



Propuesta conceptual matemática para la implementación de un Ciclo Rankine de transformación energética, a partir de la fuente termal Aguacaliente, caso de estudio finca Santa Rosa, Pachavita-Boyacá.

Natalia Villamil Fernández

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, fecha de terminación del trabajo

Propuesta conceptual matemática para la implementación de un Ciclo Rankine de transformación energética, a partir de la fuente termal Aguacaliente, caso de estudio finca Santa Rosa, Pachavita-Boyacá.

Natalia Villamil Fernández

Trabajo de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:
Ingeniero Ambiental

Director (a):
Geo. Esp. MSc. Ricardo Antonio Tobón Rojas

Línea de Investigación:
Ingeniería para la sostenibilidad

Universidad El Bosque
Facultad de Ingeniería
Programa Ingeniería Ambiental
Bogotá, Colombia
2022

Nota de Salvedad de Responsabilidad Institucional

La Universidad El Bosque, no se hace responsable de los conceptos emitidos por los investigadores en su trabajo, solo velará por el rigor científico, metodológico y ético del mismo en aras de la búsqueda de la verdad y la justicia.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo de grado a Dios por ser mi guía, a mis padres quienes hicieron que todo esto fuese posible y siempre han creído en mí, a mi familia y amigos por su compañía incondicional en esta gran etapa.

Me dedico este trabajo por siempre demostrarme que puedo con todo lo que me propongo y más, que los resultados son muestra de mi amor, esfuerzo y dedicación por lo que hago.

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios por guiarme en este camino y permitir que todo saliera mejor de lo que esperaba, a mis padres por ser los mejores coequiperos en este proceso y siempre alentarme a perseguir mis sueños. También quiero agradecerle a mi director, Ricardo Antonio Tobón Rojas, quién fue de gran ayuda en la realización de este proyecto y siempre estuvo dispuesto a compartir su conocimiento, además de ser un excelente guía y amigo. Adicionalmente, quiero resaltar el apoyo de mis amigos, quienes estuvieron siempre presentes, y finalmente al señor Darío Amaya, dueño de la finca Santa Rosa, por permitirme desarrollar este proyecto y confiar plenamente en mi ética profesional.

Tabla de Contenido

Tabla de Contenido	7
Índice de figuras.....	9
Índice de tablas.....	9
Resumen.....	10
Abstract	10
Introducción	11
1. Planteamiento del problema.....	13
1.1. Pregunta de investigación.....	14
2. Justificación.....	15
3. Objetivos	16
3.1. General	16
3.2. Específicos.....	16
4. Aspectos éticos.....	16
5. Marco de referencia.....	17
5.1. Estado del arte	17
5.1.1. Generación de Energía Geotérmica en Europa	17
5.1.2. Generación de Energía Geotérmica en América.....	19
5.1.3. Generación de Energía Geotérmica en Colombia.....	21
5.2. Marco teórico - conceptual.....	23
5.2.1. Energías Alternativas	23
5.2.2. Energía Geotérmica.....	25
5.2.3. Fuentes termales.....	27
5.2.4. Ciclo Rankine.....	28
5.3. Marco legal y normativo	30
5.4. Marco geográfico y descripción del territorio.....	32
5.5. Marco institucional.....	36
5.5.1. Actores directos.....	36
5.5.2. Actores indirectos	37
6. Metodología	37
6.1. Enfoque	37
6.2. Método.....	38
6.3. Alcance.....	38
6.4. Técnicas e Instrumentos	38
6.5. Metodología por objetivos.....	40

6.5.1. Objetivo específico 1	40
6.5.2. Objetivo específico 2	41
6.5.3. Objetivo específico 3	43
7. Resultados, análisis y discusión.	44
7.1. Identificar las características fisicoquímicas de la fuente termal Aguacaliente y las socioeconómicas de la finca.....	44
7.1.1. Caracterización fisicoquímica.....	44
7.1.2. Caracterización socioeconómica de la finca	49
7.2. Estimar la cantidad de energía eléctrica producida, a partir de la aplicación del modelo del Ciclo Rankine en el software EES	51
7.3. Establecer las posibles aplicaciones o usos, para el correcto aprovechamiento de la energía geotérmica disponible en la finca.....	55
8. Conclusiones	59
9. Recomendaciones.....	60
10. Referencias Bibliográficas	61
11. Anexos.....	65
11.1. Anexo 1. Plan de Trabajo	65
11.2. Anexo 2. Entrevista – Caracterización socioeconómica de la finca.....	66
11.3. Anexo 3. Memoria de cálculo digitado en el software EES.....	67
11.4. Anexo 4. Facturación del servicio de energía.....	68

Índice de figuras

Figura 1. Calor geotermal de Europa.	18
Figura 2. Capacidad instalada en países de América, para el año 2015.	20
Figura 3. Zonas de especial importancia para la exploración del recurso geotérmico en Colombia.	22
Figura 4. Rendimiento del Ciclo Rankine.	29
Figura 5. Esquema de un Ciclo Rankine Orgánico Básico.	29
Figura 6. Contextualización geográfica región del Valle de Tenza.	33
Figura 7. Macrolocalización del proyecto.	34
Figura 8. Área de la Finca Santa Rosa.	35
Figura 9. Organigrama de los actores relevantes en el desarrollo del Proyecto.	36
Figura 10. Contextualización de las fases.	44
Figura 11. Registro de la temperatura en campo.	44
Figura 12. Origen telúrico de las aguas termales.	46
Figura 13. Medición en campo con el multiparámetro.	46
Figura 14. Diagrama triangular Cl - HCO ₃ - SO ₄ de la fuente termal Aguacaliente.	47
Figura 15. Tipos de aguas según Stiff.	48
Figura 16. Diagrama de Stiff de la fuente termal Aguacaliente.	48
Figura 17. Curva de saturación del Isobutano.	51
Figura 18. Selección del tipo de función.	52
Figura 19. Selección de las funciones.	52
Figura 20. Modelo matemático del Ciclo Rankine en el software EES.	53
Figura 21. Resultados del modelo matemático del Ciclo Rankine en el software EES.	54
Figura 22. Usos típicos de la Energía Geotérmica a diferentes temperaturas.	55

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades ambientales, seguridad y salud de algunos fluidos de trabajo.	30
Tabla 2. Matriz Legal y Normativa.	31
Tabla 3. Matriz Metodológica.	39
Tabla 4. Registro de datos obtenidos de temperatura.	40
Tabla 5. Registro de las mediciones de temperatura obtenidas en campo.	44
Tabla 6. Resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en campo.	46
Tabla 7. Tipos químicos de aguas en los sistemas geotérmicos.	47
Tabla 8. Consumo mensual de los componentes conectados a la red eléctrica.	56

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo general determinar la cantidad de energía producida y los posibles usos, a partir de la simulación del modelo matemático correspondiente al Ciclo Rankine, para la obtención de energía de baja potencia a partir de la fuente termal Aguacaliente ubicada en la finca Santa Rosa del municipio de Pachavita-Boyacá. Lo anterior se realizó a través de un análisis fisicoquímico que permitió la caracterización de la naturaleza de la fuente termal en cuestión y obtuvo una temperatura promedio de 43,8°C, la cual fue la base para el desarrollo del modelo matemático del Ciclo Rankine con ayuda del software Engineering Equation Solver, donde los resultados obtenidos de este permitieron obtener una visión más clara del funcionamiento del ciclo condicionado por la temperatura y el fluido secundario escogido. Finalmente, con los datos obtenidos de generación de energía a través de la implementación conceptual de esta tecnología, se evaluó si la cantidad producida puede suplir la demanda actual del establecimiento, que en promedio es de 337kWh. Por otra parte, se recomendaron dos alternativas en base a la caracterización socioeconómica hecha previamente y se llegó a la conclusión de que el turismo sostenible y el calentamiento de galpones son viables, pero se debe tener en cuenta que para esto es necesario realizar un diagnóstico de alternativas y estudios técnicos que soporten la implementación de las misma.

Palabras clave: Geotermia, temperatura, baja entalpía, ciclo binario.

Abstract

The general objective of this work is to determine the amount of energy produced and the possible uses, based on the simulation of the mathematical model corresponding to the Rankine Cycle, to obtain low-power energy from the Aguacaliente thermal spring located on the farm. Santa Rosa in the municipality of Pachavita-Boyacá. The foregoing was carried out through a physicochemical analysis that allowed the characterization of the nature of the thermal spring in question and obtained an average temperature of 43.8 ° C, which was the basis for the development of the mathematical model of the Rankine Cycle with help of the Engineering Equation Solver software, where the results obtained from it allowed to obtain a clearer vision of the operation of the cycle conditioned by the temperature and the chosen secondary fluid. Finally, with the data obtained from energy generation through the conceptual implementation of this technology, it was evaluated if the amount produced can supply the current demand of the establishment, which on average is 337kWh. On the other hand, two alternatives were recommended based on the socioeconomic characterization made previously and it was concluded that sustainable tourism and the heating of sheds are viable, but it must be taken into account that for this it is necessary to carry out a diagnosis of alternatives and technical studies that support their implementation.

Keywords: Geothermal, temperature, low enthalpy, binary cycle.

Introducción

El presente trabajo de investigación expone la posibilidad de aprovechar el potencial de la fuente termal Aguacaliente ubicada en la finca Santa Rosa del municipio de Pachavita-Boyacá, para la generación de energía de baja potencia, esto a través del análisis fisicoquímico realizado en campo durante cuatro meses, donde se realizó la medición de temperatura en intervalos de diez minutos durante una hora, para así poder obtener el valor promedio de este parámetro en la fuente termal en cuestión, además se evaluaron otros parámetros como el pH, la salinidad y conductividad eléctrica, los cuales contribuyen a identificar el comportamiento y las dinámicas de las aguas presentes. A partir de los resultados obtenidos en campo y la información secundaria, se determina qué, la tecnología que mejor se ajusta a este caso después de realizada la evaluación, es la del Ciclo Rankine, la cual utiliza Isobutano como fluido de trabajo con propiedades termodinámicas críticas muy por debajo de las presentes en el agua termal disponible. Se realiza el modelo matemático teniendo en cuenta cada uno de los componentes del ciclo y se emplea el programa Engineering Equation Solver (EES) versión 2.0, el cual permite organizar, analizar y procesar la información obtenida en campo, para así determinar de manera conceptual la cantidad de energía que se puede obtener.

La ejecución de este trabajo estuvo influenciada por la relevancia que representa para la población este tipo de proyectos sobre el aprovechamiento del recurso geotérmico a nivel local, así mismo se desarrolló un análisis diagnóstico inicial y un levantamiento de información de la condición actual de esta temática en el territorio nacional. El aprovechamiento de la energía geotérmica mediante ciclos binarios viene utilizándose décadas atrás, datando del 1967 en Nueva Zelanda, donde se adoptan este tipo de tecnologías cuando la temperatura del recurso no es muy elevada, es decir, en los yacimientos de media a baja temperatura, o cuando las condiciones del fluido geotérmico no son los más aptos para el contacto directo con los mecanismos de la planta; y se emplea un fluido secundario de carácter orgánico en el ciclo de potencia, y por ello se le denomina Ciclo de Rankine. La problemática relacionada a la ejecución del presente trabajo, se desarrolla bajo las tradiciones de la región, donde la obtención de energía para las diferentes actividades económicas, está asociada a la quema de combustibles fósiles, que contribuyen potencialmente a la generación de GEI (gases de efecto invernadero) y contribuyen al deterioro paisajístico del territorio.

En los primeros capítulos se realizó un análisis del contexto de la investigación, contemplado en la justificación, el planteamiento del problema, pregunta problema y los objetivos, general y específicos. Lo anterior da paso a los marcos de referencia, que en primer lugar se encuentra el *estado del arte*, donde se expone el tema principal del presente trabajo con una escala de lo mundial a lo regional, citando diferentes trabajos desarrollados en dichos escenarios. Posteriormente, en el marco *teórico-conceptual*, se solventan términos y argumentos de temas necesarios para interpretar el presente trabajo de investigación, los cuales fueron *las Energías Alternativas, la Energía Geotérmica, las Fuentes Termales y el Ciclo Rankine*. Dentro del *marco legal y normativo*, se encuentran algunas leyes, políticas y decretos relacionados con la energía geotérmica y su desarrollo nacional, además de un análisis de los avances de las misma en el país y una comparación con la realidad mundial. En el *marco geográfico y de descripción del territorio*, se realizó una descripción semidetallada de las características geográficas y locativas de la zona objeto de estudio. Por último, el *marco institucional* se compone de la descripción e identificación de actores de los cuales se pudo extraer información o que presentan relación al estudio o regulación del recurso geotérmico; con base en esto, se realizó un esquema de jerarquía y relaciones existentes. En el siguiente capítulo, se hizo el planteamiento del *diseño metodológico* del trabajo, donde se ordena el

documento dentro del método y alcances de una investigación cuantitativa; adicionalmente se presenta la metodología por objetivo específico y se resaltan diferentes autores que se emplearon como referencia para la realización de este apartado. En el capítulo final se realizó el análisis y discusión de los resultados, organizados de la siguiente manera; primero se tomaron los resultados por cada uno de los objetivos específicos y se realizó su respectivo análisis de acuerdo con la información primaria consultada, después de esto se redactó la discusión que integró los resultados de los tres objetivos específicos planteados, permitiendo generar al lector una visión integral de la finalidad del presente trabajo.

1. Planteamiento del problema

El uso de fuentes de energía tradicional como los combustibles de origen fósil y la madera, trae consigo un potencial agotamiento de los recursos e impactos como la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales afectan de forma significativa al medio natural y social. Actualmente la mayor parte de las poblaciones rurales de Colombia continúan empleando estas fuentes de energía como insumo para la producción, puesto que la instalación de redes eléctricas en el territorio representa altos costos de inversión y los periodos de retorno no son rentables para las empresas que prestan el servicio; también existen otros limitantes que afectan la disponibilidad, como lo son la accesibilidad debido a la deficiente infraestructura vial del país, la ubicación remota de algunos territorios y el número de habitantes (Montalvo-Bonilla, 2016).

Las hidroeléctricas han sido una alternativa para afrontar este déficit energético y son consideradas en muchos casos como una fuente de energía renovable; adicional a esto, gracias a su alta popularidad son consideradas como un sinónimo de desarrollo, tanto así que el 70% de la generación de energía en el país, dependen de la operación de ellas (Rico, 2018). Para la zona de estudio, la central hidroeléctrica AES Chivor es quien se encarga de la transformación de energía mecánica producida por turbinas a energía eléctrica; esta es reconocida como una de las principales actividades económicas de la región y ocupa el tercer lugar en las hidroeléctricas con mayor generación de energía, con una capacidad instalada de 1.000 MW. De forma paralela se resaltan los impactos significativos a la región por parte de la construcción y operación de la hidroeléctrica, donde algunos sectores de la población, especialmente aquellos que debieron vender sus predios para dar lugar a la represa, se consideran afectados en primer lugar por no recibir compensaciones económicas adecuadas, y en segundo lugar por los impactos ambientales negativos que afectan la disponibilidad del recurso hídrico dentro la región, la calidad y productividad de los suelos, como es el caso de la producción de café, afectado por los aumentos de humedad (Hernández & Alarcón, 2017).

Adicional a lo anterior, los altos costos del servicio de energía que se le presta a la comunidad rural del territorio, impiden el desarrollo de las actividades agropecuarias, lo cual desencadena en una pérdida de la competitividad productiva frente a otras regiones del país. Las comunidades rurales han optado por continuar sus procesos utilizando fuentes de energía tradicional como combustibles fósiles, que traen consigo otro tipo de problemáticas. Actualmente para el desarrollo de Unidades Productivas Agropecuarias dentro de la región, se tiene que las fuentes de energía alternativa, tales como el biogás, eólica, solar y geotérmica, para la realización de dichas actividades, aún presentan bajas tasas de implementación. En general se depende de la energía eléctrica, donde el territorio bajo estudio presenta un alto índice de cobertura y conexión. Se tiene que, como fuentes de energía para actividades agropecuarias, el 76% proviene de la red eléctrica, el 11% de plantas eléctricas, el 9% combustibles (gasolina, ACPM, gas, entre otros) y menos del 5% de energías renovables (Hernández & Alarcón, 2017).

