m), Pozo de inyección (437m)

### **Completamiento con relleno de grava en pozos geotérmicos**

Este tipo de completamiento es factible utilizarlo para evitar producción de arena, esto porque en los pozos geotérmicos de la Llanura del Norte de China es algo que se es muy frecuente.

Adicionalmente, el diámetro y la distribución de este pueden satisfacer los requisitos de pozos geotérmicos profundos, teniendo en cuenta buenos procedimientos operacionales de revestimiento y de vaciado de la grava para que trabaje de manera correcta. El volumen de la grava puede calcularse teóricamente y verificarse según el trabajo de campo para mejorar la calidad de terminación del pozo.

**Ejemplo de aplicación:** Proyecto de pozos geotérmicos en Qingyuan y Laoling, China.

**Temperatura:** —

**Presión:** —

**Profundidad:** 1350m hasta los 1500m

La siguiente tabla resume los métodos de completamiento analizados, destacando sus ventajas, desventajas y casos de estudio relevantes, incluyendo detalles adicionales como temperaturas, presiones y profundidades de los pozos.

**Tabla 4***Tabla comparativa de los diferentes casos de estudio*

<b>Método</b>	<b>Descripción</b>	<b>Ejemplo de Aplicación</b>	<b>Temperatura del Yacimiento</b>	<b>Presión del Yacimiento</b>
<b>Revestimiento de Casing con Titanio</b>	Alta resistencia a la corrosión mejora la durabilidad del pozo.	Proyecto Cerro Pabellón, Chile	250-300°C	100-200 bar
<b>Cemento Aireado</b>	Resuelve problemas de sub-presión, mejora la durabilidad.	Cerro Prieto, México	200-250°C	80-150 bar
<b>Revestimientos Expansibles</b>	Mejor sellado y soporte estructural.	Proyecto Habanero, Australia	220-280°C	90-180 bar
<b>Tubing de Producción y Perforaciones Laterales</b>	Incrementa la producción significativamente.	Hellisheidi, Islandia	180-230°C	70-130 bar
<b>Fracturamiento Hidráulico</b>	Mejora la producción en formaciones de baja permeabilidad.	Soultz-sous-Forêts, Francia	160-220°C	60-120 bar
<b>Compleatamiento Abierto con Reinyección</b>	Mantiene la presión del yacimiento.	Larderello, Italia	250-350°C	150-250 bar
<b>Tecnología con Fibra Óptica</b>	Monitoreo en tiempo real, mejora la eficiencia.	Nevada, Estados Unidos	176-190°C	80-180 bar
<b>Intercambiador de Calor de pozo (BHE)</b>	Transferencia eficiente de energía térmica.	Proyecto GeneSys, Alemania	150-200°C	50-100 bar
<b>Compleatamiento por Grava</b>	Mejora la estabilidad y evita la producción de arena.	Yacimientos del Norte de China	120-200°C	50-100 bar
<b>PVC-U (Policloruro de Vinilo no Plastificado)</b>	Tuberías ligeras y resistentes a la corrosión con un coeficiente de expansión térmica mayor.	Zhengzhou, China	No especificada	60-140 bar

<b>Método</b>	<b>Composición del Fluido Geotérmico</b>	<b>Sistema Geotérmico y Tipos de Yacimientos</b>	<b>Factores Ambientales y Regulatorios</b>	<b>Costos y Disponibilidad de Equipos</b>
<b>Revestimiento de Casing con Titanio</b>	Salmueras geotérmicas altamente corrosivas	Sistemas con alta corrosividad	Regulaciones estrictas debido a corrosividad	Altos, pero con potencial ahorro a largo plazo
<b>Cemento Aireado</b>	Fluidos moderadamente corrosivos	Formaciones sub-presionadas	Normativas moderadas	Moderados
<b>Revestimientos Expansibles</b>	Fluidos corrosivos y no corrosivos	Diversas condiciones	Factores variables según la región	Moderados a altos
<b>Tubing de Producción y Perforaciones Laterales</b>	Fluidos mixtos	Yacimientos heterogéneos	Regulaciones flexibles	Moderados a altos
<b>Fracturamiento Hidráulico</b>	Fluidos de baja permeabilidad	Formaciones de baja permeabilidad	Regulaciones estrictas por impacto ambiental	Altos
<b>Completamiento Abierto con Reinyección</b>	Fluidos de alta temperatura y presión	Yacimientos de alta temperatura	Regulaciones estrictas	Moderados
<b>Tecnología con Fibra Óptica</b>	Fluidos moderadamente corrosivos	Diversos sistemas geotérmicos	Factores regulatorios específicos	Moderados
<b>Intercambiador de Calor de pozo (BHE)</b>	Fluidos de baja a media temperatura	Sistemas cerrados	Regulaciones específicas para sistemas cerrados	Moderados a altos
<b>Completamiento por Grava</b>	Fluidos mixtos con partículas de arena	Yacimientos arenosos o de grano fino	Regulaciones moderadas	Moderados
<b>PVC-U (Policloruro de Vinilo no Plastificado)</b>	Fluidos no corrosivos a moderadamente corrosivos	Sistemas con baja corrosividad	Factores regulatorios específicos para materiales no metálicos	Bajos

<b>Método</b>	<b>Métodos de Estimulación Hidráulica</b>	<b>Integridad del Pozo y Cementación</b>	<b>Tipo de Completamiento</b>
<b>Revestimiento de Casing con Titanio</b>	Requiere poca estimulación	Alta, menor necesidad de mantenimiento	Cerrado
<b>Cemento Aireado</b>	Utilizado para mejorar la permeabilidad	Alta	Cerrado
<b>Revestimientos Expansibles</b>	Aumenta la permeabilidad	Alta	Cerrado
<b>Tubing de Producción y Perforaciones Laterales</b>	Requiere precisión avanzada	Alta	Cerrado
<b>Fracturamiento Hidráulico</b>	Necesario para mejorar la permeabilidad	Alta	Cerrado
<b>Completamiento Abierto con Reinyección</b>	Requiere tecnología avanzada para la reinyección	Alta	Abierto
<b>Tecnología con Fibra Óptica</b>	Mejora el control de la estimulación	Alta	Cerrado
<b>Intercambiador de Calor de pozo (BHE)</b>	No aplicable	Alta	Cerrado
<b>Completamiento por Grava</b>	No requiere estimulación	Alta, con buen control de arena	Abierto
<b>PVC-U (Policloruro de Vinilo no Plastificado)</b>	No requiere estimulación	Alta, adecuada para aplicaciones específicas	Cerrado

La selección del método de completamiento adecuado depende de las características específicas del yacimiento geotérmico, tales como la permeabilidad, la composición del fluido y la estructura geológica. Los métodos descritos ofrecen una variedad de enfoques y soluciones adaptadas a diferentes condiciones, proporcionando opciones para optimizar la extracción de energía geotérmica y asegurar la sostenibilidad a largo plazo. La comparación detallada de los métodos basados en casos de estudio reales permite tomar decisiones informadas que maximicen la producción y minimicen los riesgos operativos.

## 6. Diseño conceptual de completamiento

Colombia, ubicada en el Cinturón de Fuego del Pacífico, se destaca por su ubicación geográfica y geología favorables, lo que se evidencia en su actividad volcánica actual y en un gradiente de temperatura naturalmente alto en el subsuelo, características que la hacen excepcional (Hoyos et al., 2017). Aunque el país depende principalmente de la generación hidroeléctrica y termoeléctrica para su suministro de energía eléctrica, aproximadamente el 18% del consumo en el sector energético-económico entre diciembre de 2010 y enero de 2020 sigue siendo cubierto por el carbón (Kholod et al., 2020). Según la (UPME, 2020), aproximadamente el 70% de la electricidad de Colombia proviene de centrales hidroeléctricas, el 29% de combustibles fósiles, y solo el 1% de otras fuentes como la biomasa, eólica y solar, lo que subraya la necesidad de diversificar las fuentes de energía y reducir la dependencia de las hidroeléctricas, especialmente considerando su vulnerabilidad al clima.

La subducción de la placa tectónica de Nazca debajo de la placa sudamericana genera actividad volcánica en Colombia, lo que produce electricidad geotérmica en las cordilleras central y occidental del país. Los principales sistemas geotérmicos se encuentran en la Zona Andina y el suroeste del país, con niveles de entalpía que varían de bajos a altos (Thayer, 2018). Lugares como Dabeiba (Risaralda) y las termas de Santa Rosa de Cabal muestran manifestaciones superficiales significativas. Además, las zonas geotérmicas de Paipa, el sistema volcánico Chiles-Cerro Negro, y el sistema volcánico Nevado del Ruiz han sido objeto de investigación destacada en Colombia (SGC, 2019).

El completamiento de pozos geotérmicos en Paipa debe adaptarse a las características geológicas, térmicas y petrofísicas específicas de la región. La implementación de tecnologías y

configuraciones precisas garantiza la eficiencia y seguridad del pozo durante su vida útil. A continuación, se describe detalladamente el proceso de completamiento, justificando cada elección basada en las condiciones específicas de Paipa descritas en el documento de investigación "Estimación preliminar del potencial geotérmico en Colombia" (Alfaro et al., 2020).