Por otra parte, el desarrollo geotérmico en Colombia ha sido bastante lento, llevando a un desconocimiento del gran potencial del país. Actualmente existen diversos estudios sobre la ocurrencia de vulcanismo activo y las manifestaciones de sistemas hidrotermales, pero no se cuenta con un conocimiento específico relacionado a la magnitud que posee este recurso y como puede ser utilizado para el beneficio ambiental del territorio, a través de la implementación de tecnologías que operan bajo los principios termodinámicos de los ciclos Rankine y ciclos combinados (UPME, 2015). Así mismo el desaprovechamiento del recurso geotérmico producido por las fuentes termales de manera natural,

representa un desconocimiento de las dinámicas del sistema, provocando que se recurra a energías tradicionales, las cuales traen consigo una serie de impactos al ambiente y su relación costo - beneficio es insostenible para las comunidades rurales de algunos municipios del país, esto permite pensar en que el desarrollo energético no se ve como una prioridad para el estado colombiano y no se contempla así un cambio de fuentes convencionales a no convencionales y sostenibles.

Uno de los principales obstáculos en el desarrollo de proyectos geotérmicos en el país, es que aún no se han establecido de manera concreta y explícita, políticas de estado formales relacionadas al manejo y aprovechamiento del recurso energético proveniente de fuentes no convencionales. Autores como Cadena (2009) citado por (Giraldo-Ocampo, 2017), piensan que “hay una percepción generalizada de que la normatividad vigente para el mercado de energía en Colombia no permite el desarrollo de proyectos de generación con fuentes alternas de energía”(Cadena et al., 2009; Giraldo-Ocampo, 2017, p. 93), para complementar lo anterior Ortiz, Sabogal & Hurtado, (2012), afirman que,

la energía geotérmica, requiere de un marco jurídico que haga posible su desarrollo, papel de las entidades reguladoras, y una política clara de parte del Estado colombiano para incentivar la innovación y desarrollo de estas energías (...) que requieren una coordinación de orden nacional y regional. (...), también se hace necesario el fortalecimiento de las entidades nacionales relacionadas y de instituciones y mecanismos que fomenten las investigaciones, de tal forma que se incremente el conocimiento y cuantificación de los recursos energéticos. (p. 65)

1.1. Pregunta de investigación

¿Cómo la implementación del Ciclo Rankine puede contribuir al aprovechamiento de la energía geotérmica, dentro de las actividades desarrolladas en la finca Santa Rosa, vereda Suaquira, municipio de Pachavita - Boyacá?

2. Justificación

En el ejercicio como Ingeniero Ambiental se busca generar una aproximación a las diferentes alternativas para el aprovechamiento del recurso geotérmico disponible en el país, puesto que es una temática poco estudiada a nivel nacional y en gran parte del territorio el uso de las fuentes termales está asociado netamente a la actividad del turismo; por otra parte es importante resaltar que el desconocimiento de los diferentes potenciales de aprovechamiento de este recurso disponible, ha generado que el beneficio sea insostenible para las comunidades que se ubican dentro del área de influencia.

El estado colombiano ha priorizado en sus políticas, la promoción y uso eficiente de la energía, el desarrollo de fuentes no convencionales de energía, la mitigación del cambio climático y la reducción de las emisiones de Gases de efecto Invernadero (GEI); para poner en práctica dichas políticas, se ha buscado el desarrollo de las fuentes de energía no convencionales y aprovechar el alto potencial de otros recursos energéticos diferentes a la hidroelectricidad (Marzolf, 2015). En cuanto a la disponibilidad del recurso geotérmico, según Marzolf (2015),

Colombia cuenta con una posición geográfica privilegiada y una geología favorable, dado que parte del territorio se encuentra ubicado en el cinturón de Fuego del Pacífico, zona donde el gradiente de temperatura natural del subsuelo, cerca de la superficie, es anómalamente alto y se manifiesta con la actividad volcánica actual. (p.111)

Por otro lado, entre las fuentes de energía limpias, se destacan la energía solar, la eólica, la hidroeléctrica, biomasa, mareomotriz y entre otras. Pero la única fuente con disponibilidad ilimitada, todos los días del año y las veinticuatro horas del día con una potencia de abastecimiento extraordinaria se denomina Energía Geotérmica (Farietta-Jiménez, 2014). Una gran ventaja para el país según el Servicio Geológico Colombiano (2019), es que no todos los manantiales termales o sistemas geotérmicos con agua caliente están relacionados con volcanes, esto debido a la fragmentación presente en que se subdivide la corteza de la Tierra (llamadas placas tectónicas), se presentan fallas (o fracturas de la corteza a lo largo de las que se mueven las rocas que son separadas por la ruptura), que en ocasiones son profundas y permiten penetración (o infiltración) del agua de lluvia a varios cientos de metros, lo cual permite el aumento de su temperatura; esto explica en gran medida la presencia de la fuente termal Aguacaliente en una zona donde actualmente no existe algún tipo de actividad volcánica.

La energía geotérmica es una de las fuentes de energía con mayor potencial de aprovechamiento a nivel local en el territorio del país. Desde que se inició su aprovechamiento y a partir del constante avance en el conocimiento del recurso y de las tecnología de utilización, se han desarrollado diversos usos como baños termales, sistemas de calefacción, agricultura, acuicultura y algunos usos industriales como por ejemplo, refrigeración, secado industrial y generación de energía eléctrica.; lo anterior permite que las poblaciones que se encuentran en el área de influencia de la fuente termal puedan implementar estas tecnologías realmente novedosas en sus actividades tradicionales, lo cual genera una innovación y un mejor posicionamiento frente a otras zonas en el país en cuanto a eficiencia en los procesos (Servicio Geológico Colombiano, 2019a). Para Alfaro, (2015), las cifras de generación de energía en el país,

muestran que para el año 2014 la capacidad instalada era de 13.886 MW y la producción bruta de 56.790 GWh / año, pero se proyectó que para 2020 la capacidad debería aumentar a 14.971 MW y la producción

a 89.578 GWh / año, teniendo en cuenta que es la primera vez, en la cual el sector energético proyecta la utilización de recursos geotérmicos en la generación de energía. (p. 3)

También desde la Ingeniería Ambiental se soporta la implementación de este proyecto tomando los fundamentos del objetivo número siete de los ODS (Objetivos de Desarrollo Sostenible), quien se convierte en el horizonte para la implementación de estrategias y tecnologías, que permitan aprovechar los recursos asociados a las Fuentes no Convencionales de Energía Renovable (FNCER) que se encuentran disponibles en el territorio. Adicional a lo anterior la exploración y explotación de este tipo de energías trae consigo una serie de beneficios para las Zonas No Interconectadas (ZNI) del país y que actualmente no cuentan con un servicio de energía acorde a las necesidades, lo cual desencadena en un bajo desarrollo económico para las poblaciones que allí se encuentran; esto lleva a concluir que hace falta implementar políticas fuertes a nivel nacional y simultáneamente el desarrollo de las mismas por parte de los gobiernos locales, para así dignificar la calidad de vida de sus habitantes (Farietta-Jiménez, 2014). Por último, cabe mencionar que el Gobierno Nacional ha establecido ciertas metas enfocada al cumplimiento de este objetivo para el año 2030, entre las cuales se tiene garantizar el acceso de todas las regiones a los servicios energéticos asequibles, fiables y modernos, aumentar la capacidad de generación con energías limpias en 1.500 MW, frente a los 22,4 MW del 2018, entre otras (Departamento Nacional de Planeación, 2019).

3. Objetivos

3.1. General

Determinar la cantidad de energía producida por la fuente termal Aguacaliente ubicada en la finca Santa Rosa y sus posibles usos, a partir de la simulación del modelo matemático correspondiente al Ciclo Rankine.

3.2. Específicos

1. Identificar las características fisicoquímicas de la fuente termal Aguacaliente y las socioeconómicas de la finca.
2. Estimar la cantidad de energía eléctrica producida, a partir de la aplicación del modelo del Ciclo Rankine en el software EES.
3. Establecer las posibles aplicaciones o usos, para el correcto aprovechamiento de la energía geotérmica disponible en la finca.

4. Aspectos éticos

Las implicaciones éticas para el desarrollo del presente trabajo, se establecieron de acuerdo a la información obtenida en campo y la búsqueda bibliográfica que se realizó con la suficiente rigurosidad, tomando como herramienta una serie de bases de datos reconocidas a nivel mundial que proporcionaron un nivel de veracidad apropiado en los documentos consultados, creando así una línea base para el investigador y lector. Adicional a lo anterior, para la toma de muestras que se llevó a cabo en el lugar de interés, se obtuvo el permiso por parte del dueño de la finca y se siguieron las reglas establecidas por esta persona, respetando el contexto donde se desarrolla el escenario de interés, también las técnicas que se usaron son las aceptadas por la comunidad científica, asegurando que no se comprometieron los factores sociales, económico y ecológicos del entorno.

Para complementar la información resultante de las observaciones en campo, se realizó una entrevista semiestructurada al dueño de la finca, quien dio su consentimiento para grabar la conversación y aprobó que todo lo mencionado se podía emplear en los resultados de la investigación, los cuales fueron reportados con honestidad, sin llegar a afectar a los interesados. La realización de este proyecto contribuyó de manera directa a un tema poco abordado en la región, generando un valor agregado a la zona e identificando el potencial de aprovechamiento de los recursos disponibles en la misma; es así como el resultado final se entregó a la comunidad como una herramienta para futuros proyectos enfocados a la sostenibilidad del territorio, desde un primer espacio liderado por las comunidades rurales.

5. Marco de referencia

5.1. Estado del arte

Para la elaboración de este apartado se realizó un análisis documental relacionado a la temática central del presente trabajo de grado, utilizando bases de datos académicas como ProQuest, ScienceDirect, Scopus y Google Académico. Después se diseñaron diferentes estrategias de búsqueda utilizando Operadores Booleanos y Truncadores, para así encontrar la información de una forma más eficiente y reducir la cantidad de documentos relacionados. Las estrategias empleadas fueron las siguientes: **1. (“energía geotérmica” AND “fuentes termales”) OR (“energía geotérmica” AND “No volcánico”)** y **2. (“geothermal energy” AND “thermal sources”) OR (“geothermal energy” AND “not volcanic”)**. Para finalizar, se filtró la información obtenida por año, teniendo en cuenta los documentos publicados desde el 2011 hasta el 2021, con algunas excepciones, teniendo en cuenta limitantes en la información encontrada respecto a ciertos parámetros.

Adicional a lo anterior se realizó una contextualización del eje central de la investigación, enfocada a la generación de Energía Geotérmica en Europa, donde se destacan las condiciones favorables para la explotación de este recurso y se resalta el avance de Islandia a través de un trabajo que analiza el caso de éxito del proyecto de transformación energética en este país. También se resaltó la generación de Energía Geotérmica en América, donde se habla de las condiciones naturales para el aprovechamiento del recurso, además de la capacidad instalada que poseen algunos países en los últimos diez años. Aquí se hace un corto resumen de dos trabajos realizados en el año 2017, el primero en Perú y el segundo en México, los cuales contribuyen de manera directa al desarrollo del presente trabajo. Por otro lado, se enunció el contexto de la energía geotérmica en Colombia y como ha sido su desarrollo con el pasar de los años, algunos estudios que se han realizado, además de la identificación de algunas zonas con gran potencial, para la exploración y aprovechamiento del recurso; esto se complementa con dos trabajos desarrollados en el país, que son muestra clara de la investigación adelantada por la comunidad académica, relacionada con el tema de interés.

5.1.1. Generación de Energía Geotérmica en Europa

El continente europeo posee un gran potencial para el aprovechamiento del recurso geotermal con fines energéticos, lo que está relacionado directamente con su geología, puesto que las características de esta zona geográfica están estrechamente relacionadas a la conversión historia de la Placa Africana con la frontera sur de la Placa Euroasiática, que según la European Geosciences Union (EGU), dicho proceso se ha detenido y ahora existe una joven zona de subducción que ha ocasionado la liberación de energía proveniente del centro de la tierra (Abril-Castiblanco, 2017). El Consejo Europeo de Energía Geotérmica

(EGEC), en su informe anual del año 2017, presento la evaluación del sector geotérmico para el continente, informando que durante el período comprendido entre los años 2012 y 2016 el consumo de la energía geotérmica aumentó sustancialmente para la generación de calefacción; adicional a esto también señala que para el 2016 en Europa existían 100 plantas geotérmicas con una capacidad instalada que suma 2,5 GW, generando cerca de 15 TW de energía eléctrica al año (Abril-Castiblanco, 2017), y ya para el año 2018 la capacidad instalada de electricidad geotérmica en Europa ascendió a 2,8 GW, lo cual indica que en un término de dos años se aumentó en un 12%, esto genera grandes beneficios económicos y ambientales para la comunidad europea (Joquera, 2018).

Las principales regiones geotérmicas de Europa están asociadas tanto con áreas volcánicas (Islandia e Italia) como con recursos geotérmicos de entalpía media en cuencas sedimentarias, asociadas a diferentes entornos geológicos como la cuenca de Molasse en el frente norte de los Alpes, la cuenca de París, la cuenca de Aquitania y la cuenca de Panonia (Philippe et al., 2013), como se evidencia en la **Figura 1**. Europa tiene un 37% de la capacidad mundial, seguida de América con un 32% y Asia con 27%, además tres de los cinco países con mayor capacidad instalada en el mundo (dos tercios del total), se encuentran ubicados en el continente y estos son Suecia, Noruega y Alemania (Colmenar-Santos et al., 2015).

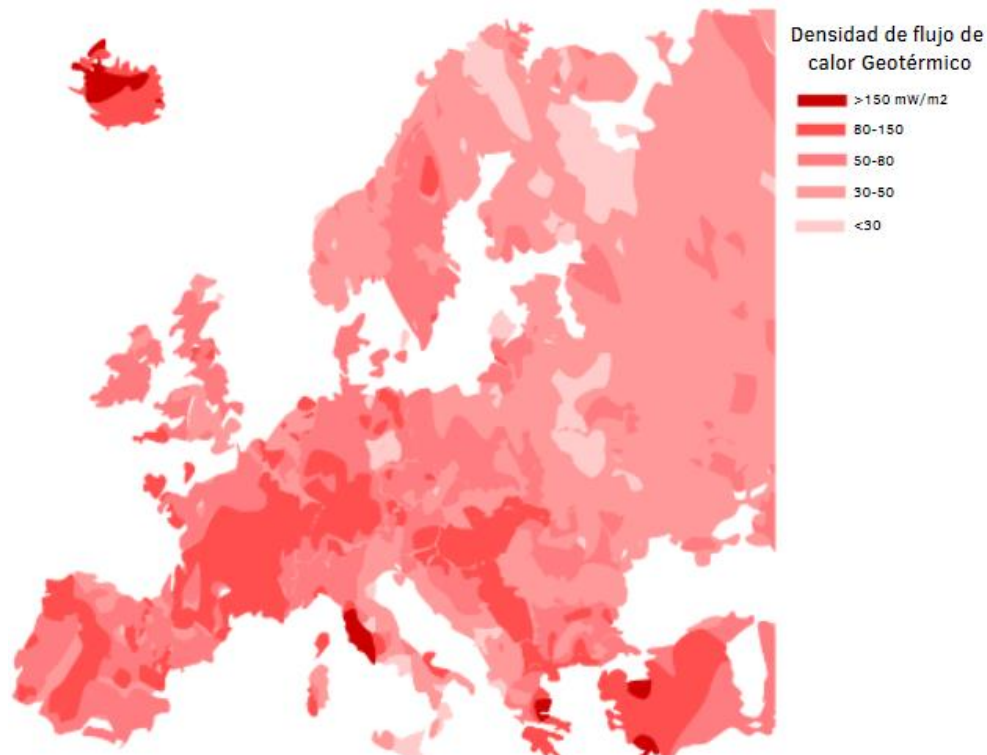


Figura 1. Calor geotermal de Europa.
Adaptado de: (Colmenar-Santos et al., 2015)

A continuación, se mencionó un trabajo relacionado al caso de éxito de la transformación de energía en Islandia, posicionándose como un referente mundial en la innovación de tecnologías para el aprovechamiento del recurso geotérmico disponible, contribuyendo de forma significativa a la reducción de gases de efecto invernadero.