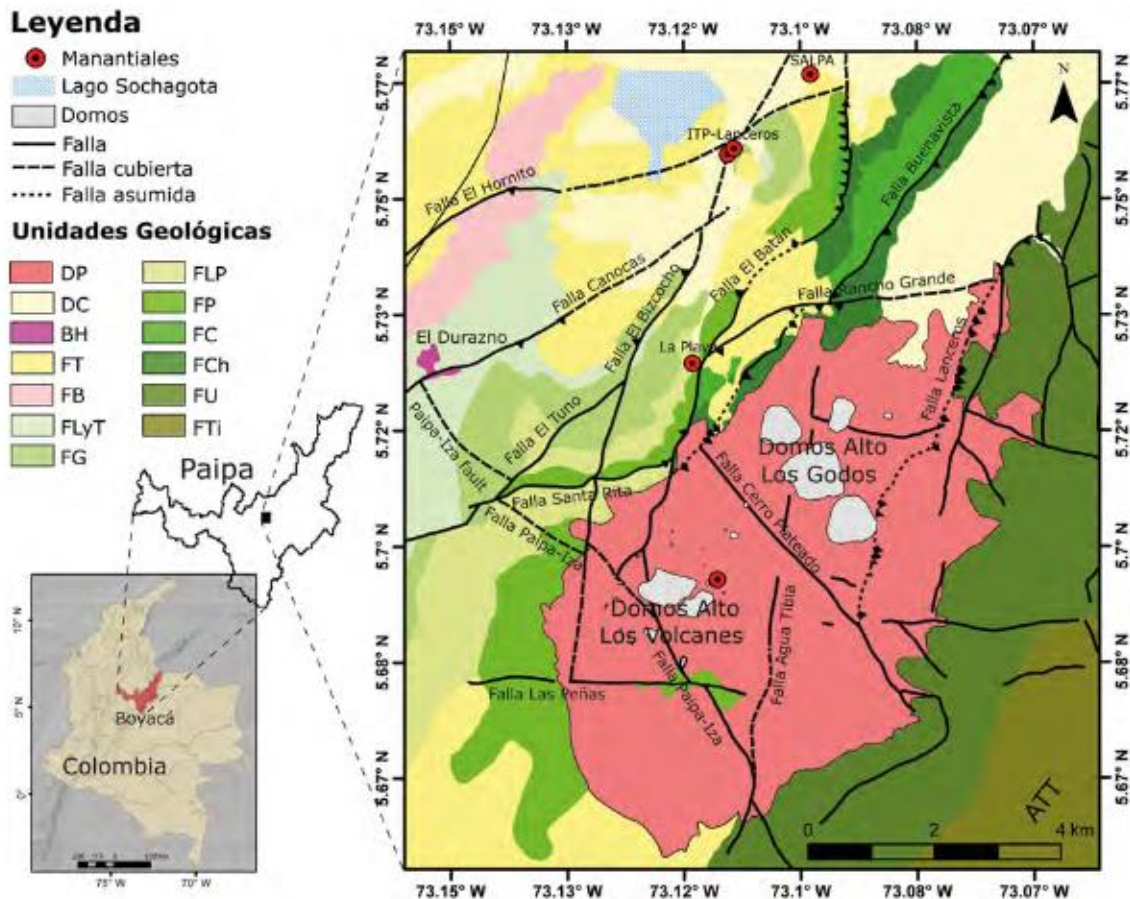
### **6.1 Área de Paipa**

La región de Paipa ha sido identificada como un área con un potencial geotérmico de prioridad media a alta según un estudio realizado por OLADE en 1982 para la identificación de los recursos geotérmicos en Colombia. Este potencial se atribuye principalmente a factores como la edad de la región, que se estima en 2,5 millones de años, la presencia de anillos volcánicos con depósitos piroclásticos, la ocurrencia de alteración hidrotermal y la presencia de rocas con composición riolítica. Además, el estudio clasificó la composición química de las aguas termales en esta región (OIEA, 2001).

En 1983, el Japan Consulting Institute fue contratado por ICEL para llevar a cabo una evaluación preliminar de factibilidad para el desarrollo de una planta geotérmica en Boyacá. Aunque algunos yacimientos geotérmicos podrían ser viables para el desarrollo, este estudio concluyó que se requería una investigación adicional (González-Idárraga, 2020).

Figura 21

Mapa geológico y estructural del área geotérmica de Paipa



Nota. En la figura 21, obtenida del estudio de González-Idárraga se describe lo siguiente: Unidades del Cuaternario: Depósitos piroclásticos (DP), Depósitos del Cuaternario (DC). Unidades del Neógeno: Brecha hidrotermal (BH), Formación Tibatá (FT). Unidades del Paleógeno: Formación Bogotá (FB). Unidades del Cretácico: Formación Labor y Tierna (FLyT), Formación Guaduas (FG), Formación Los Pinos (FLP), Formación Plaeners (FP), Formación Conejo (FC), Formación Churuvita (FCh), Formación Une (FU), Formación Tibasosa (FTi). ATT: Anticlinal Tibasosa-Toledo. Adaptado de (González-Idárraga, 2020).

## 6.2 Modelo conceptual del sistema geotérmico de Paipa

En el estudio del Servicio Geológico Colombiano, (2017), basándose en la integración de estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos previos, se desarrolló un modelo geotérmico conceptual preliminar que sugiere que la fuente de calor en la región de Paipa es de origen magmático, con una edad de entre 2,5 y 2,1 millones de años, y está conectada al volcán Paipa. Según este estudio, es probable que el reservorio esté ubicado dentro de una caldera de unos 3 km de diámetro creada por el volcán Paipa, posiblemente rodeada de áreas fracturadas debido al ascenso de magma y/o agua. También se cree que está asociada con fallas normales como Paipa-Iza y Cerro Plateado. Se concluye que la región de descarga está estructuralmente restringida, especialmente en la sección ITP-Laceros.

En el estudio de Rojas Sarmiento, (2012), sobre resistividad, geofísica, gravimetría y magnetometría concluyó que podrían combinarse y utilizarse estas técnicas y disciplinas para actualizar el modelo geotérmico existente. Durante un simposio organizado por el SGC en 2016 para conmemorar los 100 años de producción científica, el Grupo de Exploración de Recursos Geotérmicos revisó el modelo conceptual geotérmico del área de Paipa. Actualmente, el proyecto en la región geotérmica de Paipa se encuentra en la etapa de prefactibilidad. La investigación se ha centrado en áreas como geología, gravimetría, magnetometría, geología estructural, sondeo de temperatura, modelado magnetoteléurico 2D y 3D, geoquímica del agua, modelado geológico 3D y modelado conceptual. Según la información proporcionada en reuniones con la comunidad local, el SGC planea realizar dos sondeos, cada uno con una profundidad de 500 m, en quebradas profundas y caminos salitreros (Marzolf, 2014).

La información obtenida del modelo conceptual de Alfaro Valero et al., (2005) demuestra que el sistema geotérmico de Paipa cuenta con las siguientes características.

Este sistema se encuentra dentro de la pequeña caldera creada por la actividad del volcán de Paipa al final de su fase eruptiva inicial. La fuente de calor proviene del magma en proceso de enfriamiento, con una antigüedad estimada de menos de 2.5-2.1 millones de años.

El reservorio más profundo se sitúa en una zona fracturada alrededor de las fallas de basamento extensivas (Paipa-Iza, Cerro Plateado), que también se consideran como las posibles vías de ascenso del magma del Volcán de Paipa.

Se ha registrado que el reservorio alcanza temperaturas alrededor de 320°C, y es probable que en la actualidad mantenga condiciones de alta temperatura (por encima de 225°C).

Es posible que existan uno o más reservorios superficiales alojados en capas de permeabilidad primaria (areniscas) de la secuencia sedimentaria, cuya extensión lateral facilita el flujo del agua geotérmica hacia la zona de descarga.

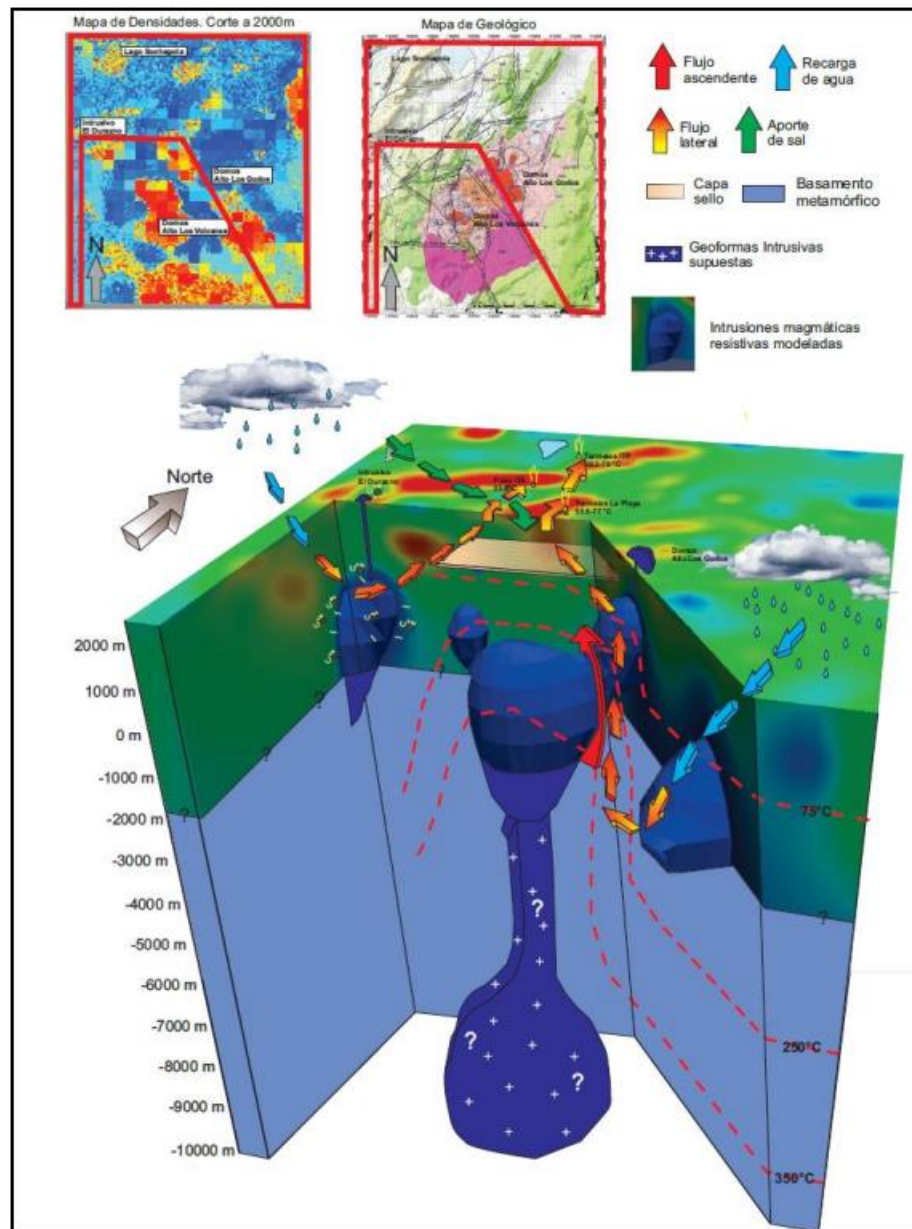
La zona de descarga, influenciada estructuralmente por cruces de fallas y áreas extensivas asociadas a la rotación de bloques, se encuentra fuera de la caldera volcánica, en dirección norte desde la fuente de calor. El flujo ascendente más prominente, que corta la superficie, se encuentra en el Sector ITP-Lanceros, derivado de un flujo lateral de sur a norte en la zona influenciada por el cruce de las fallas El Bizcocho - El Hornito.