“Análisis del caso de éxito del proyecto de transformación energética de Islandia” (Sánchez-Alvarado et al., 2020)

Islandia logra depender actualmente en un 85% de la energía de origen geotérmico y así se consigue una generación más limpia, con energías renovables y precios bajos, debido a la baja dependencia del exterior, que se reduce únicamente a la utilización de combustibles fósiles en una parte del transporte. Adicional a lo anterior, es importante resaltar que la geología de la isla es ideal para la generación de este tipo de energía, puesto que la ubicación de la misma guarda una estrecha relación con la dorsal oceánica que separa las placa Eurasiática de la Norteamérica, que actualmente se están alejando a razón de 2,5 cm cada año, creando condiciones propicias para el magmatismo que genera unas altas temperaturas en el subsuelo, generando yacimientos de agua y vapor con temperaturas de hasta unos 400 °C en los reservorios más profundos. Este trabajo permitió dar un contexto general y un punto de partida sobre la temática central de esta investigación, además de un referente internacional para el conocimiento de diferentes tecnologías de aprovechamiento del recurso geotérmico, que benefician a las actividades y estilo de vida de las comunidades, lo que se relaciona con el objetivo específico número tres.

5.1.2. Generación de Energía Geotérmica en América

América es una gran promesa mundial en el desarrollo de energía geotérmica, gracias a su ubicación geográfica en donde se manifiesta constantemente la liberación de energía desde el centro de la tierra de manera natural. La región tiene un potencial geotérmico entre 11 GW y 55 GW según Berman (2018) citado por (Gischler et al., 2020), que aún permanece sin explotar en su totalidad. Actualmente la explotación de este recurso se da a gran escala en países como Estados Unidos, México, El Salvador, Costa Rica y Chile, pero la exploración y explotación del recurso geotérmico a nivel local aún no es una realidad, para muchos países. Según Abril-Castiblanco, (2017),

América está conformada por las placas tectónicas de Norteamérica, del Caribe y Sudamérica. La falla de San Andrés, recorre los estados de California, Baja California en México. Esta falla es el producto del deslizamiento entre esta placa del pacífico (en sentido noreste) y la placa norteamericana (en sentido sureste). Los principales reservorios geotérmicos de Norteamérica se encuentran rodeando esta falla, en los estados occidentales de Estados Unidos, California genera la mayor cantidad de electricidad de la energía geotérmica; Estados Unidos es el país del continente que más produce electricidad geotérmica, con más de 9 plantas de geo-termoeléctricas. (p. 46)

Una de las barreras para el desarrollo geotérmico de manera exitosa, es que actualmente no se cuenta con la suficiente información geológica, puesto que es un proceso necesario que requiere de muchos años de exploración, que se estima para esto un costo de 4 millones de dólares por MW y puede durar hasta tres años y tiene una tasa de éxito del 60% (Gischler et al., 2020). A pesar de los altos costos de inversión que se mencionaron anteriormente, México es un referente histórico por ser el pionero en Latinoamérica en demostrar interés en las fuentes geotérmicas. La primera planta de explotación de esta energía entró en funcionamiento en 1973, Planta de Cerro Prieto, México. “La energía geotérmica en el país (México) se utiliza casi por completo para producir electricidad. Sus usos directos aún están en desarrollo y actualmente se restringen a balnearios y fines recreativos y algunos, con participación de inversionistas privados, y estatales.” Como se puede apreciar en el informe de la WGC10-14 (World Geothermal Congress) en América Latina existen países que pronostican el uso de dicha energía, esto es producto de que, países como Chile, Argentina por mencionar algunos han invertido en investigación, sondeos, exploración, y estudios técnicos de factibilidad con miras en implementar usos de la geotermia

a futuro, se puede decir que, aunque en América Latina no es aún popular y generalizado el concepto de la electricidad geotérmica, varios países, y entidades han invertido esfuerzos para que esta energía en “auge” tenga espacio, en la producción interna de electricidad (Abril-Castiblanco, 2017). En la **Figura 2**, se evidencian los países de América donde actualmente se está aprovechando el recurso geotérmico para la generación de energía.

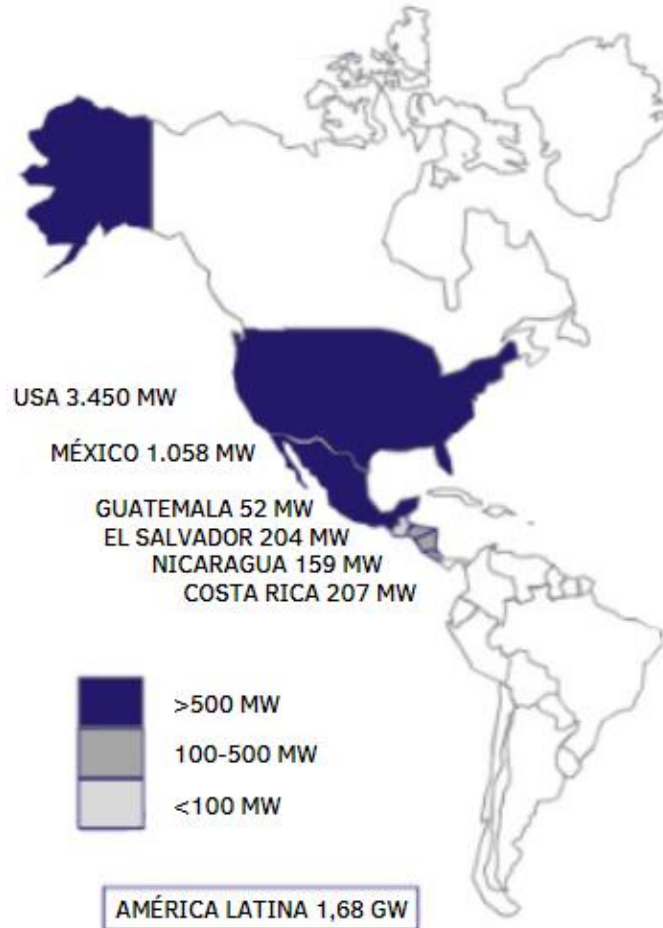


Figura 2. Capacidad instalada en países de América, para el año 2015.
Adaptado de: (Bertani, 2015)

A continuación, se mencionaron dos trabajos relacionados al diseño matemático para la implementación del Ciclo Rankine en fuentes termales de baja entalpía en dos países de Latinoamérica, el primero en Perú y el segundo en México.

“Análisis de estudio de la energía geotérmica de las aguas termales de Putina empleando isobutano para la generación de energía eléctrica para la localidad de Putina” (Peralta-Quilla & Miranda-Rodríguez, 2017)

Esta tesis realiza una investigación descriptiva para analizar la factibilidad de aprovechamiento de las Aguas Termales De Putina – Puno (Perú), para la generación de energía eléctrica de pequeña potencia a través de la implementación de un Ciclo Rankine; la evaluación técnica para determinar la posibilidad del aprovechamiento del recurso geotérmico, el cual presenta una geotermometría promedio de 62°C.

Este documento se tomó como referencia para la elaboración de la metodología del objetivo específico uno y dos, además de ser un referente para el análisis de los resultados, complementando la información con el siguiente trabajo.

“Diseño termodinámico de un Ciclo Rankine Orgánico para el aprovechamiento energético de aguas termales” (Caldiño-Herrera et al., 2017).

Aquí se presenta el diseño termodinámico de un ciclo Rankine orgánico (ORC) para el aprovechamiento de una fuente de aguas termales y a partir de la temperatura de la fuente energética se evalúan diferentes fluidos de trabajo y diferentes condiciones de operación con el fin de encontrar los parámetros adecuados para esta aplicación específica. Se concluye que para este caso el R245ca es la mejor opción para esta aplicación, además de que mantener los flujos máxicos lo más bajos posibles en los intercambiadores de calor resulta en mejor eficiencia para el ORC. A partir de estos documentos se conocieron diferentes fluidos de trabajo para el funcionamiento del ciclo, lo que permitió identificar las condiciones bajo las cuales trabaja cada uno y así se determinó cual se ajusta a las condiciones y características de la fuente termal en cuestión.

5.1.3. Generación de Energía Geotérmica en Colombia

La generación de energía geotérmica en el país, nace como una propuesta sostenible, para suplir las necesidades eléctricas de las poblaciones de las zonas no interconectadas (ZNI) del país, aprovechando las fuentes no convencionales de energía (FNCER) disponibles a lo largo de la extensión del territorio. En los últimos años se han desarrollado investigaciones en diferentes zonas del país, donde se han identificado los posibles usos de ese potencial geotérmico que se genera de manera natural y que en su mayoría está siendo aprovechado por particulares, para su beneficio económico, a través de la actividad del turismo. Actualmente el desconocimiento de la normatividad nacional vigente relacionada a esta temática, hace pensar que no existe apoyo al desarrollo de dichos proyectos, pero la realidad es otra, puesto que en leyes como la 1715 de 2014 que habla del uso de las FNCER y se establecen “cierto tipo de beneficios a los implementadores de tales tecnologías o la necesidad de inversión externa que hagan que este tipo de proyectos sean atractivos y rentables para desarrollar” (Grupo de Investigación Xué & Semillero de Investigación Barión, 2020).

Como se mencionó anteriormente la implementación de tecnologías relacionadas al aprovechamiento del recurso geotérmico en zonas no interconectadas del país, genera soluciones a estos territorios, ofreciendo una oportunidad para el crecimiento social y tecnológico, teniendo en cuenta las dinámicas del territorio local. La Región Central tiene en su territorio zonas con alto potencial geotérmico como Boyacá, Caldas y Tolima, “al estar ubicadas en zonas volcánicas o con afluentes geotérmicos tienen la posibilidad para la implementación de tecnologías de generación geotérmica” (Grupo de Investigación Xué & Semillero de Investigación Barión, 2020).

Colombia aún no cuenta con la implementación de proyectos geotérmicos, pero durante 45 años INGEOMINAS y posteriormente el Servicio Geológico Colombiano han realizado considerables estudios que han permitido el reconocimiento e investigación de los recursos geotérmicos especialmente en la Región Central del país; donde los avances más significativos se han dado en la etapa de exploración de las superficies, pero aun así se han presentado diferentes obstáculos para continuar, que se relacionan con la falta de perforaciones necesarias para que se confirme la factibilidad real que existe sobre el

recursos estudiado (Grupo de Investigación Xué & Semillero de Investigación Barión, 2020). En la **Figura 3**, se evidencian las zonas de mayor potencial geotérmico en el país, como lo son cerca de los volcanes Chiles, Cerro Negro, Cumbal, Azufral, Galeras, Doña Juana, Sotar, Puracé, Nevado del Huila, Nevado del Ruiz y Nevado del Tolima, además algunas áreas no volcánicas como Paipa (Carbon Trust, 2015).



Figura 3. Zonas de especial importancia para la exploración del recurso geotérmico en Colombia.
Adaptado de: (Carbon Trust, 2015)

Después de la búsqueda de información relacionados a esta temática en Colombia, se escogieron dos trabajos enfocados a la investigación del potencial de aprovechamiento del recurso geotérmico disponible en dos de las zonas que se mencionaron anteriormente, el primero en el volcán de Cerro Machn y el segundo en Paipa, los cuales se desarrollan en ambientes geológicos totalmente diferentes.

“Caracterización del potencial geotérmico a partir de análisis geoquímicos de fuentes termales, en el volcán Cerro Machn” (Cerpa-Londoño, 2018).

En este trabajo el objetivo principal es realizar la caracterización geoquímica de las manifestaciones termales superficiales asociadas al sistema magmático-hidrotermal del Volcán Cerro Machn, con el fin

de determinar el origen y potencial geotérmico de estos fluidos. La temperatura en superficie del sistema varía entre 74 y 90°C, con excepción de los puntos puente tierra y toche I que tienen una temperatura de 57 y 42°C respectivamente. El aporte a la investigación por parte del documento, se resumió a los parámetros fisicoquímicos que evaluó el autor, los cuales fueron temperatura, pH, conductividad, turbiedad y sólidos totales, que también fueron medidos en el desarrollo del objetivo número uno.

“Diagnóstico ambiental de alternativas para el aprovechamiento del potencial geotérmico del paisaje salino en la vereda La Esperanza, Paipa-Boyacá” (Chaparro-Guevara, 2018).

El enfoque de este documento se relaciona con la planeación ambiental-territorial de la actividad turística, la cual resulta deficiente y no sostenible en términos ambientales para el recurso geotérmico en el paisaje termosalino del municipio de Paipa. El diagnóstico se lleva a cabo por medio de la evaluación cualitativa de alternativas y como las más favorables se identificaron el Pago por Servicios Ambientales, cultivo de organismos termófilos y cultivo de peces y mariscos, sin embargo, estas alternativas requieren estudios de perfectibilidad. Después de la lectura del documento, se lograron identificar alternativas diferentes al turismo, para el aprovechamiento del recurso geotérmico disponible en la región, la cual se encuentra muy cercana al lugar donde se está ejecutando la investigación y comparten características similares en cuanto a la organización social, la economía y la disponibilidad de recursos.

5.2. Marco teórico - conceptual

Para la elaboración de este apartado se tomaron en cuenta los resultados encontrados en el de estado del arte y a continuación se describieron las teorías que soportaron la investigación de este trabajo de grado, teniendo en cuenta la finalidad y el aporte a la Ingeniería Ambiental del mismo; por otro lado, se estableció un orden jerárquico para la presentación de dichas teorías, teniendo en cuenta sus aportes. En primer lugar, se tienen las **Energías Alternativas** como eje central, dando un contexto claro del punto de partida para la investigación y de cómo el desarrollo de la misma contribuye de manera clara a la solución de una problemática ambiental, por la que actualmente pasan gran parte de los territorios en Colombia, es por esto que la segunda teoría escogida fue la **Energía Geotérmica** como una alternativa innovadora para la solución de la problemática identificada y que proporcionó una base fundamental para la búsqueda de información y soporte de los resultados, adicional a esta se suma la tercera teoría la cual es **Fuentes Termales** que se desprende del desarrollo de la anterior, brindando un contexto más enfocado en las características del territorio en cuestión y para finalizar el **Ciclo Rankine**, el cual es el fundamento fisicoquímico que emplea la matemática como herramienta, para la síntesis de la información recopilada en las tres anteriores teorías. Cada uno de los conceptos está soportado por un autor o una institución relacionada a la temática central de la investigación, con el fin de facilitar la lectura y comprensión del documento. Es importante resaltar que la información mencionada contribuyó en gran medida al desarrollo de los siguientes apartados, especialmente el análisis y discusión de resultados, permitiendo así tener una base clara para la interpretación de la información que se obtuvo en campo y dar respuesta a cada uno de los objetivos planteados.

5.2.1. Energías Alternativas

Las energías alternativas son el producto de la innovación y el desarrollo tecnológico constante que permite aprovechar las fuentes no convencionales y reemplazar las tradicionales, las cuales se han convertido en insostenibles para los territorios, puesto que para su generación se ven comprometidos

diferentes recursos naturales y están relacionados una serie de impactos significativos en el medio social, cultural y ecológico (Giraldo et al., 2018). El crecimiento de la población humana en las últimas décadas se ha dado de forma exponencial, lo que ha generado una mayor demanda de energía, lo que actualmente ha causado preocupación en los gobiernos, haciendo que estos establezcan estrategias y políticas como la de seguridad y diversificación de las canastas energéticas, que según Cadena (2008) “la investigación en combustibles sustitutos (o complementarios) como los derivados de la biomasa moderna, así como la inversión e instalaciones comerciales en proyectos de generación eléctrica que utilizan fuentes como la eólica, solar, oceánica, mareomotriz y geotérmica”, se han dinamizado hasta tal punto de cubrir un alto porcentaje de la demanda energética en muchos países del mundo.