La composición química e isotópica del fluido profundo se ve alterada por procesos de mezcla, lo que hace que la composición de los manantiales no refleje fielmente la del reservorio. Además de posibles diluciones con aguas subterráneas, el agua se mezcla con una fuente de agua fría y salada (sulfatada sódica) a poca profundidad (entre 5 y 35 m), y con una fuente de gases orgánicos ubicada en varios estratos de la secuencia sedimentaria. Además, el agua experimenta un proceso de ebullición incipiente, indicado por la presencia de un ventiladero de vapor en la Formación Plaeners, cerca del cruce de las fallas Cerro Plateado - El Bizcocho.

Se presume que la principal zona de recarga está dentro del área de la caldera, asociada con fracturas circulares y áreas de debilidad dejadas por la formación de la caldera.

### Figura 22

*Modelo conceptual del área geotérmica de Paipa*



*Nota.* Esta imagen representa el sistema geotérmico en dirección norte, con recarga al oriente y sur (anticlinal Tibasosa – Toledo). Se pueden evidenciar fenómenos como infiltración, el

calentamiento del agua, intrusión, flujo ascendente (upflow), flujo lateral (outflow). Adaptado de Servicio Geológico Colombiano (2017), *Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa*.

### **Caracterización de la Zona de interés**

**Nombre:** Formación Une

**Ubicación:** En la zona del Alto los volcanes, justo encima de la caldera subterránea

**Área de la caldera:** 31 km<sup>2</sup> con un largo máximo de 11 km<sup>2</sup> y una amplitud máxima de 6 km situada entre 8 km y 10 km de profundidad.

**Volumen estimado del reservorio:** 1.1 km<sup>3</sup>

**Temperatura estimada:** (220-320) (°C)

**Presión de Saturación:** (23,18 -112,84) (Bar)

**Profundidad:** (200 – 600) (m)

**Flujo volumétrico estimado:** 60 (L/s), equivalente a un flujo másico aproximado de 58,67 (kg/s), teniendo en cuenta el volumen específico de pozos someros P=76 (kPa) a 70°C

**Temperatura de un pozo geotérmico superficial:** 70°C

## **6.3 Características del yacimiento geotérmico de Paipa**

### **6.3.1 Ubicación del yacimiento**

El yacimiento geotérmico debe ubicarse en áreas de alta actividad geotérmica dentro de la caldera del Volcán de Paipa o en el Sector ITP-Lanceros, donde los estudios geofísicos y geoquímicos han identificado flujos geotérmicos significativos. Estas áreas prometen un alto potencial de producción de energía geotérmica debido a la presencia de manantiales termales y otros indicadores de calor subterráneo.

### **Profundidad del pozo**

La profundidad del pozo debe ser suficiente para alcanzar el reservorio geotérmico, que en Paipa se encuentra a profundidades variables. Los estudios preliminares sugieren perforaciones que pueden oscilar entre 1 *km* y 3 *km* de profundidad, dependiendo de la ubicación específica y los datos geológicos disponibles (Alfaro et al., 2020).

### **Selección del punto de interés**

Tomando como base los resultados de todos los estudios que se han realizado y su interpretación por parte del Servicio Geológico Colombiano (SGC), se planteó la siguiente hipótesis de cómo funciona el sistema de manera más resumida y fácil de interpretar.

A continuación, en la Figura 23, se detalla una imagen en 2D donde se tienen varios puntos claves como lo son la zona de recarga, la fuente de calor, la roca reservorio, que es la zona de interés para la extracción del recurso geotérmico por medio de la perforación y por último la capa sello.

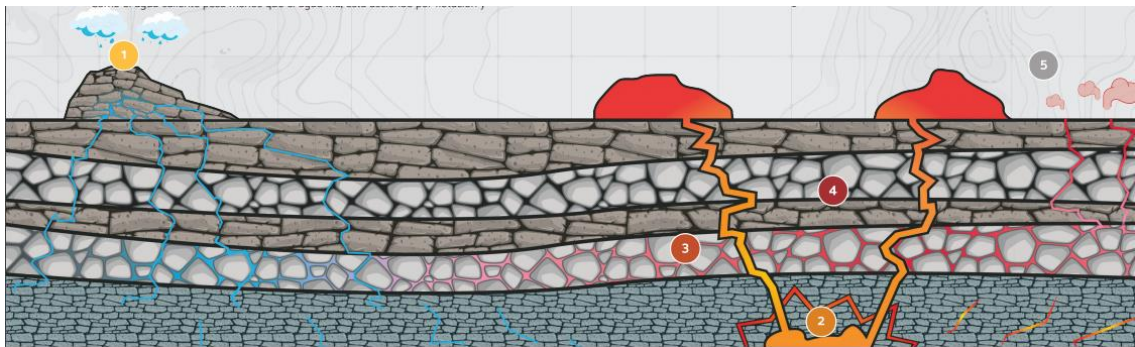
La zona de recarga proviene como se mencionó anteriormente del alto Tibasosa – Toledo, este recibe el agua de la lluvia y se filtra a gran profundidad hacia el occidente del alto.

La buena filtración y circulación del agua se debe a que el área está inclinada de sur a norte, facilitando el recorrido. Esta agua llega a las rocas calientes relacionadas con el volcán, que son la fuente de calor, generando el calentamiento del agua. Este vapor de agua asciende por flotación acumulándose en la roca reservorio que es la formación Une, el agua se mantiene caliente ya que queda atrapada bajo rocas de baja permeabilidad (arcillas) que dificultan la circulación, estas arcillas conforman la capa sello. Hacia el norte del sistema se encuentra una gran fractura por donde se filtra el agua caliente siguiendo su rumbo natural a través de rocas permeables.

El escape del agua caliente a superficie se da en las llamadas “zonas de descarga”, situadas en la zona “ITP – lanceros” y el sector “La playa”. Este fenómeno ocurre gracias a los grandes conductos de rocas permeables que hay en esa zona permitiendo que el agua pase de la roca reservorio y ascienda a superficie (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

### Figura 23

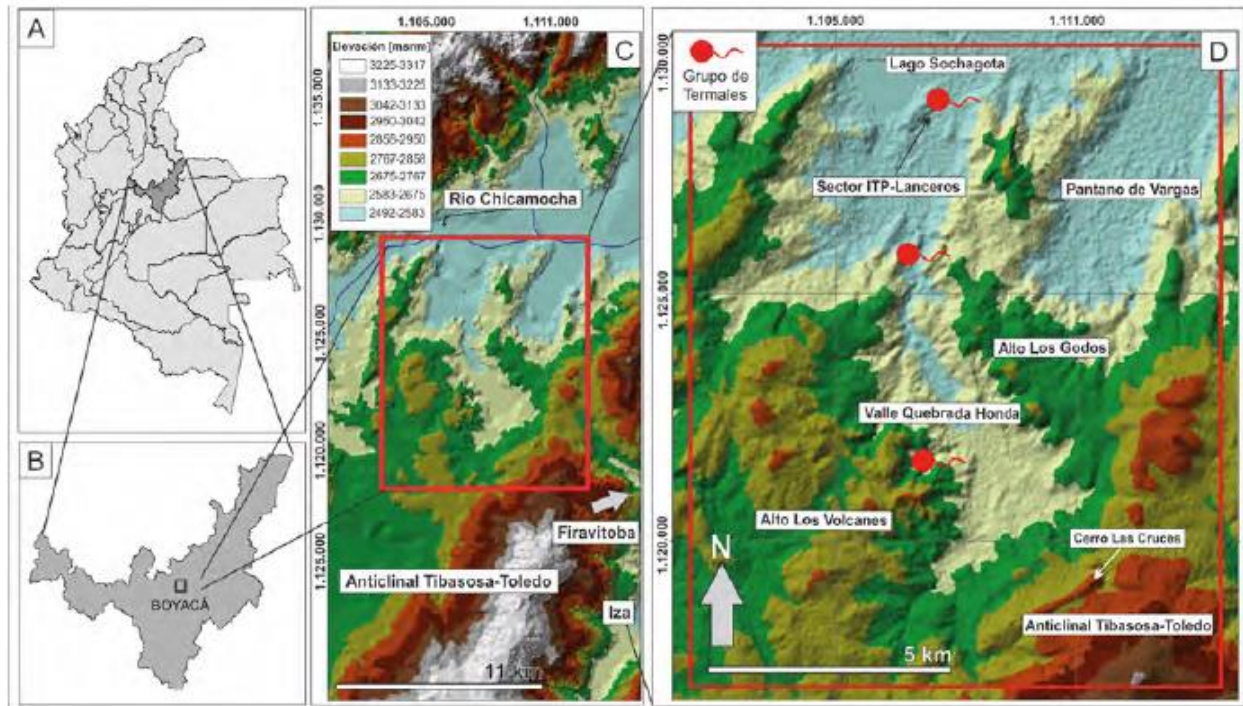
*Sistema geotérmico de Paipa en 2D*



*Nota.* En la figura 23 se puede evidenciar lo siguiente: 1. la zona de recarga, 2. la fuente de calor, 3. la roca reservorio, 4. roca sello y 5. zonas de descarga. Adaptado de SGC (2018), *Sistema Geotérmico Hidrotermal de Paipa*.