Existe una necesidad latente de realizar una transición hacia el uso de recursos energéticos de carácter renovable, que a su vez contribuyan a la reducción de emisiones de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático que se viene experimentando en los últimos años. Este tipo de energías están muy relacionadas a las condiciones geoespaciales del territorio, como la ubicación, el clima, los ecosistemas y los recursos naturales presentes; lo que representa una disponibilidad constante para la obtención de energías como la hidráulica, eólica, solar, geotérmica y de las biomásas (Giraldo et al., 2018), complementando lo anterior la UPME (2015) afirma que:

“este tipo de energías representan a su vez inmensos potenciales energéticos para ser aprovechados de una manera costo-efectiva en la medida en que su investigación, su desarrollo y el despliegue comercial de las tecnologías asociadas continúen avanzando como ha venido sucediendo en los últimos 40 años”. (p. 23)

La implementación de tecnologías para el aprovechamiento de este tipo de recursos energéticos, aún presenta bastantes limitantes que el Consorcio Energético CorpoEma (2010) resume en:

- 1) La incertidumbre asociada a la disponibilidad de datos de desempeño, lo cual dificulta la realización acciones para lograr su regulación.
- 2) La percepción sobre la tecnología empleada, como poco madura y con altos costos de inversión.
- 3) Las distorsiones en los precios de mercado ocasionadas por subsidios en los energéticos y servicios públicos, dificultando las condiciones para la implementación de estos proyectos, así como la no inclusión de las externalidades negativas sobre la sociedad y el medio ambiente, y subsidios implícitos en el uso de los energéticos convencionales actuales. (...)
- 4) La falta de elementos y estudios necesarios que permitan admitir la oportunidad de transformar en inversiones la puesta en marcha de proyectos relacionados a las FNCER (...).
- 5) Los vacíos institucionales y regulatorios que dificultan la implementación sistémica y sostenible. (p. 38)

Es decir que, en términos generales la investigación en energías alternativas es deficiente en relación con la poca disponibilidad de recursos económicos y grupos para la investigación, así como en los sectores interesados en desarrollar propuestas; por esto a través de los años se ha llegado a pensar que se debe cambiar el paradigma de que la única opción viable para la implementación de estos proyectos es la generación centralizada a manos de grandes multinacionales, donde el retorno es del 15 al 20%; en cambio en los sistemas pequeños y descentralizados, el aprovechamiento se da de forma local y los impactos solo escalan a un nivel imperceptible y manejable con diferentes estrategias de prevención (Consorcio Energético CorpoEma, 2010).

Finalmente, dentro de las energías alternativas que se mencionaron, la geotérmica se encuentra en un nivel avanzado de desarrollo, teniendo en cuenta las diferentes tecnologías que existen para explotar las

manifestaciones de la misma, como lo son los volcanes, géiseres, aguas termales y zonas tectónicas (Hiriart Le Bert, 2011), sobre las cuales se han desarrollado proyectos de exploración y explotación. El recurso geotérmico es “ilimitado” al compararlo con el tiempo que el hombre ha habitado el planeta y estará disponible por muchos años, siempre y cuando su aprovechamiento se haga de forma adecuada (Servicio Geológico Colombiano, 2019a). Según el Servicio Geológico Mexicano (2017), este recurso es la porción de calor desprendida desde el interior de la tierra, que puede ser aprovechado por el hombre en condiciones técnicas y económicas. Por tanto, el objetivo de la geotermia es el aprovechamiento de esa energía calorífica proveniente del interior de la tierra.

5.2.2. *Energía Geotérmica*

La *energía geotérmica* es un tipo de energía termal, formada por un permanente flujo de calor desde el núcleo de la tierra, a través del manto y hacia la superficie terrestre producto de los procesos naturales o artificiales de acumulación y calentamiento del subsuelo. Las estimaciones de los recursos geotérmicos se hacen sobre la base de datos geológicos y geofísicos tales como (I) profundidad, espesor y extensión del yacimiento, (II) propiedades de formaciones rocosas, (III) salinidad y geoquímica de los fluidos presentes, y (IV) temperatura, porosidad y permeabilidad de formaciones rocosas (Cerpa-Londoño, 2018). Esta se puede aprovechar a través del calor almacenado en el interior de la tierra, el cual es un fenómeno que se produce por la conductividad térmica de las rocas presentes en el lugar, conservando la energía por periodos de tiempo prolongados, que hace posible el aprovechamiento de las fuentes termales de poca profundidad, por medio de diversas tecnologías (Picó-Heras, 2002).

El origen de los fluidos geotérmicos ha sido tema de debate ya que se proponen los siguientes orígenes: meteóricos, magmáticos y aguas juveniles; sin embargo, estudios isotópicos recientemente realizados en campos geotérmicos han demostrado que al menos el 90% del agua geotérmica tiene un origen meteórico, pero a su vez pudieron contener un importante aporte de componentes volátiles magmáticos. La permeabilidad presente en las rocas puede ser primaria la cual está asociada directamente a la formación de la roca, o secundaria que tiene una relación con la presencia de fracturas o fallas en el terreno. Para Giggenbach W. F. un sistema geotermal es alimentado por la percolación de aguas meteóricas desde las zonas de recarga del sistema, que luego de calentarse, reaccionan con la roca huésped, disolviéndola y agregando una gran cantidad de componentes químicos al fluido geotermal, donde posteriormente los fluidos geotérmicos pueden almacenarse en zonas permeables, que funcionan como reservorios geotérmicos y ocasionalmente alcanzan altas presiones y temperaturas (hasta 300°C) (Cerpa-Londoño, 2018).

Un parámetro de gran importancia para la evaluación de este recurso es la temperatura, la cual esta influenciada por la variación de la profundidad, puesto que en zonas superficiales (menos de 15 metros) la temperatura del exterior influye en las mediciones de este parámetro, en zonas más profundas, se ve influenciada por perturbaciones relacionadas a la circulación de aguas subterráneas y solo se consideran fiables aquellas mediciones que son realizadas a profundidades mayores a 200 metros (González-Velasco, 2012). El gradiente geotérmico es una variable de gran importancia, pues se define como la velocidad de variación de la temperatura con respecto a la profundidad y un valor normal de gradiente corresponde a un aumento de entre 25 y 30 °C/Km, es decir que el valor medio de variación se cree que es de **3,3°C cada 100 metros** (Abril-Castiblanco, 2017). Por otro lado, el flujo de calor y el gradiente de geotérmico o de temperatura, son evaluados en relación con las formaciones geológicas, donde según González-Velasco (2012) estos son elevados “en las proximidades de los límites de placas continentales,

o en fallas, a través de las cuales pueda asomarse a la superficie magma fundido, o en acuíferos que hayan estado en contacto con roca caliente o con magma”. En los resultados de medición del gradiente de temperatura, se encuentran intervalos donde la **variación de la temperatura con la profundidad es constante** lo que quiere decir que predomina la *conducción*, pero en los casos donde el **gradiente de temperatura es bajo**, se debe a la velocidad de transporte de calor que ya viene incrementada por procesos *convectivos* y cuando el **gradiente de temperatura es elevado** es porque existe *baja conductividad térmica* (González-Velasco, 2012).

La conducción en un sistema geotérmico se define como la forma en que se transporta el calor del fluido más caliente al más frío, cuando estos se encuentran en contacto, lo que depende de la conductividad térmica propia del fluido (Prol-Ledesma, 1996). Por otro lado, la convección se produce por el movimiento de fluidos, ya sea aguas o gases como ocurre en sistemas geotérmicos de agua caliente, de los que generalmente se producen aguas termales y fumarolas. Esta forma de transmisión de calor por su naturaleza, tiende a incrementar las temperaturas de la parte superior del sistema, mientras que en la parte inferior las disminuye (Servicio Geológico Colombiano, 2019a).

Por otro lado, las formas en las que se manifiesta esta energía, están asociadas a un sistema geotérmico el cual está conformado por cinco elementos fundamentales: el primero es la zona de recarga que está conformada por rocas permeables, que permiten la circulación y penetración del agua lluvia; el segundo es la fuente de calor, la cual se encuentra en medio de las rocas calientes que incrementan su temperatura por contacto con un cuerpo volcánico intrusivo y están presentes en el subsuelo de manera natural; generalmente la fuente de calor presentan temperaturas mayores a los 600 °C y se pueden encontrar a diferentes profundidades, mayores a dos kilómetros (Marzolf, 2015). El tercero es la zona de permeabilidad la cual cumple la función de almacenar el agua y gases, que están en circulación lenta; el cuarto es la zona impermeable que aísla el reservorio y permite conservar la masa y el calor; y finalmente la zona de descarga, en donde el fluido escapa del reservorio y regresa a la superficie en fase líquida o vapor (Servicio Geológico Colombiano, 2019a). Es de gran importancia señalar que el componente más importante para el aprovechamiento de esta energía, es la presencia de un fluido geotérmico, el cual se asocia a la presencia de agua, ya sea en su fase líquida, de vapor o en combinación, que se encuentra en el reservorio geotérmico y que puede aflorar a la superficie de manera natural mediante manantiales de aguas termales o pozos geotérmicos. Estos fluidos a menudo contienen sustancias químicas disueltas como cloruros (Cl), dióxido de carbono (CO₂), sulfatos (SO₄) y sales minerales (Marzolf, 2015).

En Colombia durante los últimos años se han desarrollado estudios sobre el potencial geotérmico en fuentes de calor a lo largo de la extensión del territorio, pero la mayoría de estas han estado asociadas a la Región Central, debido a la actividad volcánica presente en la zona; pero poco se ha hablado del aprovechamiento de los manantiales termales que se encuentran a lo largo del territorio como fuente de obtención de energía para las poblaciones que se encuentran alrededor, puesto que su aprovechamiento es de tipo local. El sistema geotérmico de Paipa-Iza es el más estudiado en la zona oriental del país y este encuentra ubicado en el departamento de Boyacá, donde el Grupo de Investigación Xué & Semillero de Investigación Barión (2020) lo describe como

un terreno basculado de sur a norte hacia el río Chicamocha, limitado al oriente y suroriente por el anticlinal Tibasosa – Toledo, enmarcado en la zona centro del departamento, con fácil accesibilidad generando con ello unas buenas condiciones logísticas para un eventual desarrollo de un proyecto geotérmico, encontrando además varias fuentes termales con aguas sulfatadas, las cuales actualmente se utilizan como balnearios termales con un desarrollo de la industria turística, la cual ante un posible

desarrollo de un proyecto geotérmico podría generar conflictos, encontrando históricamente oposiciones por la industria turística hacia actividades de extracción para la generación de cemento.

Lo anterior es una muestra clara del potencial que guardan las fuentes termales que no están asociadas a zonas volcánicas, para ser aprovechadas en actividades diferentes al entretenimiento y el turismo; y como la región de Boyacá posee las condiciones geológicas y morfológicas para desarrollar proyectos pilotos para el aprovechamiento de este recurso en la generación de energía a nivel local. Es importante conocer el origen de las fuentes termales, sus propiedades y cómo funciona el sistema geotérmico relacionado, todo esto para poder realizar una clasificación en base a la temperatura, como factor diferenciador y determinar el aprovechamiento que mejor se ajuste.

5.2.3. Fuentes termales

Son las manifestaciones superficiales más difundidas en todo el mundo, al ser una descarga natural de agua con temperatura por encima de 4°C a la temperatura media ambiental del lugar donde se encuentra ubicada. En ocasiones la descarga de agua está acompañada de descargas de gases, principalmente, gas carbónico (CO₂) y sulfuro de hidrógeno (H₂S). La existencia de manantiales termales en zonas de fallas y fracturas geológicas, son evidencia de zonas de distensión de la corteza terrestre (Servicio Geológico Colombiano, s.f.). Para la clasificación de las fuentes termales se tiene en cuenta parámetros como el contexto geológico, el nivel de temperatura, el modo de explotación y el tipo de utilización, aunque la clasificación más común es el parámetro de la temperatura (Peralta-Quilla & Miranda-Rodríguez, 2017) y dependiendo del tipo de agua que descargan se les denomina como ácidos alcalinos o neutros si su pH es menor, mayor o igual a 7 respectivamente (Prol-Ledesma, 1996). Según Llopis-Trilla & Rodrigo-Angulo (2008), las fuentes termales se clasifican de la siguiente manera:

1) Alta temperatura: más de 150°C.

Una temperatura superior a 150°C permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica (p. 32).

2) Media temperatura: entre 90 y 150°C.

Permite producir energía eléctrica utilizando un fluido de intercambio, que es el que alimenta a las centrales (p. 32).

3) Baja temperatura: entre 30 y 90°C.

Su contenido en calor es suficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para calefacción en edificios y en determinados procesos industriales y agrícolas (p. 32-33).

4) Muy baja temperatura: menos de 30°C.

Puede ser utilizada para calefacción y climatización, necesitando emplear bombas de calor (p. 33).

Los yacimientos de alta temperatura (superiores a los 150°C) se aprovechan principalmente para la producción de electricidad; cuando la temperatura del yacimiento no es suficiente para producir energía eléctrica (temperaturas por debajo de los 100°C) sus principales aplicaciones son térmicas en los sectores industrial, servicios y residencial ya que puede hacerse un aprovechamiento directo, o a través de bomba de calor geotérmica (calefacción y refrigeración). Cuando se trata de recursos de temperaturas muy bajas

(por debajo de los 30°C) las posibilidades de uso están en la climatización y obtención de agua caliente (Servicio Geológico Mexicano, 2017).

Sin embargo, también existe otra clasificación relacionada a la temperatura que es por la Entalpía la cual según Llopis-Trilla & Rodrigo-Angulo (2008), se define como la “cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno” (p. 32), pero esta forma de clasificar las fuentes termales presenta una limitación, la cual está relacionada a que la entalpía de un flujo en el suelo, no puede ser medida por un instrumento; entonces como la entalpía y la temperatura pueden considerarse, más o menos, proporcionales, cuando se habla de aguas termales de baja entalpía también se refiere a las de baja temperatura, esto dependerá del autor (Llopis-Trilla & Rodrigo-Angulo, 2008).

Por otra parte, están los dos tipos de aguas termales que son las magmáticas y las telúricas, las cuales dependen de su origen geológico. La principal diferencia entre ellas es el tipo de terreno en el que aparecen, puesto que las magmáticas nacen de filones metálicos o eruptivos, mientras que las telúricas pueden aparecer en cualquier lugar. La temperatura de las aguas magmáticas es más elevada, por lo general temperaturas mayores a los 50°C. Por otro lado, las aguas telúricas son filtradas desde la superficie a la roca madre, poseen menor cantidad de mineralización y los elementos más comúnmente encontrados en las aguas magmáticas son arsénico, boro, bromo, entre otros, y en las aguas telúricas por lo general se puede encontrar bicarbonatos, cloruros, sales de cal y otros (Tapia-Huacoto, 2016).

Según Marzolf (2015), las fuentes termales hacen parte de un sistema geotérmico, el cual es un conjunto de elementos naturales que se pueden presentar en una misma área o campo geotérmico y del cual es posible extraer fluidos geotérmicos con diferentes fines; estos pueden estar relacionados con acuíferos en cuencas sedimentarias en los cuales las aguas son por lo general connatas, fósiles, sedimentadas o de formación y la temperatura está controlada por el flujo de calor terrestre promedio, la conductividad térmica de las rocas y la profundidad del acuífero; por otro lado están los acuíferos de basamento bajo cuencas sedimentarias, aquí existe un acuífero altamente permeable dentro o sobre la parte superior de un basamento cubierto por una secuencia de rocas sedimentarias más jóvenes de baja permeabilidad y por último están los sistemas en zona de fractura, los cuales tiene un reservorio principal que consiste en una zona de fractura pendiente y estrecha, la cual a menudo y como respuesta a una actividad tectónica reciente, exhibe una gran permeabilidad vertical, a diferencia de las demás rocas del entorno que tienen permeabilidades bajas (Alfaro et al., 2003).

Como se mencionó anteriormente la temperatura es el parámetro con el cual se suelen clasificar las fuentes termales y también con el que se determinan las tecnologías para el aprovechamiento de estas mismas, es por esto que la siguiente teoría expone el fundamento termodinámico que se ajusta a las bajas temperaturas encontradas en ciertos sistemas que se dan en presencia de aguas telúricas y que por sus características es necesario utilizar un fluido de trabajo secundario, con menor punto de ebullición y así se genera vapor capaz de mover las turbinas para la generación de energía.

5.2.4. Ciclo Rankine

Como tecnologías para el aprovechamiento de las fuentes termales de baja entalpía, se tiene el Ciclo Rankine, el cual es una alternativa que permite explotar este tipo de fuentes energéticas con el fin de convertir el calor en trabajo, gracias a un expansor. Esto es posible debido a la utilización de un fluido orgánico de alto peso molecular y con propiedades termodinámicas críticas muy por debajo de las

presentes en el agua. Estas condiciones permiten que sea factible la extracción de energía en un ciclo termodinámico a temperaturas bajas dependiendo del fluido orgánico utilizado (Caldiño-Herrera et al., 2017). El Ciclo Rankine tiene una elevada eficiencia energética: 98% de la potencia térmica aportada del aceite térmico se transforma en energía eléctrica (alrededor del 10-20%) y calor (88-78%) (Fiter & Sánchez, 2012), como se muestra en la siguiente figura.

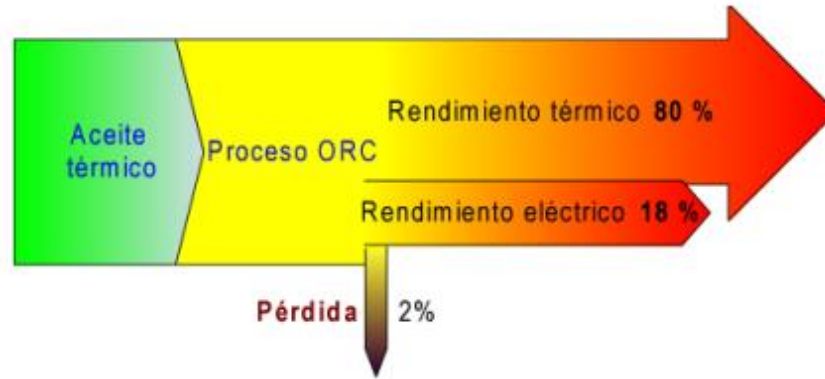


Figura 4. Rendimiento del Ciclo Rankine.
 Tomado de: (Fiter & Sánchez, 2012)

Como ventajas en la implementación de un Ciclo Rankine según Amat-Albuixech, (2017), se tiene que este requiere de un “bajo mantenimiento, sistemas compactos y poco ruidosos, no genera emisiones (salvo en caso de fuga del fluido de trabajo), y el único consumo existente es el de la energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la bomba” (p.17). Por otro lado, la estructura del ciclo consta de una bomba, un evaporador, un expansor y un condensador, que se pueden diferenciar en la **Figura 5**, de manera más simple.

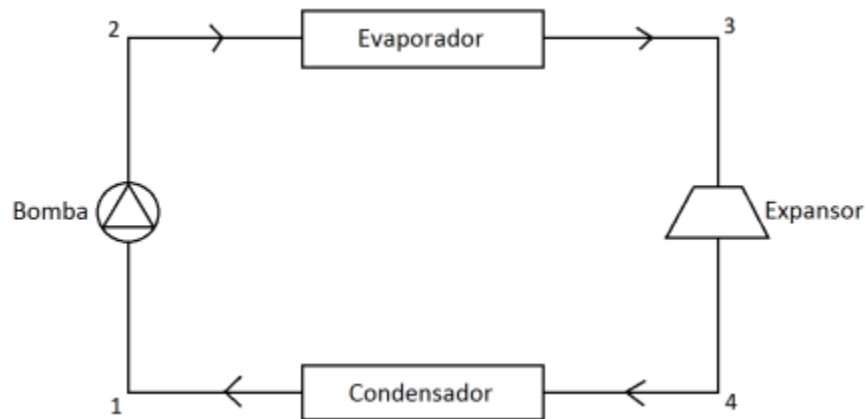


Figura 5. Esquema de un Ciclo Rankine Orgánico Básico.
 Tomado de: (Amat-Albuixech, 2017)

En el proceso 1-2 (Bombeo), la bomba es el único elemento del sistema que requiere de energía eléctrica secundaria, teniendo en cuenta que su objetivo dentro del sistema es impulsar el fluido de trabajo, para que circule por todo el circuito. Para el proceso 2-3 (Evaporación), el evaporador permite enlazar con la fuente termal que es la instalación de la cual se va aprovechar el calor residual, dirigiendo el calor mediante el intercambiador, para así evaporar el fluido de trabajo escogido para el caso. Por otro

lado, el proceso 3-4 (Expansión), permite que el evaporador se enlace con el expansor, para así disminuir la presión del fluido de trabajo desde la presión de evaporación hasta la condensación; en este proceso es donde se puede generar la energía eléctrica, aprovechando el vapor generado, para hacer girar la turbina que convierte la energía mecánica en potencia eléctrica mediante un generador. Finalmente, el proceso 4-1 (Condensación), busca que el fluido de trabajo cambie de fase (gas a líquido), para así volver a ser bombeado en el sistema (Amat-Albuixech, 2017).

Es de gran importancia mencionar que los fluidos de trabajo son un parámetro clave a la hora de diseñar el Ciclo Rankine, puesto que afectará a la eficiencia y dimensiones de forma directa. Principalmente se buscan fluidos que sean seguros, teniendo en cuenta la toxicidad e inflamabilidad, además de la normatividad aplicable al lugar de ejecución del proyecto. Es importante que los fluidos de trabajo tengan un alto calor latente, bajo costo, fácil manejo, entre otros aspectos (Amat-Albuixech, 2017). Para la selección del fluido de trabajo usualmente se tienen en cuenta propiedades relacionadas a salud y ambiente, como toxicidad, inflamabilidad, potencial de agotamiento del ozono (ODP) y el potencial de calentamiento global (GWP), en la **Tabla 1**, se muestran los datos relacionados a las propiedades de cinco fluidos más utilizados en el funcionamiento de un ciclo binario (Cárcamo-Palencia & Rivera-Calderón, 2016).

Tabla 1. Propiedades ambientales, seguridad y salud de algunos fluidos de trabajo.

Fluido	Fórmula	Toxicidad	Flamabilidad	ODP	GWP
R134a	CH ₂ FCF ₃	Baja	No inflamable	0	1430
R245fa	C ₃ H ₃ F ₅	Baja	No inflamable	0	1030
n-pentano	C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3
Isopentano	i-C ₅ H ₁₂	Baja	Muy alta	0	3
Isobutano	i-C ₄ H ₁₀	Baja	Muy alta	0	3

Adaptado de: (Cárcamo-Palencia & Rivera-Calderón, 2016)

Cuando se desea aprovechar la energía con baja entalpía, el líquido secundario requiere de una temperatura de ebullición menor que el agua, donde los refrigerantes e hidrocarburos compuestos son los que más se emplean. Si bien se recomienda tener en cuenta que los fluidos no sean inflamables, corrosivos y tóxicos, es imposible cumplir con estas características de forma simultánea, esto depende de las condiciones del recurso geotérmico y el entorno, puesto que en el caso de que el fluido sea inflamable, “si no existe una fuente de ignición cercana, se trabaja a temperaturas por debajo de las de autoignición y se toman las medidas de seguridad establecidas, este efecto puede minimizarse” (Hernández-Fernández et al., 2020).

5.3. Marco legal y normativo

De manera sucinta se expuso la normatividad nacional bajo la cual se desarrolló el presente trabajo y a partir de esto se generó la siguiente matriz normativa en donde se indica el acto normativo, el nombre, el ente gubernamental que la expide, finalmente la contribución directa y aplicada al caso de estudio.

Tabla 2. Matriz Legal y Normativa.

Acto normativo	Nombre	Declarado por	Contribución
Plan Energético Nacional 2020 - 2050	-	UPME	Lineamiento de política pública para promover el mejor uso de los recursos energéticos, desde su producción hasta su consumo en los diferentes sectores y actividades de la economía (Unidad de Planeación Minero Energética, 2019).
El Plan de Acción Indicativo 2010–2015 PROURE	-	UPME	Se establecen las bases para la estructuración e implementación de una política energética en Colombia. Está constituido sobre la base de la actualidad energética colombiana y sobre el contexto económico nacional e internacional, lo que permite concluir pautas y líneas de acción para reducir la pobreza energética (Unidad de Planeación Minero Energética, 2010).
Ley 1715 del 2014	Integración de las energías renovables no convencionales al sistema energético nacional	Congreso de Colombia	Artículo 21. Desarrollo de energía geotérmica. 1. La energía geotérmica se considerará como FNCER. Se deberá estudiar y analizar las condiciones propias de la naturaleza de la fuente para su reglamentación técnica por parte de la CREG. 2. Evaluación del potencial de la geotermia. El Gobierno pondrá en marcha instrumentos para fomentar e incentivar los trabajos de exploración e investigación el subsuelo para el conocimiento del recurso geotérmico y fomentar su aprovechamiento de alta, baja y muy baja temperatura (Congreso de Colombia, 2014).
Decreto 3683 de 2003	-	Ministerio de Minas y Energía	Artículo 2. Se define a la energía geotérmica como una fuente no convencional de energía (Ministerio de Minas y Energía, 2003).
Ley 697 de 2001	Uso racional y eficiente de la energía	Congreso de Colombia	Mediante la cual se fomenta el uso racional y eficiente de la energía, y se promueve la utilización de energías alternativas. Artículo 3. Define la energía geotérmica como aquella que puede obtenerse del calor del subsuelo terrestre (Congreso de Colombia, 2001).
Ley 99 de 1993	Política ambiental de Colombia	Congreso de Colombia	Artículo 5: Promover, en coordinación con las entidades competentes y afines, la realización de programas de sustitución de los recursos naturales no renovables, para el desarrollo de tecnologías de generación de energía no contaminantes ni degradantes (Apartado 33) (Congreso de Colombia, 1993).

Constitución Política de 1991	-	Presidencia de la República	Artículo 79. Todas las personas tienen derecho a gozar de un ambiente sano. La ley garantizará la participación de la comunidad en las decisiones que puedan afectarlo. Artículo 80. El Estado planificará el manejo y aprovechamiento de los recursos naturales, para garantizar su desarrollo sostenible, su conservación, restauración o sustitución (Presidencia de la República, 1991).
Decreto 2811 de 1974	Código Nacional de Recursos Naturales	Presidencia de la República	Artículo 3. De acuerdo con los objetivos enunciados, el presente Código regula: Las fuentes primarias de energía no agotables (Apartado 6) (Presidencia de la República, 1974).

Realizado por: Autora

Actualmente Colombia cuenta con una legislación bastante avanzada en términos del aprovechamiento de la geotermia presente en el territorio nacional, teniendo en cuenta que según la Ley 1715 del 2014 “la evaluación del potencial geotérmico está a cargo del Gobierno Nacional, el cual pondrá en marcha instrumentos para fomentar e incentivar los trabajos de exploración e investigación del subsuelo (..), para la generación de energía eléctrica y sus usos directos” (Martínez-Martínez, 2021, p 23); se podrán solicitar permisos para el desarrollo de proyectos dirigidos al aprovechamiento de los recursos de alta, mediana y baja entalpía, teniendo en cuenta los requerimientos exigidos por el Ministerio de Minas y Energía, donde es necesario que se den dos fases, la primera de exploración y la segunda de explotación, pero sin olvidar el debido seguimiento y control de las actividades que se encaminan al cumplimiento de las mismas. El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, también cumple un papel importante en la generación de estos proyectos, al ser el ente que “determina los parámetros ambientales que deberán cumplir estos proyectos, así como la mitigación de los impactos ambientales que puedan presentarse en su implementación” (Martínez-Martínez, 2021, p. 23).

A pesar de que lo mencionado anteriormente es una muestra de los avances del gobierno nacional en esta temática, la realidad es totalmente alejada. Actualmente solo existen proyectos pilotos y la información para la línea base, aún se encuentra limitada por financiación y personal no capacitado. Por ejemplo, Islandia es un caso de éxito en el desarrollo de políticas encaminadas al aprovechamiento de la energía geotérmica, siendo un atractivo para los inversionistas privados, lo que permite financiar la implementación de electricidad proveniente de energías renovables y la creación de estrategias que reduzcan los riesgos asociados a la fase de exploración. En general los gobiernos de países como el ya mencionado, China, Esta Unidos, Suecia, Turquía, entre otros, se enfocan principalmente en generar y ofrecer planes de mitigación, donde se exponen diferentes alternativas utilizadas e impulsadas por el Banco Mundial (Sánchez-Alvarado et al., 2020).

5.4. Marco geográfico y descripción del territorio

El municipio de Pachavita se encuentra ubicado en el suroccidente del departamento de Boyacá, en la región geográfica del Valle de Tenza, aproximadamente a 126 Km de distancia de la ciudad de Bogotá. Esta región cuenta con diecisiete municipios, de los cuales catorce son del departamento de Boyacá y tres de Cundinamarca, es importante resaltar que no existe una delimitación clara de la región, puesto que no se tiene claridad en los elementos que permiten entender su connotación de Valle y comúnmente

la población señala que las provincias de Oriente y Neira son las que componen este espacio geográfico, donde el paisaje según Mendoza-Varela (1964) citado por Yoleny & Casas (2013), se abre paso

(...) al descender del altiplano, (...) caminando hacia el oriente, (...) las colinas se echan unas sobre otras (...), la carretera va bordeando un río de aguas golpeadas, que de tanto en tanto se para, y hace un claro entre los labrantíos. Porque justamente toda aquella tierra, que se arruga y se vuelca hacia el llano, está cultivada sin ahorro y parece un milagro contabilizar los recuadros de labranza, lo mismo en lo llano que en las vertientes casi inaccesibles. Los cañaduzales y el maíz, los hacimientos de naranjas y papayos, y los campos de grano, se entrecruzan en un rompecabezas que difícilmente se ve en otra parte (p. 170).