Según el análisis anterior, se define por parte de los autores que la zona ideal para perforar el pozo teórico es la zona 3 ya que es la roca reservorio, donde se encuentra la formación Une conformada por areniscas blancas de grano medio a grueso (Servicio Geológico Colombiano, 2018).

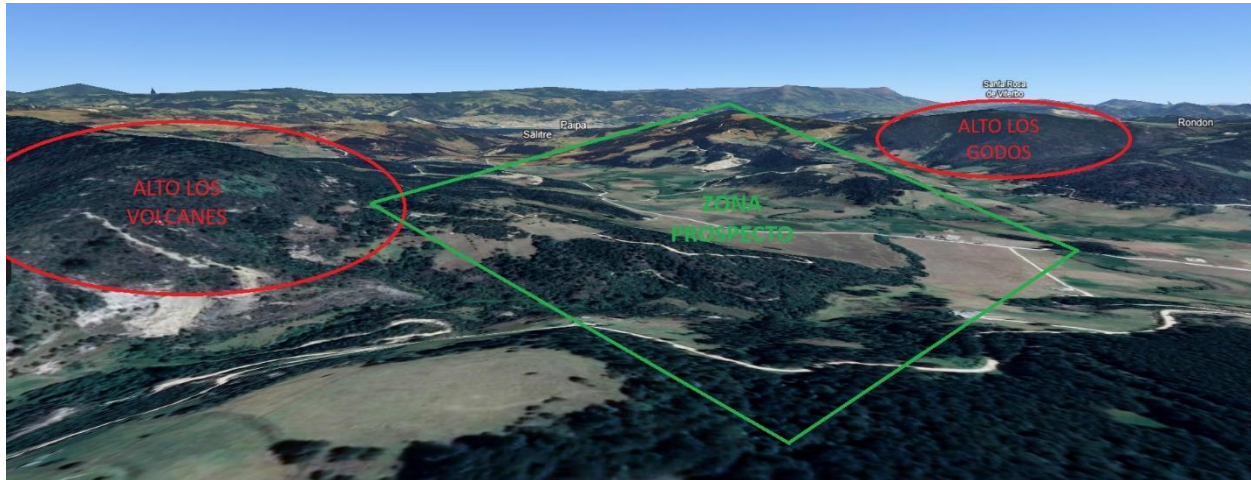
Según la SGC, menciona que la roca reservorio se encuentra entre un complejo de Domos (elevaciones que se formaron por enfriamiento de magma cuando este alcanzó la superficie.) Estos dos domos se conocen como Alto los volcanes y Alto los godos, por otro lado, la zona de interés es conocida como “Valle quebrada Honda”.

**Figura 24***Localización del área de estudio*

*Nota.* Localización del área del sistema geotérmico de Paipa. El recuadro rojo corresponde a la zona de estudio. A. Localización de Boyacá en el mapa de Colombia. B. Localización del área de estudio en el departamento de Boyacá. C. Área de estudio y sus alrededores. D. Área de estudio y manantiales termales. Tomado de *Nuevas evidencias del magmatismo asociado con el sistema geotérmico de Paipa, Boyacá, Colombia*, Vol 42, SGC (2020).

**Figura 25**

*Vista panorámica en 3D en Google Earth de la zona prospecto*



*Nota.* En la figura 25 se delimita la zona prospectiva por parte de los autores en base a las fuentes de información geológica vistas anteriormente. Fuente: Autores.

En la figura 25 se define un área donde teóricamente se podrían plantear puntos de perforación; en ese orden de ideas, lo siguiente es plantear el diseño con base en las tecnologías estudiadas y de acuerdo con la litología y geología plantear la configuración del completamiento en un estado mecánico teniendo en cuenta que es un resultado teórico.

#### **6.4 Selección de tecnologías para el completamiento**

##### **Revestimiento de pozo**

**Material.** Acero de alta resistencia, recubierto con materiales anticorrosivos. Justificación: La región de Paipa presenta fluidos geotérmicos con alto contenido de minerales corrosivos, por lo que se requiere un material resistente para evitar la degradación del pozo.

**Diámetro del revestimiento.** Determinado en función del diámetro del pozo y las presiones esperadas. Se recomienda un revestimiento de diámetro amplio en la parte superior para facilitar la instalación de tuberías y equipos, reduciendo el diámetro a medida que se profundiza.

## **Proceso de cementación**

### **Cemento resistente a altas temperaturas**

Utilización de cementos formulados para resistir temperaturas superiores a los 200°C. Justificación: En el numeral 4.4 del documento se destacan casos específicos de campos geotérmicos que requieren cementos formulados para resistir temperaturas superiores a los 200°C. Por ejemplo, en el campo geotérmico de Cerro Prieto, México, las temperaturas oscilan entre 200-250°C. En el Proyecto Habanero, Australia, las temperaturas alcanzan entre 220-280°C. En Larderello, Italia, se registran temperaturas de 250-350°C, mientras que en el Proyecto Krafla, Islandia, las temperaturas varían entre 200-300°C. Estos casos subrayan la importancia de utilizar cementos especializados para asegurar la integridad de los pozos en condiciones extremas de temperatura.

### **Cementación primaria y secundaria**

Aislamiento de zonas productivas y no productivas. Justificación: Evitar la comunicación entre diferentes estratos geológicos es crucial para prevenir pérdidas de fluidos y mantener la presión adecuada en el pozo.

### **Perforación direccional**

**Motores de fondo y MWD (Measurement While Drilling).** Permiten ajustar la dirección del pozo en tiempo real. Justificación: La geología de Paipa puede requerir desviaciones precisas para alcanzar las zonas de mayor productividad, evitando zonas de riesgo como fallas, zonas no productivas e intrusiones magmáticas.

## **Tuberías de producción y empaquetadores**

### **Tuberías de producción**

Según la SGC, (2017) la formación Une es un reservorio sedimentario formado por niveles de intercalaciones de shales y areniscas de alta permeabilidad que tienen potencial al ser friables con muy buena porosidad intergranular y por fracturamiento debido al plegamiento. Dadas estas características, el completamiento en hueco empacado con grava podría ser una técnica efectiva para manejar las variaciones en la formación, especialmente en zonas donde la permeabilidad es baja. Sin embargo, en áreas donde la arenisca es más limpia y homogénea, el completamiento en hueco abierto podría ser viable, permitiendo un contacto más directo con el reservorio. Finalmente, esta última configuración es la seleccionada teóricamente por la carencia de información petrofísica que se obtiene de la formación Une específicamente, que viene siendo la formación de interés.

**Materiales con aislamiento térmico y recubrimientos anticorrosivos.** Utilización de tuberías de acero inoxidable con recubrimientos especiales. Justificación: Resistencia a la corrosión y reducción de pérdidas de calor durante el transporte de fluidos geotérmicos.

**Configuración de diámetros.** Adaptación de diámetros según la profundidad y presión del yacimiento. Justificación: optimizar el flujo de fluidos y mantener la integridad estructural del pozo.

### **Empaquetadores (Packers):**

**Diseño y ubicación estratégica.** Instalación de empaquetadores en zonas específicas para aislar zonas productivas. Justificación: prevenir la mezcla de fluidos de diferentes zonas y mantener la presión controlada dentro del pozo.

## **Sistema de Elevación de Fluidos**

### **Bombas de alta temperatura**

Selección de bombas capaces de manejar fluidos a altas temperaturas sin degradarse.

Justificación: Las temperaturas elevadas de los fluidos geotérmicos en Paipa requieren bombas resistentes al calor para garantizar una operación continua y eficiente.

### **Sistemas de elevación natural**

Evaluación de la viabilidad de sistemas de elevación natural como el flujo espontáneo en yacimientos con suficiente presión. Justificación: Aprovechar la presión natural del yacimiento para reducir costos operativos y aumentar la eficiencia.

## **6.5 Diseño del estado mecánico**

En esta sección directamente se insertará la imagen del estado mecánico hecha por parte de los autores y a posteriori se explicará a detalle en qué consiste cada una de las herramientas y secciones que conforman dicho estado mecánico.

### **Wellhead**

Para este diseño teórico se va a emplear un wellhead como se puede apreciar en la figura 26 denominado sistema de cabezal de pozo geotérmico compacto Cameron, considerado desde hace tiempo en el sector geotérmico por su buena reputación, está disponible en todos los tamaños y presiones de trabajo habituales, tanto en diseños de bloque sólido como de brida convencional, la válvula maestra, el carrete de expansión y las salidas laterales.

**Figura 26**

*Sistema de cabezal de pozo geotérmico compacto Cameron*



*Nota.* Adaptado de (Surface Systems Technology, Cameron A Schlumberger Company, P62, 2017)

Referente a la válvula maestra, la válvula de compuerta de doble expansión WKM Pow – R- Seal es la indicada.