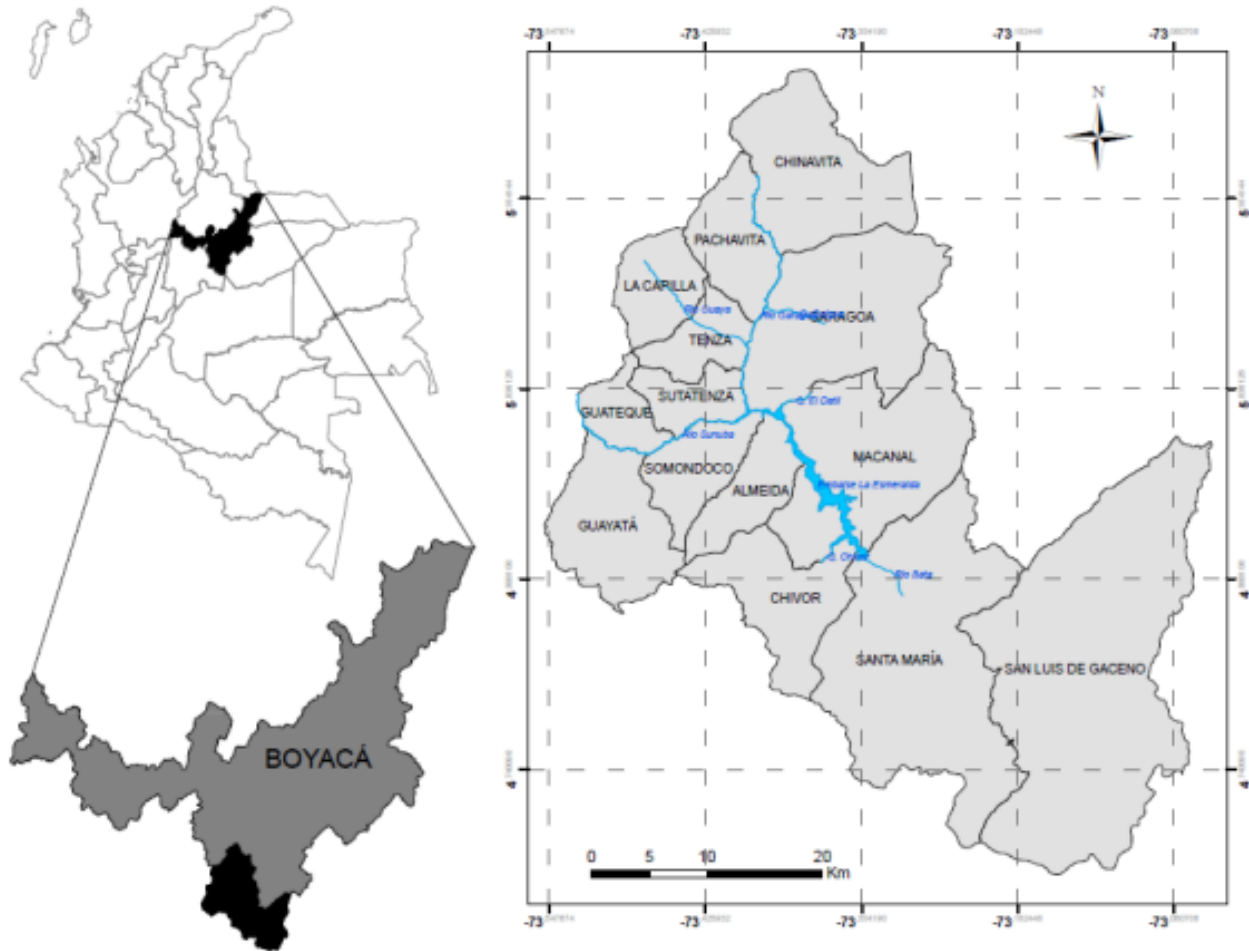


Figura 6. Contextualización geográfica región del Valle de Tenza.
Tomado de: (Yoleny & Casas, 2013)

La provincia de Neira es una tierra de gran riqueza hídrica y está conformada por los municipios de Chinavita, Garagoa, Macanal, Santa María, San Luís de Gaceno y Pachavita, donde este último posee una extensión territorial de 68 Km² y su división político-administrativa está dada por la conformación de 9 veredas, las cuales representan un relieve ligeramente ondulado a muy quebrado, con una pendiente que oscilan entre el 3% y el 50%, las veredas son: Pie de Peña, Suaquira, Centro, Aguaquiña, Buenavista, Hatogrande, Sacaneca, Llano Grande y Guacal. El territorio del Municipio se divide en 0,18% (0,12 Km²) de área urbana y el 99,82% (66,85 Km²) de área rural (Alcaldía Municipal de Pachavita, 2020).

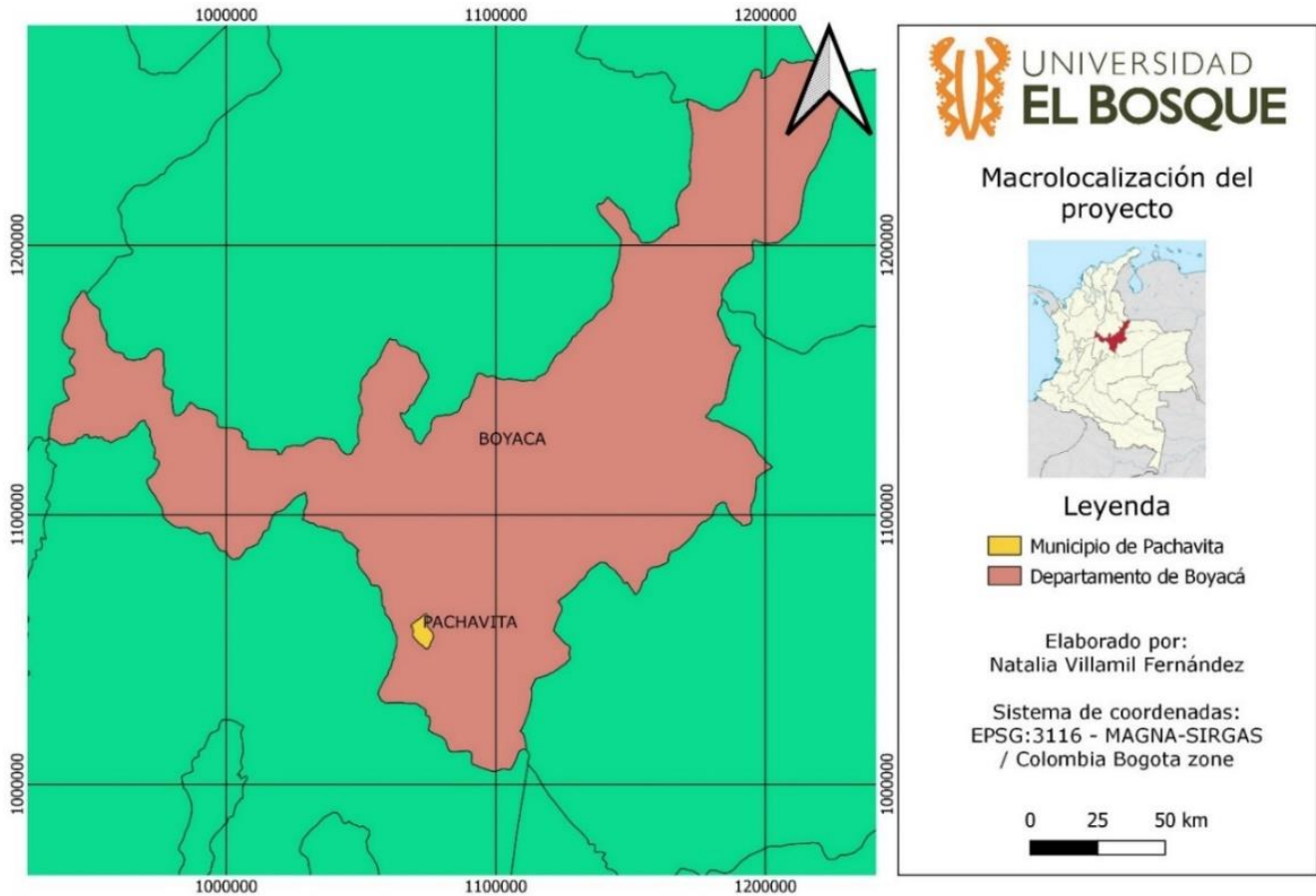


Figura 7. Macrolocalización del proyecto.
Realizado por: Autora

La finca Santa Rosa se encuentra ubicada en la vereda Suaquira, la cual se caracteriza por su diversidad de climas y la calidad de sus tierras y aguas. Su extensión total es de 12.4 Km², y se divide en tres sectores: El primer sector es Suaquira Termales su extensión es de 2.57 km² tiene una altura que oscila entre los 1600 y 1800 m.s.n.m., se destacan cultivos como la caña y el café. El segundo sector es Suaquira Surcal o Platanillal, su extensión es aprox. de 4.05 km², se encuentra a una altura que oscila entre los 1600 y los 1800 m.s.n.m., en este sector se destaca el cultivo del café y del plátano. El tercer y último sector es Suaquira Arriba, con un área de 5.78 km² tiene una altura que sobrepasa los 2200 m.s.n.m., y se destacan por la calidad de sus tierras en las que se cultivan productos como la papa y el lulo entre otros, también se destacan la calidad de sus pastos por los que la explotación bovina ocupa un renglón muy importante en el desarrollo de la zona (Alcaldía Municipal de Pachavita, 2020).

El lugar de interés sobre el cual se desarrolló el presente trabajo está ubicado en el sector Suaquira Termales y su actividad económica principal es el turismo relacionado a los termales de Aguacaliente

ubicados en las coordenadas longitud:73°23'13.27"O y latitud:5°12'16.69"N, como se evidencia en la siguiente figura.

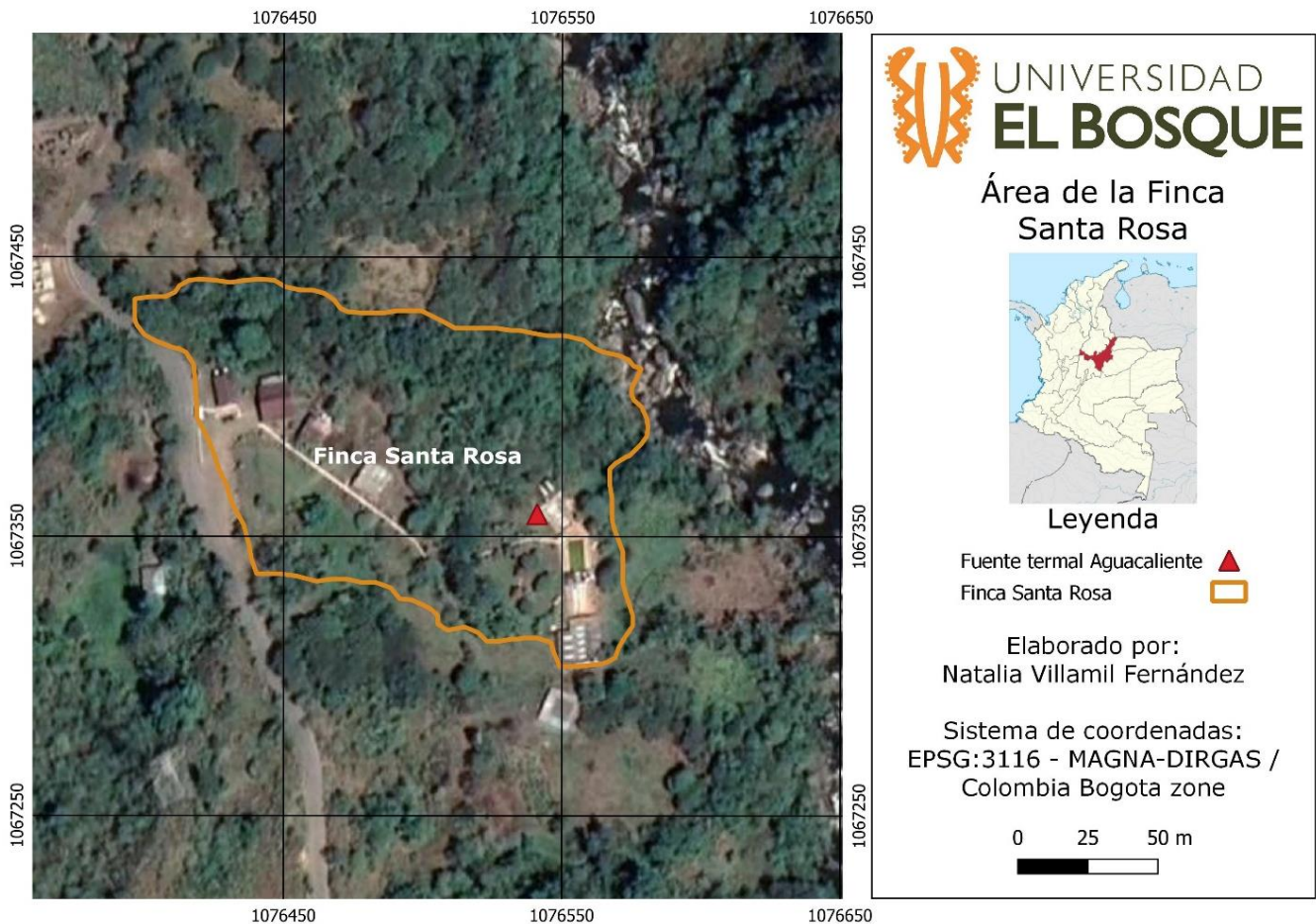


Figura 8. Área de la Finca Santa Rosa.
Realizado por: Autora

Por otra parte, la capacidad efectiva de generación de energías alternativas como la eólica y solar en el territorio en cuestión, no se tiene identificada y se define que la fuente de mayor uso para la generación de energía proviene del embalse La Esmeralda. Estimaciones recientes realizadas por Hernández & Alarcón en el 2017 para el POMCA del río Garagoa, establecen que “en energía solar, los municipios de la cuenca presentan una irradiación solar promedio con valores entre 3.5- 4.5 kWh/m², igual al promedio del país que alcanza 4.5 kWh/m²”. En el año 2020 se ejecutó el proyecto “Suministro, instalación y puesta en funcionamiento del sistema fotovoltaico solar en la Institución Educativa Técnica Agropecuaria San Isidro, como estrategia de mitigación al cambio climático en el municipio de Boyacá, jurisdicción de CORPOCHIVOR”, el cual tuvo como propósito reducir el uso de combustibles fósiles como el CO₂, uno de los principales gases con efecto invernadero (GEI), contribuyendo al desarrollo sostenible y fortaleciendo la mitigación del cambio climático; así mismo, la implementación de este tipo de propuestas en instituciones educativas, construye una herramienta de educación ambiental, pues fomenta la apropiación y divulgación de los beneficios de las energías alternativas (CORPOCHIVOR, 2021).

5.5. Marco institucional

Las instituciones públicas y privadas que estuvieron relacionadas al proyecto de investigación se presentaron a continuación, teniendo en cuenta sus labores, jurisdicciones y actividades relacionadas al aprovechamiento de los recursos geotérmicos en la región.



Figura 9. Organigrama de los actores relevantes en el desarrollo del Proyecto.

Realizado por: Autora

5.5.1. Actores directos

Los actores directos son quienes guardan una relación estrecha con la ejecución del proyecto, además de ejercer control sobre el área de influencia, en este caso la finca Santa Rosa, vereda Suaquira, municipio de Pachavita. La Universidad El Bosque participa como una fuente para la investigación, generando espacios donde los estudiantes pueden compartir lo aprendido durante los diferentes programas, sus habilidades, y lo más importante, cómo aplican lo anterior a problemáticas reales presentes en los territorios. Desde la institución se manejan diferentes grupos de investigación, que permiten generar conocimiento guiado. Este trabajo se desarrolla teniendo en cuenta los parámetros establecidos por la línea de Ingeniería para la Sostenibilidad, que genera investigación a nivel básico y aplicado, para el diseño y optimización de sistemas encaminados a la obtención de bienes y servicios acordes con las dinámicas reales, desde el punto de vista de la ingeniería; además estimula la innovación y formulación de nuevas tecnologías.

Por otra parte, se tuvo en cuenta la Alcaldía de Pachavita y CORPOCHIVOR como actores regionales claves, para la ejecución de la investigación, puesto que son ordenadores del territorio y una fuente de información segura. Teniendo en cuenta el Plan de Desarrollo Municipal de Pachavita, se pudo establecer que la línea estratégica “Unidos por nuestra tierra y el desarrollo económico” busca el crecimiento económico, continuo y sostenido de la población pachavitense, esto mediante la formulación e implementación de programas que permitan mejorar la calidad de vida de la población, respondiendo a los Objetivos de Desarrollo Sostenible, que para el caso de la divulgación de los resultados obtenidos de la investigación, corresponden al objetivo siete el cual es “Energía Asequible y no contaminante”

(Alcaldía Municipal de Pachavita, 2020). Para CORPOCHIVOR es de gran importancia incluir los Objetivos de Desarrollo Sostenible dentro de su Plan de Acción Cuatrienal y menciona el objetivo siete como uno que guarda especial relación con el tema del uso eficiente y conservación de los recursos naturales renovables, puesto que al promover energía asequible y no contaminante (solar, eólica y térmica), se mejora la productividad energética, garantizando la demanda del desarrollo y se contribuye de manera directa con el mejoramiento de los efectos de los combustibles fósiles (Corpochivor, 2020).

5.5.2. Actores indirectos

Dentro de los actores indirectos se mencionan algunas instituciones relacionadas con la gestión del recurso geotérmico en el país, como por ejemplo el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Ministerio de Minas y Energía. El SGC es un instituto científico y técnico del Sistema Nacional de Ciencia adscrito a MinMinas, que se encarga de realizar investigación científica básica y aplicada del potencial de recursos disponibles en el subsuelo del territorio colombiano, teniendo en cuenta las políticas definidas (Servicio Geológico Colombiano, 2019a). La mayoría de estudios encaminados a la geotermia por parte de estas instituciones, reúnen todo lo relacionado a la identificación de áreas con gran importancia y potencial para el desarrollo de proyectos, además de informes de prefactibilidad que reúnen datos relacionados con geología, geoquímica y geofísica (Servicio Geológico Colombiano, 2019). El Instituto Geográfico Agustín Codazzi, es quien proporciona la información cartográfica que permite analizar el área de influencia de la investigación, desde una perspectiva geoespacial, teniendo en cuenta factores geomorfológicos, hídricos, sociales, entre otros, para así solucionar la problemática identificada de una manera completa. Por último, AES Chivor es la organización encargada del manejo de la hidroeléctrica que abastece de energía a la región del Valle de Tenza y quien también está interesada en apoyar proyectos relacionados a la exploración y explotación de energías no convencionales las cuales son de bajo impacto al ambiente, trayendo consigo una serie de beneficios tanto económicos, como en la reducción de impactos negativos.

6. Metodología

Para este apartado del trabajo se diseñó la matriz metodológica bajo la cual se desarrolló cada uno de los objetivos planteados, esto teniendo en cuenta la naturaleza del problema identificado. En cuanto al enfoque se estableció que este es de carácter cuantitativo con un alcance deductivo, para los métodos de investigación se propusieron tres descriptivo, exploratorio y explicativo, los cuales corresponden a cada uno de los objetivos específicos en ese orden respectivamente. En las técnicas e instrumentos se buscó que estos estuviesen acorde a la temática a abordar y a los resultados esperados, para el caso del objetivo número uno se propusieron técnicas e instrumentos para recolección de datos en campo, para el segundo objetivo se emplearon softwares, para el análisis de información y por último en el tercer objetivo se procuró por una observación directa a través de matrices de análisis e información secundaria.

6.1. Enfoque

La orientación para el desarrollo del trabajo de grado fue de carácter *cuantitativo*, puesto que desde el inicio se planteó un problema de estudio delimitado y concreto, el cual se fundamenta en la hipótesis, teniendo en cuenta una serie de investigaciones previas sobre la temática a abordar dentro del marco de referencia. Lo anterior con el fin de someter a prueba la hipótesis y llegar ya sea a comprobarla o descartarla. Los datos fueron recogidos mediante la medición de parámetros definidos bajo las

características del estudio, teniendo en cuenta los procedimientos estandarizados y aceptados por la comunidad científica relacionada a esta área del conocimiento. Esta investigación fue de carácter objetiva, tomando en cuenta el tipo de información que será recogida en el tiempo que se llevó a cabo el estudio y el análisis de la misma, esto evitó caer en prejuicios u observaciones personales por parte del investigador. Se buscó la construcción y demostración de esta teoría, aplicando la lógica deductiva y teniendo en cuenta el orden riguroso de cumplimiento de las fases definidas dentro el cronograma de actividades, terminando con una serie de conclusiones respecto a la hipótesis (Hernández-Sampieri et al., 2014).

6.2. Método

Para el caso del presente trabajo de investigación se emplea el método *deductivo* que se asocia directamente al enfoque cuantitativo ya mencionado, este permite establecer las características de una realidad particular que se analiza por proposiciones o leyes científicas de carácter general, formuladas con anterioridad. El método deductivo, relaciona tres momentos que son aplicados al desarrollo del proyecto, el primero es la axiomatización que parte de verdades que no requieren demostración, para este caso la verdad de la que se parte, es que las fuentes termales presentan un gran potencial para la obtención de energía; el segundo es postulación el cual se refiere a los postulados, doctrinas asimiladas o creadas, este momento se aplica al momento de postular el Ciclo Rankine como tecnología de aprovechamiento del recurso disponible, y por último está la demostración, que se refiere al acto científico de comprobar los resultados, el cual se aplica en el proyecto al momento de realizar el modelo matemático del ciclo, el cual permite confirmar la hipótesis planteada al comienzo de la investigación (Dávila-Newman, 2006).

6.3. Alcance

En cuanto al método de la investigación se tuvo en cuenta el *descriptivo, exploratorio y explicativo*, para el desarrollo de cada uno de los objetivos respectivamente. En el primer objetivo del presente trabajo se hace la identificación socioeconómica de la finca y la evaluación de parámetros fisicoquímicos, que suministran información que caracteriza el fenómeno que se está estudiando, esto gracias a mediciones y recolección de información. El segundo objetivo está relacionado al enfoque exploratorio al emplear el modelamiento matemático de la aplicación del Ciclo Rankine en la fuente termal escogida, puesto que no es un tema abordado con frecuencia en el país; lo anterior se apoya en que la bibliografía abordada poco habla de estas tecnologías aplicadas a puntos de interés como el que se estableció como base, para el desarrollo del trabajo. Por último, el tercer objetivo pretendió realizar un análisis relacionado a las actividades que se desarrollan en la finca, para así establecer en cuales es viable el aprovechamiento del recurso geotérmico e hidrotermal, esto a través del alcance explicativo que permitió establecer la relación entre los datos obtenidos en el objetivo uno y dos, con las condiciones actuales de la finca donde se desarrolló el trabajo de investigación (Hernández-Sampieri et al., 2014).

6.4. Técnicas e Instrumentos

Según Hernández-Sampieri et al. (2014), en la investigación con un enfoque cualitativo por lo general se emplean técnicas para recolectar datos, tales “como la observación no estructurada, entrevistas abiertas, revisión de documentos, discusión en grupo, evaluación de experiencias personales, registro de historias de vida, e interacción e introspección con grupos o comunidades”, pero para el caso de este trabajo de investigación se empleó la *entrevista semiestructurada*, que permite tener un mejor manejo

de la información al momento de recogerla y analizarla, además de disminuir la cantidad de información que no es necesaria. Para el caso de los instrumentos en el objetivo número uno, se emplean tanto *instrumentos de campo*, como de *recolección de información secundaria*, esto teniendo en cuenta la naturaleza del objetivo; el desarrollo del objetivo número dos se apoya en el uso de instrumentos como *programas que permiten el procesamiento de la información obtenida en campo*; por último, en el tercer objetivo se hace uso de *instrumentos para la recolección de información secundaria y el análisis de la misma*.

Tabla 3. Matriz Metodológica.

Propuesta conceptual matemática para la implementación de un Ciclo Rankine de transformación energética, a partir de la fuente termal Aguacaliente, caso de estudio finca Santa Rosa, Pachavita-Boyacá.									
Enfoque		Cuantitativo							
Método		Deductivo							
Objetivo general	Objetivos específicos	Actividad (es)	Alcance (s)	Técnica (s)	Instrumento (s)				
Determinar la cantidad de energía producida por la fuente termal Aguacaliente ubicada en la finca Santa Rosa y sus posibles usos, a partir de la simulación del modelo matemático correspondiente al Ciclo Rankine.	Identificar las características fisicoquímicas de la fuente termal Aguacaliente y las socioeconómicas de la finca.	Delimitación del área de estudio	Descriptivo	Observación directa y recopilación de datos cartográficos	Diario de campo, metadatos, cámara fotográfica				
		Caracterización socioeconómica de la finca		Entrevista semiestructurada	Guía de entrevista, diario de campo				
		Muestreo en campo para el análisis fisicoquímico		Mediciones de datos en campo	Termómetro digital, cuadro para el registro de datos, pH metro				
		Análisis de los datos obtenidos en campo		Análisis documental	Matriz de análisis				
	Estimar la cantidad de energía eléctrica producida, a partir de la aplicación del modelo del Ciclo Rankine en el software EES	Aguacaliente y las socioeconómicas de la finca.		Compilación de la información cartográfica de la zona	Exploratorio	Recopilación de datos cartográficos	Metadatos, cartografía base		
				Depuración de la información relacionada con tecnologías		Observación indirecta	Matriz de análisis		
		Análisis de la información teniendo en cuenta la naturaleza de la fuente termal		Análisis documental		Diario de campo, bases de datos			
		Desarrollo de los modelos matemáticos encontrados en las metodologías de aplicación de las tecnologías		Aplicación teórica		Uso de herramientas tecnológicas, programas como Engineering			
		Establecer las posibles aplicaciones o usos, para el correcto aprovechamiento de la energía geotérmica disponible en la finca		Acercamiento a las actividades económicas que se desarrollan dentro del área de estudio		Identificación de las posibles actividades económicas ubicadas dentro del área de influencia, que pueden realizar un aprovechamiento del recurso	Correlacional	Observación directa y análisis de contenido	Cuadro de registro
								Observación directa y análisis documental	Información secundaria, bases de datos

Realizado por: Autora

6.5. Metodología por objetivos

6.5.1. Objetivo específico 1

El desarrollo del primer objetivo específico, el cual es *Identificar las características fisicoquímicas de la fuente termal Aguacaliente y las socioeconómicas de la finca*, inició a partir de la toma de Temperatura directamente en la fuente termal, durante 4 meses (diciembre del 2021, enero, febrero y marzo del 2022), en un periodo de 40 minutos y registrando los datos cada diez. Las mediciones fueron realizadas con el termómetro digital modelo Kamtop, con termocupula tipo K (-200 a 1372 °C) que ofrece una gran precisión y un amplio rango de medición. Los resultados de la investigación fueron registrados en la tabla que se refiere a continuación:

Tabla 4. Registro de datos obtenidos de temperatura.

Fuente termal	MES			
	Fecha	Tiempo	°C	
		Hrs.	max.	min.
	Promedio			

Realizado por: Autora

Con las temperaturas obtenidas a partir de las mediciones realizadas en campo, se calculó la temperatura media o promedio de la fuente termal, esto a través de la siguiente fórmula estadística.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \text{ Ecuación 1.}$$

Además de la temperatura se evaluaron tres parámetros adicionales, como lo fueron el pH, la Conductividad Eléctrica y la Salinidad, esto con ayuda del Multiparámetro que fue facilitado por el Centro de Laboratorios de la Universidad El Bosque. Para su calibración y uso se revisó el contenido del **Manual de Operaciones de YSI 63** (YSI incorporated, n.d.) y en primer lugar se liberó la sonda para su posterior calibración en la solución con pH neutro (7,00), donde se colocaron 30 mL en la probeta y se sumergió la sonda en la solución, asegurándose de que los sensores de pH y temperatura quedarán cubiertos, en este paso se deben esperar entre 5 y 10 minutos. Después de que el sistema se ajustó y calibró, la sonda fue insertada en el fluido y se esperó a que la lectura se estabilizara; este procedimiento se repitió con cada uno de los parámetros que fueron evaluados.

En la caracterización socioeconómica de la finca se utilizó la técnica de reconocimiento de campo en la finca Santa Rosa, haciendo uso de la observación y ubicación cartográfica de la fuente hidrotermal, sumado a esto, se realizó una entrevista semiestructurada (Anexo 2.) al propietario de la finca y

administrador de los termales como lugar de entretenimiento, esto para solventar los requerimientos del trabajo y precisar la calidad de la información, evitando la subjetividad de los resultados obtenidos en las diferentes visitas diagnósticas.

6.5.2. *Objetivo específico 2*

El segundo objetivo específico, que corresponde a “Estimar la cantidad de energía eléctrica producida, a partir de la aplicación del modelo del Ciclo Rankine en el software EES”, se tomó como referencia una de las tecnologías que ha hecho posible la generación de electricidad a partir de recursos geotérmicos menores a 150°C. El funcionamiento de las plantas binarias está dado por el intercambio de energía entre el agua proveniente de la fuente termal y el líquido secundario, el cual posee un mejor comportamiento termodinámico, lo que quiere decir que este tiene un bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a bajas temperaturas.

Para el desarrollo de los cálculos, se utilizaron las propiedades termodinámicas del Isobutano, generando la siguiente secuencia adaptada del trabajo de Peralta-Quilla & Miranda-Rodríguez (2017). Los datos de entrada se enlistan a continuación:

- *Temperatura* → $T_1 = \text{°C}$
- *Presión inicial* → $P_1 = 10 \text{ bar}$
- *Presión de expansión* → $P_2 = 0,65 \text{ bar}$
- *Eficiencia de la turbina* → $n_t = 0,9$
- *Eficiencia de la bomba* → $n_b = 0,8$
- *Calidad** → $x = 0$
- *Flujo másico del Isobutano* → $m_{fs} = 0,5014 \frac{\text{Kg}}{\text{s}}$

Utilizando el Ciclo Rankine, se procedió de la siguiente manera:

- 1) Se calculó la entalpía y entropía utilizando la temperatura promedio obtenida en el objetivo específico uno y la presión inicial:

$$h_1 = h(P_1, T_1) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} \right] \text{ Ecuación 2.}$$

$$S_1 = S(P_1, T_1) \left[\frac{\text{kJ}}{\text{Kg}} \right] \text{ Ecuación 3.}$$

- 2) Al ser un proceso **Isentrópico**, se consideró que la entropía dos (S_2) es igual a la entropía uno (S_1), por lo tanto, la entalpía dos h_2 se calculó a partir de S_2 y la presión de expansión.

$$S_1 = S_2 \text{ Ecuación 4.}$$

$$h_2 = h(P_2, S_2) \left[\frac{kJ}{Kg} \right] \text{ Ecuación 5.}$$

- 3) Se estimó el estado real de la entalpía dos (h_{2r}), a partir de la eficiencia de la turbina.

$$h_{2r} = h_1 - n_t(h_1 - h_2) \left[\frac{kJ}{Kg} \right] \text{ Ecuación 6.}$$

- 4) La entalpía tres (h_3) y el volumen específico (v), se determinaron a partir de la capacidad (x) propia del fluido.

$$h_3 = h(P_2, x) \left[\frac{kJ}{Kg} \right] \text{ Ecuación 7.}$$

$$v = v(P_2, x) \left[\frac{m^3}{Kg} \right] \text{ Ecuación 8.}$$

- 5) Para este paso se consideró que $P_4 = P_1$ y $P_3 = P_2$, para calcular la entalpía cuatro (h_4).

$$h_4 = h_3 + v(P_4 - P_3) \left[\frac{kJ}{Kg} \right] \text{ Ecuación 9.}$$

- 6) Se estimó el estado real de la entalpía dos (h_{4r}), a partir de la eficiencia de la bomba.

$$h_{4r} = h_3 - \frac{h_3 - h_4}{n_b} \left[\frac{kJ}{Kg} \right] \text{ Ecuación 10.}$$

- 7) A partir de este paso se calcularon los componentes del ciclo. En primer lugar, el vapor generado en la fuente de calor en el estado uno (1), con presión y temperatura elevadas, entra a la turbina y se expande produciendo trabajo, el que se descarga en el estado dos (2) a una baja presión.

$$W_t = (h_1 - h_{2r}) \left[\frac{kJ}{Kg} \right] \text{ Ecuación 11.}$$

- 8) En este paso se determinó el trabajo producido por la bomba, con el caudal del fluido secundario dentro del funcionamiento del ciclo ($Q = 1 \frac{Kg}{s}$).

$$W_b = (h_{4r} - h_3) \left[\frac{kJ}{Kg} \right] \text{ Ecuación 12.}$$

- 9) La potencia de la turbina (P_t), se calculó a partir del flujo másico propio del fluido de trabajo, la entalpía uno y la entalpía dos en su estado real.