Válvula de compuerta de doble expansión WKM Pow-R-Seal. Las válvulas de compuerta de doble expansión WKM Pow-R-Seal se han empleado con éxito durante muchos años en servicios geotérmicos. Son válvulas principales, de mariposa y de cabeza de pozo. Las válvulas Pow-R-Seal disponibles con bridas y extremos para soldar, en diámetros de 2" a 36", y en clases ANSI 150, 300, 400, 600, 900 y 1500. Estas válvulas cumplen los requisitos API 6D y son ideales para aplicaciones de almacenamiento, colector, procesamiento, vapor y agua caliente. Tamaños de 2 y 3 pulgadas con clasificación API 6A, con presión de trabajo de 2.000, 3.000 y 5.000 psi, se utilizan en pozos de vapor como válvulas de cabeza

de revestimiento (Surface Systems Technology, Cameron A Schlumberger Company, P63, 2017)

### **Figura 27**

*Válvula de compuerta de doble expansión WKM Pow-R-Seal*



*Nota.* Adaptado de (Surface Systems Technology, Cameron A Schlumberger Company, P63, 2017)

### **Material del casing**

El material Super Duplex aleación 2507 se caracteriza por ofrecer resistencia, buena ductilidad y excelente resistencia a la corrosión, esto lo convierte en una solución ideal para intercambiadores de calor de pozos geotérmicos y tubing de producción. Este tipo de tubería está compuesto principalmente por Carbono, Magnesio, Fosforo, Azufre, Silicio, Níquel, Cromo, Molibdeno, Nitrógeno y Cobre.

2507 Super Duplex es un acero inoxidable dúplex de alta aleación con un valor PRE (equivalente de resistencia a las picaduras) de 42.5 como mínimo. El grado se caracteriza

por una muy buena resistencia a la corrosión por cloruro, combinada con una resistencia mecánica muy alta. Es especialmente adecuado para su uso en entornos agresivos, como agua de mar clorada caliente y medios que contienen cloruro ácido. Es ampliamente utilizado en exploración/producción de petróleo y gas en alta mar y en intercambiadores de calor en procesos petroquímicos/químicos. El grado también es adecuado para aplicaciones hidráulicas y de instrumentación en ambientes marinos tropicales (PAC STAINLESS LTD).

### **Figura 28**

*Aleación 2507 Súper Dúplex*



*Nota.* Adaptado de Pac Stainless Ltd. (2024, 2 de agosto de 2024). Tubing Super Duplex aleación 2507. <https://www.pacstainless.com/es/products/specialty-alloy-tubing/alloy-2507-super-duplex-tubing/>

### **Selección del cemento**

El cemento elegido para el diseño de este completamiento teórico es el cemento Portland Clase G, ya que es el cemento más usado para completamiento de pozos geotérmicos por su resistencia a altas temperaturas, soportando hasta los 200° Celsius (392°F). La composición está dada por la siguiente tabla:

**Tabla 5***Composición cemento Portland Clase G*

Cemento Portland Clase G			
Nombre	Fórmula	Abreviatura	%
Silicato tricálcico	$3CaO \cdot SiO_2$	$C_3S$	60
Silicato dicálcico	$2CaO \cdot SiO_2$	$C_2S$	18
Aluminato tricálcico	$3CaO \cdot Al_2O_3$	$C_3A$	3
Ferroaluminato tetracálcico	$4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$	$C_4AF$	10
Otros (Aditivos)	-	-	9

*Nota.* Adaptado de *Efectos de gases agrios sobre cementos petroleros*. Por Bolívar et al, 2008, SciElo.

Adicionalmente, cuando el cemento Portland es expuesto a temperaturas mayores a 230°F (110°C) se empieza a generar un fenómeno conocido como retroceso de la resistencia que puede definirse como un cambio en los productos de hidratación como, por ejemplo, en el gel amorfo C-S-H, lo que provoca una disminución en la resistencia y un aumento en la permeabilidad del cemento, lo que compromete la integridad y el aislamiento del pozo. Es común considerar la adición de sílice para controlar y evitar este fenómeno (Zhu, 2019). Se recomienda utilizar cierta cantidad de sílice dependiendo de la temperatura a la que esté expuesto el cemento (Di Martino & Ruch, 2018).

Teniendo en cuenta de manera teórica, lo más recomendable sería adicionar X% de Sílice de acuerdo con la siguiente tabla:

**Tabla 6***Cantidad de adición de sílice recomendada.*

°C	<b>93</b>	<b>121</b>	<b>149</b>	<b>177</b>	<b>204</b>	<b>232</b>	<b>260</b>	<b>288</b>	<b>316</b>
°F	199,4	249,8	300,2	350,6	399,2	449,6	500	550,4	600,8
<b>Sílice</b> <b>(%bwoc)</b>	0	35	35	35	40	50	60	60	70

*Nota.* Adaptado de *Efecto de la temperatura en la adherencia y resistencia a la compresión del cemento de pozo geotérmico.* (p. 24) por Barajas, Otero, 2023.

Finalmente, el cemento seleccionado de acuerdo con la tabla 6 es el cemento Portland Clase G con adición de sílice de en un 60% debido a los rangos de temperatura que maneja el sistema geotérmico de Paipa que vienen siendo entre 220-320°C.

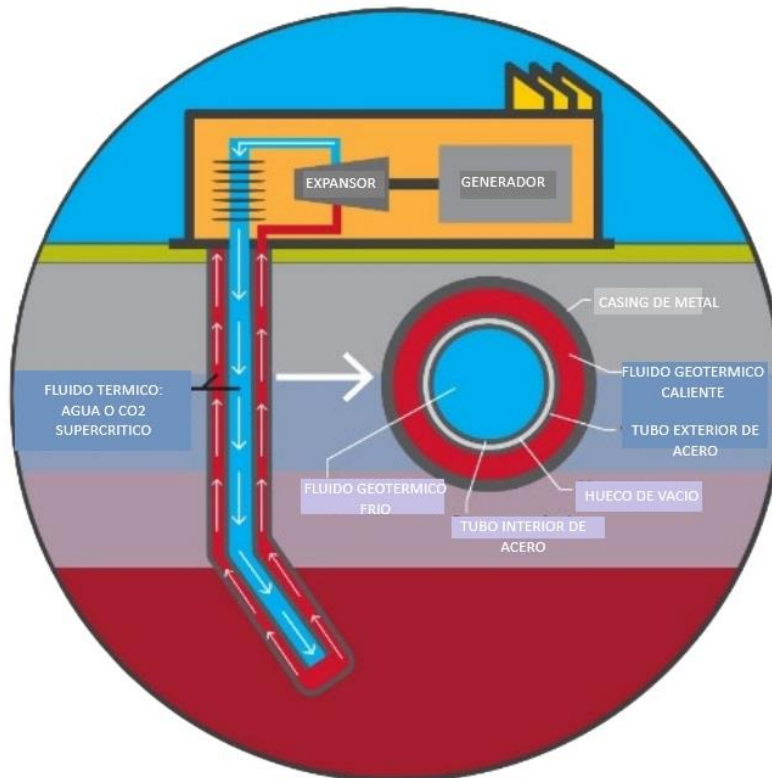
### **Selección de la tecnología**

La tecnología seleccionada tiene como objetivo aprovechar el calor sin extraer masa del yacimiento y disponer de producción e inyección en el mismo pozo, teniendo una ventaja económica al evitar costos adicionales.

En la figura 29 se puede apreciar la tecnología Closed Loop que permite tener un sistema geotérmico de circuito cerrado con tubos aislados al vacío (VIT) en el que se inyecta un fluido de trabajo frío en el tubo interior y se producen fluidos calientes en el tubo exterior.

**Figura 29**

*Sistema geotérmico de circuito cerrado con VIT*



*Nota.* Sistema geotérmico de circuito cerrado con VIT en el que se inyecta un fluido de trabajo frío en el tubo interior y se producen fluidos calientes en el tubo exterior. Adaptado de *Introduction of the Closed-Loop Technology for Geothermal Wells*, (p. 3) Riyanto, 2022.

El por qué se selecciona esta tecnología para la zona de interés en Paipa definida anteriormente es debido a que es utilizada mayormente y ha tenido éxito en los diferentes proyectos geotérmicos a nivel mundial. También radica en que permite tener flexibilidad a la hora de seleccionar el fluido de inyección utilizado, lo que ayuda a optimizar la extracción del calor y, en consecuencia, a mejorar la producción de energía. Por otro lado, solo se necesita de un pozo, ya que tanto el fluido

de inyección como el de producción están en tuberías separadas pero conectadas a través de cierta configuración y que permite tener las siguientes ventajas.

**Ventajas de la tecnología seleccionada.** Las ventajas más características de esta tecnología son:

- Impacto mínimo en el medio ambiente: un pozo completado con esta tecnología actúa a la vez como pozo de producción y de inyección, por lo que la huella ambiental es mínima.
- Control total sobre el fluido de trabajo: sin incrustaciones en el pozo ni corrosión y puede utilizar varios tipos de fluidos de trabajo, ya sea agua,  $CO_2$  supercrítico, los fluidos orgánicos de bajo punto de inflamación, esto si se considera realizar centrales eléctricas binarias.
- Puede implementarse en la mayor parte de completamientos: solo necesita calor al que, en teoría, se puede acceder perforando a mayor profundidad.

**Desventajas de la tecnología seleccionada.** Las desventajas de esta tecnología son:

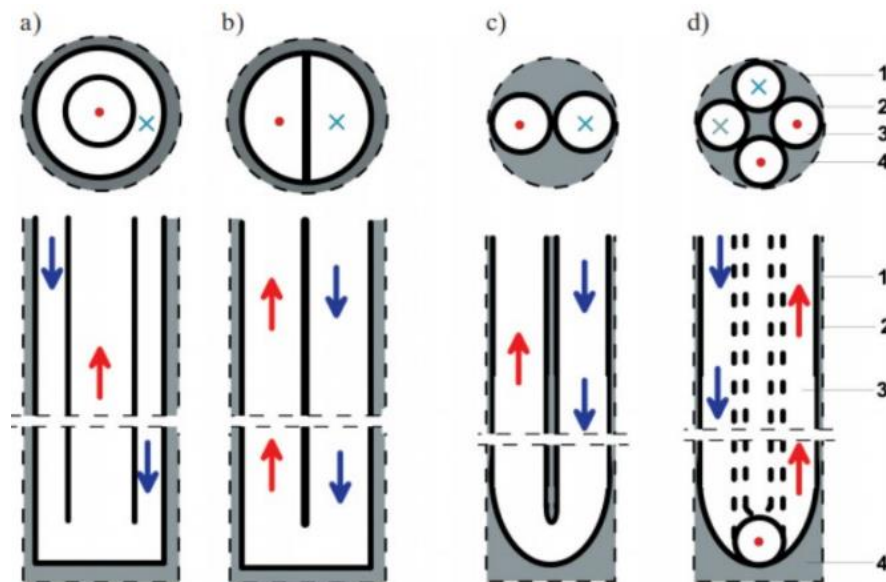
- Costos de instalación más elevados: La instalación puede ser más cara y complicada debido a la necesidad de grandes tuberías y perforaciones.
- Menor eficiencia en ciertas condiciones: en algunos climas o tipos de suelo donde el agua subterránea no tiene la temperatura ideal, la eficiencia puede ser inferior a la de los sistemas de circuito abierto.
- Limitaciones en la transferencia de calor: El medio usado para transferir calor (a menudo una mezcla de agua y dióxido de carbono supercrítico) puede ser menos eficiente en la conducción del calor comparado con el agua subterránea dulce.

### Selección de la configuración

Teniendo en cuenta que la tecnología seleccionada es la de circuito cerrado (Close Loop), esta permite tener cuatro tipos de configuraciones que vienen siendo las siguientes:

#### Figura 30

*Tipos de configuración de la tecnología de circuito cerrado.*



*Nota.* Cuatro diferentes tipos de configuración de la tecnología de circuito cerrado. (1) Pared de la perforación, (2) Tubo intercambiador de calor, (3) Portado de calor, (4) Sellador. (Silwa, 2016).

La configuración (a) Intercambiador de calor coaxial: Este tipo de diseño de pozo inyecta el fluido en el tubo exterior y produce vapor del tubo interior. Se espera que el líquido de trabajo se caliente y alcance el punto de ebullición en el fondo del yacimiento.

La configuración (b) Intercambiador de calor tipo demi: Este tipo de diseño de pozo utiliza un separador para separar el líquido de inyección y el vapor de producción dentro de la misma tubería.

La configuración (c) Intercambiador de vapor con una sola tubería en forma de U: Este diseño es como el demi-tipo de intercambiador de calor; sin embargo, tanto el fluido de inyección como el

de producción están en tuberías separadas pero conectadas a través de una configuración en forma de U en la parte inferior.

La configuración (d). Intercambiador de calor con tubería en U doble: Este tipo de diseño de pozo es similar con el diseño de tubo en U simple, pero con 2 tubos de inyección y 2 de producción para aumentar el caudal.

Entre estas cuatro configuraciones, el tipo de intercambiador de calor coaxial es el más aplicable y se ha probado en varios campos geotérmicos para aumentar la productividad del campo con resultados positivos. La tubería aislada al vacío (VIT) es el elemento clave para que la temperatura se mantenga entre las tuberías de inyección y producción, y por ende la seleccionada para el completamiento de Paipa será la configuración de intercambiador de calor coaxial que va ligada a la tecnología de circuito cerrado. (Riyanto, 2022).

### **Esquema del estado mecánico del pozo teórico UISPAIPA-1**

El completamiento mostrado en la Figura 31 fue diseñado de manera teórica, haciendo una analogía con un trabajo de investigación de una propuesta de diseño para la perforación de un pozo exploratorio de geotermia en Jamanco, Ecuador. (Ayala, 2017). Cabe aclarar que la planeación del diseño es limitada por la falta de información que se puede obtener de la zona de interés, sin embargo, este diseño del pozo planteado para la zona de interés en Paipa es un posible escenario conceptual que se planteó bajo los parámetros y las condiciones que se obtuvieron como se pueden observar en la tabla 7 que incluye información relevante como la ubicación, coordenadas y profundidades del pozo teórico, herramientas utilizadas, tecnología, profundidades, temperaturas, presión de saturación y un breve resumen de la litología que se pudiese encontrar durante la perforación del pozo.

**Tabla 7***Información general del diseño del pozo prospecto UISPaipa-1*

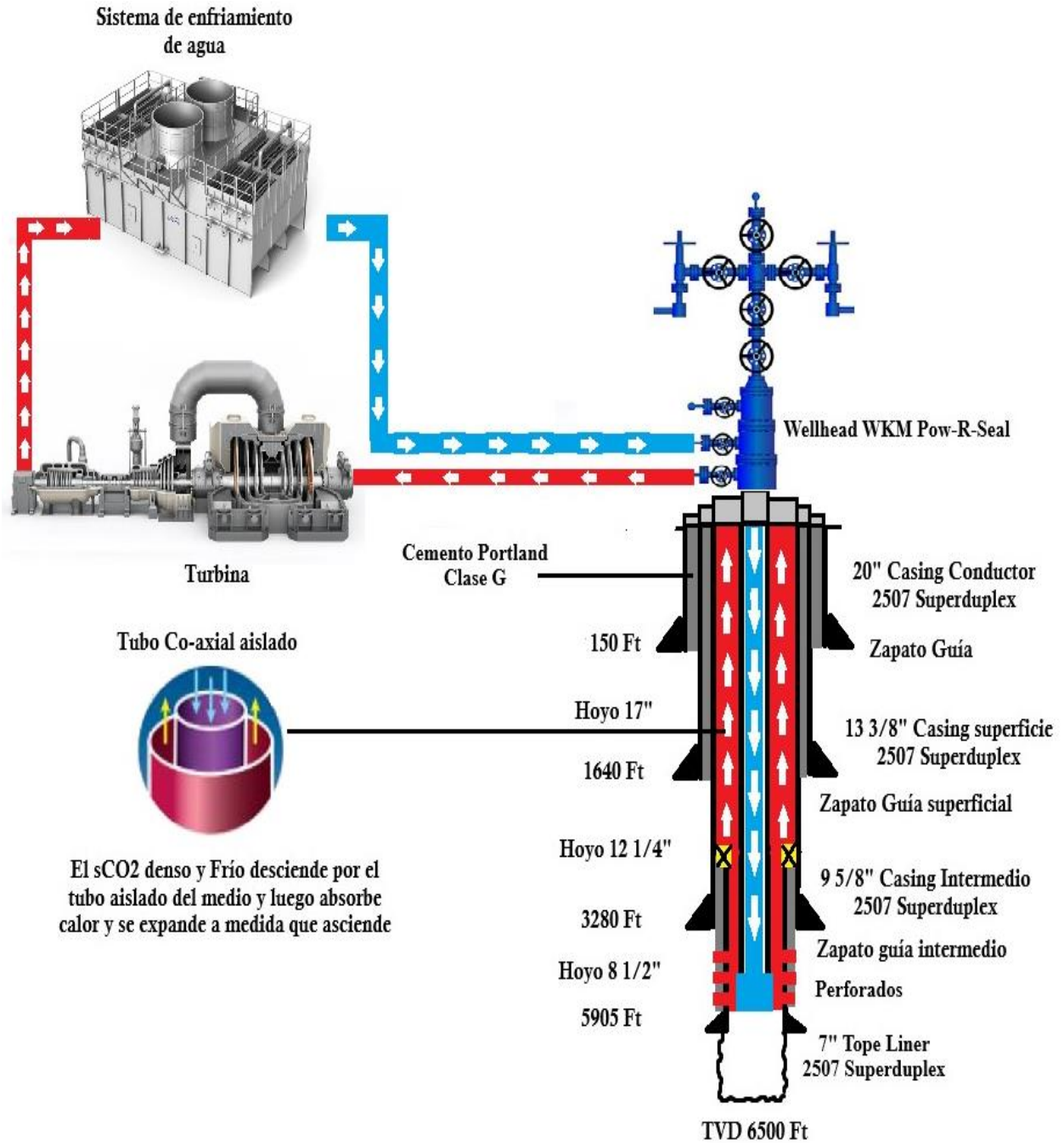
Departamento	Boyacá	Municipio	Paipa
Referencia Topográfica	Quebrada Honda		
Tipo de Pozo	Terrestre		
Coordenadas del pozo	Altura de la Mesa rotaria (ft)=15		
Coordenadas geográficas del casing conductor	Lat= 5"42"12"N	Long=73"06"28"W	
Coordenadas geográficas del objetivo	Lat= 5"42"12"N	Long=73"06"28"W	

Profundidad Total programada	TVD (ft)	MD (ft)
	6500	6500

Tecnología de completamiento	Tecnología de circuito cerrado (Close Loop)	
Tipo de configuración	Intercambiador de calor coaxial	
Temperatura promedio	220-320°C	
Cemento utilizado	Portland Clase G	Adición de 60% debido a los rangos de temperatura
Litología	Roca Reservorio	Roca Sello
	Areniscas de grano medio a grueso	Arcillas
Sistemas de superficie	Wellhead	Válvula maestra
	Compacto Cameron - SLB	WKM Pow - R - Seal
Tipo de tubería de revestimiento	Casing	
	Super Duplex 2507	

**Figura 31**

*Esquema de estado mecánico del pozo teórico UISPAIPA-1*



Nota: Fuente: autores. Imágenes tomadas de <https://www.shutterstock.com/es/>

## 6.6 Consideraciones

Completar la perforación geotérmica en la región de Paipa requiere un enfoque integral y detallado debido a las características geológicas, térmicas y químicas del yacimiento geotérmico allí. El despliegue de tecnologías avanzadas y una configuración precisa no solo garantiza un buen rendimiento y seguridad durante todo su ciclo de vida, sino que también maximiza la producción y la sostenibilidad de los recursos geotérmicos. La elección de los materiales y la tecnología adecuados es un factor determinante en el éxito de la construcción de pozos geotérmicos. El *casing* del pozo debe estar hecho de acero de alta resistencia con un revestimiento anticorrosión para soportar las duras condiciones del yacimiento y evitar el deterioro del pozo. Además, seleccionar un revestimiento de diámetro variable, comenzando con un diámetro amplio en la parte superior y disminuyendo con la profundidad, optimizará la instalación del equipo y mejorará el control de la presión del yacimiento.

El proceso de cementación también juega un papel importante. El uso de cemento diseñado para soportar altas temperaturas evitará daños y problemas de grietas al crear una barrera eficaz entre las áreas de producción y no producción. El uso de cemento primario y secundario es necesario para aislar adecuadamente las diferentes áreas de la formación, evitar la migración de fluidos y mantener la presión adecuada dentro del pozo. La perforación direccional utiliza motores de fondo de pozo y un sistema de medición durante la perforación (MWD) que permite el ajuste en tiempo real de la trayectoria de perforación, optimizando la exposición a las áreas más productivas y evitando las áreas de mayor riesgo geológico. La perforación direccional, basada en estudios geofísicos detallados, maximiza la eficiencia de la extracción de energía geotérmica y garantiza la durabilidad de los sedimentos. La elección de tuberías de producción con aislamiento y revestimiento anticorrosión ayuda a aumentar la eficiencia del transporte de fluidos geotérmicos

y a prolongar la vida útil del pozo. La instalación de empacadores en ubicaciones específicas garantiza un aislamiento efectivo de las zonas de producción, evita la mezcla de fluidos y mantiene la integridad del pozo. El sistema de elevación de líquidos incluirá una bomba de alta temperatura diseñada para manejar líquidos a alta temperatura y, si corresponde, un sistema de elevación natural. Estos sistemas garantizan un funcionamiento continuo y eficiente mientras se adaptan a las duras condiciones del campo geotérmico de Paipa. El monitoreo y control continuos son críticos para el éxito a largo plazo del pozo. La instalación de sensores de temperatura, presión y flujo a diferentes profundidades permite el monitoreo en tiempo real, facilitando ajustes operativos inmediatos y previniendo posibles problemas. La integración de un sistema de alerta y respuesta rápida garantiza la seguridad y la continuidad en la producción si se detectan anomalías. Es necesario adaptarse a las características únicas de Paipa. La compleja geología de la zona, caracterizada por fallas y variaciones en la composición del suelo, requiere un diseño flexible y adaptativo para maximizar la eficiencia de la explotación de la energía geotérmica. Las altas temperaturas y presiones en los yacimientos requieren el uso de tecnologías y materiales que puedan operar de manera eficiente y segura en estas duras condiciones. Además, la composición mineral de los fluidos geotérmicos en las tuberías puede causar corrosión y formación de depósitos, por lo que la selección de materiales y los métodos de tratamiento adecuados minimizarán estos efectos, asegurando la longevidad del pozo.

La optimización de la producción es otro aspecto importante. El diseño detallado y adaptable garantiza que se extraiga la máxima cantidad de energía del depósito geotérmico, lo que contribuye significativamente a la matriz energética de la región. La aplicación de tecnologías avanzadas y métodos de monitoreo continuo permite optimizar las operaciones de los pozos, reducir costos y aumentar la eficiencia. La seguridad y el mantenimiento son importantes. La

selección de materiales de alta durabilidad y la implementación de un sistema de monitoreo avanzado garantizan la seguridad estructural del pozo y la protección de los trabajadores. Un enfoque proactivo del mantenimiento basado en datos de monitoreo en tiempo real garantiza la longevidad y minimiza el tiempo de inactividad no planificado.

En resumen, el diseño conceptual de un pozo geotérmico tubular es una tarea compleja que requiere un enfoque multidisciplinario. Elegir tecnologías avanzadas, adaptarse a condiciones geológicas y de temperatura específicas e implementar técnicas de monitoreo y mantenimiento continuo es esencial para garantizar el éxito del proyecto. Este enfoque integrado no sólo maximiza la producción de energía geotérmica, sino que también garantiza operaciones estables y seguridad a largo plazo, contribuyendo al desarrollo energético y económico de la región de Paipa.

## 7. Conclusiones

En este trabajo se consiguió llevar a cabo un examen minucioso de las tecnologías de completamiento geotérmico, determinando cuáles son las más adecuadas de acuerdo con las características de los campos geotérmicos. Las variables evaluadas incluyeron la temperatura, la presión y las características geológicas, lo que permitió la conclusión de que tecnologías como el completamiento multilateral y los sistemas de monitoreo en tiempo real con fibra óptica mejoran de manera significativa la eficiencia operativa. Este tipo de completamiento llevó a un incremento de hasta un 30% en la eficacia de la extracción de calor en los casos examinados. Además, la utilización de casing con titanio permitió aumentar la resistencia del pozo y disminuir los gastos de mantenimiento hasta un 20%.

Se demostró a través de análisis comparativos que al utilizar revestimientos con titanio, cementación avanzada y tuberías expansibles en proyectos como Cerro Pabellón (Chile) y Habanero (Australia), se logró disminuir los gastos de mantenimiento en un 20% y aumentar la vida útil del pozo. Estos ajustes posibilitan la maximización de la eficiencia en el funcionamiento, asegurando una generación continua de calor con temperaturas que oscilan entre 200°C y 300°C, dependiendo de las circunstancias analizadas. Los intercambiadores de calor de pozo (BHE) han sido útiles particularmente en proyectos donde la sostenibilidad y la eficiencia térmica son esenciales, como en Alemania con el proyecto Genesys. Se ha demostrado que estas tecnologías aumentan la eficiencia térmica en un 25% máximo.

El diseño teórico sugerido para el campo geotérmico de Paipa, Boyacá, apoyado en configuraciones avanzadas, posee un potencial importante para incrementar la producción geotérmica en Colombia. Este diseño involucra la instalación de un intercambiador de calor coaxial que utiliza la tecnología BHE conocida como "Close Loop", el cual puede resistir las

condiciones geológicas locales, incluyendo temperaturas que exceden los 225°C en el yacimiento. Además de eso, se realizan la instalación de tuberías y elementos como tuberías de revestimiento y empaques que incluyen materiales especialmente diseñados para resistir los efectos fisicoquímicos de la corrosión. Este método garantiza la sostenibilidad técnica y financiera del proyecto a largo plazo.

## 8. Recomendaciones

Se sugiere seguir empleando tuberías expandibles en campos geotérmicos de elevada temperatura, como en Los Humeros, México, con el fin de garantizar una prolongada vida útil del pozo y disminuir los gastos de mantenimiento a largo plazo. Investigaciones han comprobado que este tipo de tecnologías pueden aumentar la integridad estructural de los pozos y reducir de manera considerable la necesidad de arreglos, lo que resulta en una mejora en la eficiencia de la extracción de calor.

Uso de tecnología de fibra óptica: Se recomienda continuar utilizando tecnología de monitoreo en tiempo real con fibra óptica para supervisar las condiciones del pozo, como la temperatura y la presión. Estas herramientas posibilitan una reacción veloz frente a posibles irregularidades, aumentando la seguridad en la operación y mejorando la eficacia del sistema geotérmico.

Tecnología avanzada de cementación: A raíz de los logros favorables obtenidos en proyectos de alto riesgo de corrosión, se sugiere la utilización de cementos especializados con el fin de garantizar la durabilidad a largo plazo del pozo, especialmente en zonas con variaciones extremas de temperatura y fluidos corrosivos, similares a los encontrados en el campo de Cerro Pabellón en Chile.

Exploración de nuevas disposiciones de intercambiadores de calor: Se propone llevar a cabo investigaciones adicionales sobre intercambiadores de calor coaxiales, similares a los utilizados en Europa, con el fin de analizar la viabilidad de su uso en zonas geotérmicas de Colombia. La eficacia de esta tecnología se ha demostrado en la disminución del impacto ambiental y la mejora de los costos en entornos complicados.

Revisión de la factibilidad de materiales anticorrosivos actualizados: Futuras investigaciones podrían centrarse en la creación y utilización de materiales nuevos que combatan la corrosión en las tuberías y en el cementado, aumentando la resistencia y la protección de los pozos geotérmicos. Esto sería especialmente beneficioso en áreas altamente corrosivas como California y México.

Sería ventajoso continuar con investigaciones comparativas sobre los métodos de completamiento empleados en diversos campos geotérmicos a nivel mundial, como en Australia y Larderello (Italia), a fin de determinar las prácticas más eficaces que puedan ser aplicadas a las condiciones geológicas específicas de Colombia.

### Referencias Bibliográficas

- Alfaro, C, Rueda, J, Casallas, Y, Rodríguez, G, Malo, J. (2020). Estimación Preliminar del Potencial Geotérmico de Colombia. Servicio Geológico Colombiano.
- Ayala, D. (2017). Propuesta de diseño para la perforación de un pozo exploratorio de geotermia en Jamanco, Ecuador. Universitat de Barcelona.
- Barajas Paredes, S. F., & Otero Anaya, D. J. (2023). Efecto de la temperatura en la adherencia y resistencia a la compresión del cemento de pozo geotérmico. Universidad Industrial de Santander.
- Bertani, R. (2007), “World geothermal generation in 2007”, Geo-Heat Center quarterly bulletin, septiembre 2007, pp. 8-19
- Bolívar C, Rafael A, Campos S, Mersha E, & Ramírez, Carmen. (2008). Efectos de gases agrios sobre cementos petroleros. *Interciencia*, 33(9), 672-679. Recuperado en 02 de agosto de 2024, de [http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0378-18442008000900011&lng=es&tlng=es](http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442008000900011&lng=es&tlng=es)
- Chemwotei, S. C. (2011). GEOTHERMAL DRILLING FLUIDS.
- Dickson, Mary H & Fanelli, M. (2004). ¿Qué es la Energía Geotérmica? *Istituto Di Geoscienze e Georisors*.
- Di Martino, G., & Ruch, A. (2018). Non-Portland Cement Slurry Development and Application for Ultrahigh-Temperature Geothermal Well with Supercritical Conditions. Proceedings of the IADC/SPE Asia Pacific Drilling Technology Conference, APDT, 2018-August, 27– 29. <https://doi.org/10.2118/190974-MS>
- DiPippo, Ronald. (2012). Environmental Impact of Geothermal Power Plants.

- Distribuidor de tubing de aleación especial de acero inoxidable. (2018, julio 11). PAC Stainless; PAC Stainless Ltd. <https://www.pacstainless.com/es/>
- Erge, O., Sakaoglu, K., Sonmez, A., Bagatir, G., Dogan, H. A., Ay, A., & Gucuyener, I. H. (2020). Overview and design principles of drilling fluids systems for geothermal Wells in Turkey. *Geothermics*, 88. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.101897>
- Fernandez, P. (2015). *Fundamentos de Geotermia*. Biblioteca sobre Ingeniería Energética.
- González-Idárraga, C. (2020). Caracterización Resistiva 3D del Área Geotérmica de Paipa, Colombia. *Boletín de Geología*, vol. 42, núm. 3. <https://orcid.org/0000-0001-8137-0633>
- Hernández, R., Chandarjit, L., & Levie, I. (n.d.). *Composite Ceramic Centralizers Geothermal Well Construction in Highly Corrosive Environments: Case History.— for*
- Hernandez, P. (2015). *Fundamentos de la Energía Geotérmica*. Biblioteca sobre la Ingeniería Energética. *Redsauce Engineering Services*.
- Herrera, J. (2020). Introducción a la Minería Subterránea. Vol. IV: Métodos de explotación de interior. *Laboratorio de Innovación en Tecnologías Mineras*.
- Hochstein, M. (1990). Classification and assessment of geothermal resources. *UNITAR/UNDP Centre on small Energy Sources* 31-59.
- Hodson-clarke, A., Rudolf, R., Bour, D., & Russell, P. (2016). *Key Factors to Successful Drilling and Completion of EGS Well in Cooper Basin*. 1–9.
- Hole, H. (2008). *DRILLING FLUIDS FOR DRILLING OF GEOTHERMAL WELLS*
- Hoyos, J.F., Sáenz, M., Cote, J., Sáenz, J., Cárdenas, I., Rocha, R., Peláez, L., Sierra, J.C., Torres, G., Martínez, C.J., Reina, D., Rey, D., Canguçu, D., Lezaca, M.F., Latorre, J., Duarte, E., Ocampo, D., Mejía, G., Mancera, J., ... Prince, I. (2017). Universidad Nacional de Colombia,

Revista Semana. Consultado el 26 de agosto de 2021. Recuperado de:  
<https://especiales.semana.com/universidad-nacional/index.html>

Karakosta, K., Mitropoulos, A. C., & Kyzas, G. Z. (2021). A review in nanopolymers for drilling fluids applications. *Journal of Molecular Structure*, 1227.  
<https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.129702>

Khaemba, A. W. (2014). Well design, cementing techniques and well work-over to land deep production casings in the menengai field. *Report*, 17(17), 295–324.

Kholod, N, et al. (2020). Global methane emissions from coal mining to continue growing even with declining coal production, *J. Clean. Prod.*, vol. 256, p. 120489.

Kruszewski, M., Ramirez, M., Wittig, V., Sanchez, M., & Bracke, R. (2018). Drilling and well completion challenges in the Los Humeros geothermal field, Mexico. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 42, 337–348.

Lu, Y.-B., & Ying, C. (2010). PVC U-tube Drilling and Completion Technology in Shallow Geothermal Development. *Proceedings World Geothermal Congress*, 2, 25–29.

Marzolf, N. (2014). EMPRENDIMIENTO DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN COLOMBIA, vol. 1, n.o 1, p. 86.

Merzoug, Ahmed & Okoroafor, Esuru. (2023). Selection Criteria for Repurposing Oil and Gas Well to Geothermal Heat Extraction.

Mohamed, A., Salehi, S., & Ahmed, R. (2021). Significance and complications of drilling fluid rheology in geothermal drilling: A review. In *Geothermics* (Vol. 93). Elsevier Ltd.  
<https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102066>

OIEA, Viena (2001). Informe Anual

Okech, R. R., Liu, X., Falcone, G., & Teodoriu, C. (2015). *Unconventional Completion Design*

*for Deep Geothermal Wells*. <https://doi.org/10.2118/177228-ms>

Olasolo, P., Juárez, M. C., Morales, M. P., Damico, S., & Liarte, I. A. (2016). Enhanced geothermal systems (EGS): A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*

Olson, J., Augustine, C., Eustes, A., & Fleckenstein, W. (2015). Figure 1: Vertical and deviated well arrangements with vertically oriented fractures (Polsky, et. al Design Considerations for Applying Multi-Zonal Isolation Techniques in Horizontal Wells in a Geothermal Setting. *Proceedings*, 1–5.

Oppelt, J., & Lehr, J. (2012). Innovative drilling and completion concept for geothermal applications. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 36 1, 109–113.

Ortiz, C. (2024). Estado del arte del efecto de altas temperaturas en la estabilidad de fluidos de perforación geotérmicos, 21–28.

PetroWiki. (2021). Geothermal drilling and completion. [https://petrowiki.spe.org/Geothermal\\_drilling\\_and\\_completion](https://petrowiki.spe.org/Geothermal_drilling_and_completion). (Fecha de consulta 13 de mayo del 2024)

P. Olasolo, M.C. Juárez, M.P. Morales, Sebastiano D'Amico, I.A. Liarte. (2016). Enhanced geothermal systems (EGS): A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 56.

Riyanto Nico. (2022). Introduction of the Closed-Loop Technology for Geothermal Wells. The 8th Indonesia International Geothermal Convention & Exhibition (IIGCE).

Rojas, O. (2012). Contribución al modelo geotérmico asociado al sistema volcánico Nevado del Ruiz - Colombia, por medio del análisis de la relación entre la susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica y térmica del sistema

Santoyo, E. & Barragán, Rosa. (2010). *Energía geotérmica*. Ciencia. 61. 40-51.

- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2017). Actualización del modelo conceptual del área geotérmica de Paipa.
- Silwa, Aneta S. et al., 2016. “Deep Borehole Heat Exchangers — A Conceptual and Comparative Review,” *International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration*, Vol 24, 2016.
- SLB. (2017). *Surface System Technology*
- Sledz, D., Johnson, A., Pollock, S., Fraser, A., Khastoo, R. (2020). Design Features of an Emerging Casing Inspection Technology and its implication for Geothermal Well Quenching. *GRC Transactions*, Vol. 44
- Solís, L. (2016). Propuesta de modelo conceptual para el reservorio del Proyecto Geotérmico Borinquen, basado en análisis unidimensional de la técnica magnetotelúrica. Liberia, Guanacaste, Costa Rica. *Instituto Costarricense de Electricidad*.
- Teodoriu, C., & Falcone, G. (2009). Comparing completion design in hydrocarbon and geothermal wells: The need to evaluate the integrity of casing connections subject to thermal stresses. *Geothermics*, 38(2), 238–246. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2008.11.006>
- Titov, A., Norbeck, J., Dadi, S., Voller, K., Woitt, M., Fercho, S., McConville, E., Lang, C., Agarwal, S., Gradl, C., & Latimer, T. (2023). Case Study: Completion and Well Placement Optimization Using Distributed Fiber Optic Sensing in Next-Generation Geothermal Projects. *Society of Petroleum Engineers - SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference, URTC 2023*. <https://doi.org/10.15530/urtec-2023-3852680>
- THAYERSalvador, U. D. E. E. L., Arquitectura, F. D. E. I. Y., Enrique, D., Sidorchuc, N., & Gudmundsdóttir, C. V. (2018). *DIPLOMADO EN GEOTERMIA PARA AMERICA LATINA EDICION 2018 TEMA: Re- Evaluación de la situación operativa del yacimiento DG-18D PRESENTAN: Gustavo Alejandro Ángel Maravilla ASESOR: Manuel Ernesto Monterrosa*.

- ThinkEnergy Research. (2023). Crecimiento de la Capacidad instalada de energía eléctrica producida a partir de energía geotérmica en diferentes países
- UPME. (2020). Plan Energético Nacional 2020-2050. Resumen Ejecutivo, Ministerio de Minas y Energía.
- Wang, L., Zhang, M., & Peng, L. (2014). Study on application of geothermal well gravel-filling technology in loose rock areas. *Procedia Engineering*, 73(May), 35–40. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.06.167>
- Zhu, J. (2019). Prevent Cement Strength Retrogression Under Ultra High Temperature. Society of Petroleum Engineers - Abu Dhabi International Petroleum Exhibition and Conference 2019, ADIP 2019. <https://doi.org/10.2118/197739-MS>