$$P_t = m_{fs} * (h_1 - h_{2r}) \left[\frac{kJ}{s} \right] \rightarrow KW \quad \text{Ecuación 13.}$$

- 10) La potencia de la bomba (P_b), se calculó a partir del flujo másico propio del fluido de trabajo, la entalpía tres y la entalpía cuatro en su estado real.

$$P_b = m_{fs} * (h_{4r} - h_3) \left[\frac{kJ}{s} \right] \rightarrow KW \quad \text{Ecuación 14.}$$

- 11) En este paso se halló la potencia neta (P_n), la cual es la fracción útil de energía que se desarrolló en el ciclo termodinámico.

$$P_n = P_t - P_b \left[\frac{kJ}{s} \right] \rightarrow KW \quad \text{Ecuación 15.}$$

- 12) Por último, se obtuvo el resultado correspondiente al rendimiento térmico (n_p), esto a partir de las entalpías de cada uno de los estados presentes en el ciclo, que se calcularon anteriormente.

$$n_p = 1 - \frac{h_2 - h_3}{h_1 - h_4} \quad \text{Ecuación 16.}$$

6.5.3. Objetivo específico 3

Con respecto al tercer objetivo específico, que es *Establecer las posibles aplicaciones o usos, para el correcto aprovechamiento de la energía geotérmica disponible en la finca*; en primer lugar, se procedió a hacer un profundo análisis bibliográfico de la energía geotérmica de baja entalpía, todos sus posibles usos y las experiencias a nivel nacional e internacional. Dicha información fue obtenida a partir de fuentes primarias y secundarias, abarcando libros, documentos y publicaciones. Para solventar la identificación y caracterización de las alternativas para el aprovechamiento del potencial geotérmico de la fuente termal Aguacaliente. Se tomó como referente inicial el consumo de energía registrado en la factura, además se identificaron los diferentes componentes del establecimiento donde existe un consumo y finalmente se tomaron los resultados del trabajo realizado por Chaparro-Guevara en el 2018 en el departamento de Boyacá, quien en su investigación realizó un diagnóstico para identificar los posibles usos de los recursos disponibles en la región; el trabajo se escogió teniendo en cuenta que el contexto geográfico bajo el cual se desarrolló es muy parecido al de la Vereda Suaquira, donde los territorios continúan con un nivel de ruralidad significativo y el comportamiento de la comunidad aún está bastante relacionada a las tradiciones culturales características de esta zona del país, predominando así la agricultura y ganadería tradicional. En la siguiente figura se muestran las dos etapas que se diseñaron para el desarrollo del presente objetivo, teniendo en cuenta los pasos mencionados con anterioridad.



Figura 10. Contextualización de las fases.
Realizado por: Autora

7. Resultados, análisis y discusión.

7.1. Identificar las características fisicoquímicas de la fuente termal Aguacaliente y las socioeconómicas de la finca

7.1.1. Caracterización fisicoquímica

La temperatura de los fluidos geotermales, varía de acuerdo a la cercanía que se tenga a la fuente de calor asociada al sistema geotérmico y también por la influencia de las condiciones del ambiente, cuando el fluido se encuentra próximo a la superficie. Los meses en los que se realizaron las mediciones son los más cálidos del año, reportando temperaturas de los 19 a 20°C y bajos niveles de precipitación. En la siguiente tabla se registraron las variaciones de las temperaturas en los meses de diciembre, enero, febrero y marzo, siguiendo la metodología propuesta anteriormente.



Figura 11. Registro de la temperatura en campo.
Realizado por: Autora

Tabla 5. Registro de las mediciones de temperatura obtenidas en campo.

Fuente termal	DICIEMBRE				ENERO			
	Fecha	Tiempo	°C		Fecha	Tiempo	°C	
		Hrs.	max.	min.		Hrs.	max.	min.
AGUACALIENTE	19/12/2021	1:14 p.m	44,5	40,4	29/1/2022	1:10 p.m	44,8	44,3
		1:24 p.m	44,9	41,0		1:20 p.m	45,3	42,4
		1:34 p.m	44,8	40,9		1:30 p.m	45,3	40,8
		1:44 p.m	44,5	40,8		1:40 p.m	45,3	41,3
		1:54 p.m	44,7	40,6		1:50 p.m	45,4	42,5
	Promedio		44,7	40,8	Promedio		45,3	41,8
					42,8			
	FEBRERO				MARZO			
	Fecha	Tiempo	°C		Fecha	Tiempo	°C	
		Hrs.	max.	min.		Hrs.	max.	min.
	27/2/2022	12:00 p.m	44,2	43,3	26/3/2022	11:40 a.m	44,9	40,5
		12:10 p.m	44,1	43,2		11:50 a.m	47,4	45,0
		12:20 p.m	43,4	42,9		12:00 p.m	45,5	43,5
		12:30 p.m	44,5	42,6		12:10 p.m	48,0	43,9
12:40 p.m		47,5	44,9	12:20 p.m		44,0	40,1	
Promedio		44,9	43,4	Promedio		46,2	43,1	
				44,1				
Temperatura Promedio (°C)				43,8				

Realizado por: Autora

La clasificación más común para las fuentes termales es teniendo en cuenta su temperatura, puesto que es un parámetro de fácil medición y se asocia con la entalpía del fluido al ser más o menos proporcionales (Llopis-Trilla & Rodrigo-Angulo, 2008). De acuerdo a los rangos de clasificación que se mencionaron en el marco teórico – conceptual, la fuente termal Aguacaliente se encuentra en el de baja temperatura considerando un rango entre los 30 y 90°C, puesto que la **Temperatura Media** encontrada a partir de la recolección de datos en campo fue de **43,8°C**, donde usualmente estos yacimientos se encuentran en cuencas sedimentarias, como es el caso del Río Garagoa cuya litología sedimentaria es predominante y “está relacionada a los eventos históricos de transgresiones y regresiones marinas destacando las formaciones del Cretácico” (Hernández & Alarcón, 2017). Una condición geológica importante para que aparezcan estos eventos en el territorio, es que exista una profundidad entre 1.500 y 2.500 m de formaciones geológicas permeables, capaces de contener y dejar circular fluidos que extraigan el calor de las rocas (Llopis-Trilla & Rodrigo-Angulo, 2008).

Para el caso de la fuente termal Aguacaliente, sus aguas son de **origen telúrico** teniendo en cuenta las características del terreno donde yace y que su temperatura es menor a los 50°C, este tipo de fuentes tiene como mayor suministro de sus aguas a las precipitaciones y a los cauces de los ríos y quebradas, que para el caso de estudio se relacionan la quebrada La Laja y el Río Garagoa, donde el proceso según Rojas-Martínez et al. (2014) consiste en que las aguas

se filtran y se percolan al interior de la corteza terrestre, a través de las capas de roca. A medida que esto sucede, estas aguas aumentan su temperatura debido a la presión que generan los estratos o capas suprayacentes. Esta infiltración es ayudada por las fisuras y fracturas contenidas en las rocas, recorrido que favorece, en gran medida, a la mineralización del agua; estas mismas presiones hacen que el agua mineralizada ascienda hasta aflorar en el depósito. (p. 6)

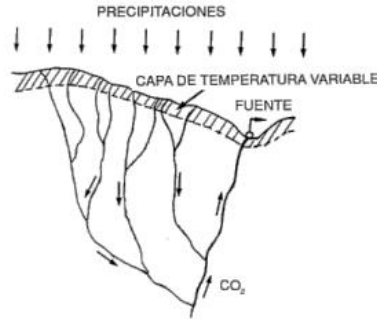


Figura 12. Origen telúrico de las aguas termales.
Tomado de: (Rojas-Martínez et al., 2014)

Por otra parte, dentro de los parámetros fisicoquímicos evaluados en campo se reportaron los valores correspondientes al pH, la salinidad y conductividad (**Tabla 6**), teniendo en cuenta que estos permiten dar un contexto aproximado de la composición química de las aguas y también de las variaciones exógenas que se dan de forma natural en el sistema geotérmico asociado. Como punto de comparación para estas características, se empleó la información disponible para las fuentes termales del sector Paipa-Iza, puesto que, en la región aledaña al municipio y vereda de interés aún no se han desarrollado los estudios suficientes, que permitan tomar un punto de referencia para el análisis de los datos obtenidos.



Figura 13. Medición en campo con el multiparámetro.
Realizado por: Autora

Tabla 6. Resultados de los parámetros fisicoquímicos evaluados en campo.

Parámetro	Valor	Unidad
pH	6,78	-
Salinidad	0,4	ppt
Conductividad	1030	$\mu S/cm$

Realizado por: Autora

En primer lugar, el pH representa un papel importante para entender gran parte de los procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas, además en sistemas hidrotermales, este parámetro se encuentra bajo la influencia de fluidos salinos, la temperatura y por los minerales amortiguadores (Cerpa-Londoño, 2018). El valor de la medición realizada en campo fue de 6,78, lo que es considerado como un pH neutro (5-7) para las fuentes termales asociadas al sistema geotérmico de Paipa (Prieto-Rincón et al., 2010), adicional a lo anterior según la **Tabla 7**, el tipo de agua de la fuente termal Aguacaliente es bicarbonatada teniendo en cuenta los rangos aproximados de pH, que allí se muestran.

Tabla 7. Tipos químicos de aguas en los sistemas geotérmicos.

TIPO DE AGUA	RANGOS APROXIMADOS DE PH	PRINCIPALES ANIONES
Agua subterránea	6 – 7.5	Trazas de CO_3H^-
Agua clorurada	4 - 9	Cl, algo de CO_3H^-
Agua cloruro-bicarbonatada	7 – 8.5	Cl, CO_3H^-
Aguas calentadas por vapor	4.5 - 7	SO_4 , CO_3H^- , trazas de Cl^-
Aguas sulfato-acidas	1 - 3	SO_4 , trazas de Cl^-
Aguas sulfato-cloruro-acido	1 - 5	Cl, SO_4^-
Aguas bicarbonatadas	5 - 7	CO_3H^-
Aguas cloruro diluidas	6.5 – 7.5	Cl, algo de CO_3H^-

Tomado de: (Cerpa-Londoño, 2018)

En este tipo de aguas “los tres aniones mayoritarios en la composición de soluciones de origen hidrotermal son generalmente cloruro, sulfato y bicarbonato (Cl, SO_4 y HCO_3), y por este motivo los más frecuentemente analizados” (Cerpa-Londoño, 2018), para la interpretación gráfica del comportamiento y proporción de dichos compuestos, se emplea el **Diagrama Triangular o Ternario de Cl - HCO_3 - SO_4** . Las aguas de la fuente termal de interés, se clasificaron en función del anión dominante y para esto se empleó c, estas son aguas periféricas y bicarbonatadas, puesto que estas especies químicas son más abundantes en pH por debajo de 8,3 (Drever, 1997).

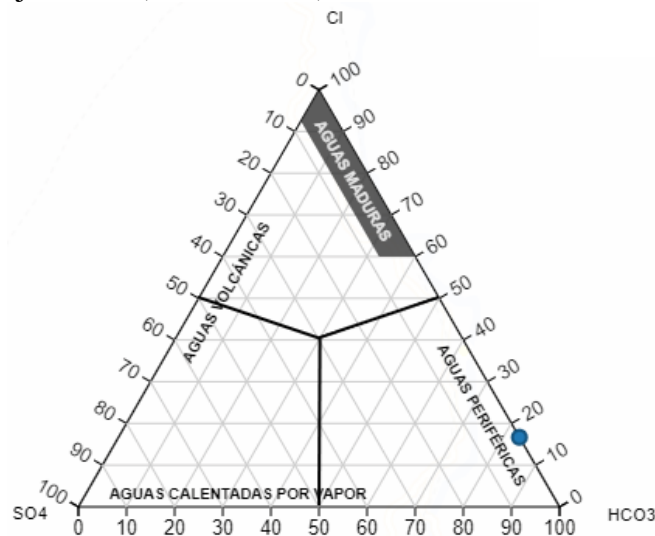


Figura 14. Diagrama triangular Cl - HCO_3 - SO_4 de la fuente termal Aguacaliente.

Adaptado de: (Servicio Geológico Colombiano, n.d.)

En segundo lugar, la conductividad es de gran importancia para el desarrollo de un proyecto geotérmico, puesto que es la capacidad del fluido para conducir la corriente eléctrica, donde los altos valores de este parámetro indican una mineralización importante y una alta cantidad de sales disueltas. Por otro lado, la variación de la temperatura modifica sustancialmente el valor de esta propiedad, puesto que el aumento en 1°C se traduce en un aumento alrededor del 2% de la conductividad (Benítez et al., 2015). El valor obtenido en campo fue de 1030 $\mu\text{S}/\text{cm}$, que a comparación de lo reportado para las fuentes termales directamente relacionadas al sistema geotérmico de Paipa, es mucho menor, teniendo en cuenta su relación directa con la temperatura de las aguas, donde en los Manantiales Pozo Inundado y Pozo Escondido, con temperaturas similares a la fuente en cuestión (42,3 y 45,3 respectivamente), los valores de conductividad son de 42.700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, esto está relacionado a la presencia de acumulaciones salinas en la zona, con alto contenidos de litio (Prieto-Rincón et al., 2010).

Por último, se midió el parámetro de la salinidad, que se define como la capacidad que posee un fluido para disolver sales presentes en los sustratos. Por otro lado, el valor de la salinidad es considerado como la suma de los iones inorgánicos disueltos, pero la mayor contribución la realizan los siguientes compuestos: Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SO_4^- , Cl^- y HCO_3^- (Ribera, 2016), como representación gráfica de estos compuestos se emplea el *Diagrama de Stiff*, que finalmente permite visualizar claramente diferentes tipos de agua relacionado a la forma del polígono (*Figura 15*) y su grado de mineralización, con el ancho de la gráfica (Palacios-Aráuz, 2016).

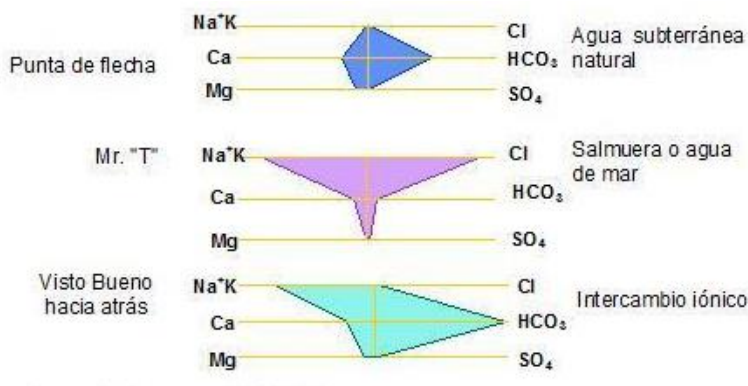


Figura 15. Tipos de aguas según Stiff.
Tomado de: (Palacios-Aráuz, 2016)

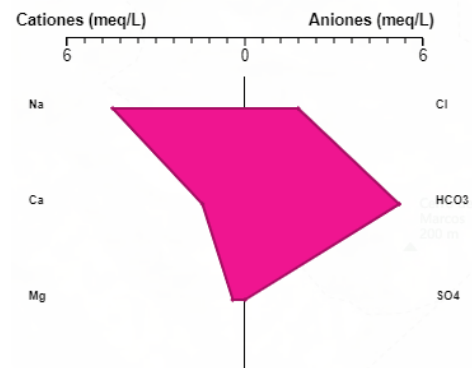


Figura 16. Diagrama de Stiff de la fuente termal Aguacaliente.
Adaptado de: (Servicio Geológico Colombiano, n.d.)

Se obtuvo el diagrama de Stiff para la fuente termal Aguacaliente (*Figura 16*), a partir de la información suministrada por el Servicio Geológico Colombiano en su aplicativo de INVTERMALES, donde según la *Figura 15*, las aguas del yacimiento de interés son de intercambio iónico (bicarbonatadas – sódicas), lo que se puede explicar en la disminución de las concentraciones de Magnesio (Mg), el cual es retenido con preferencia al Sodio (Na) en los suelos y rocas asociados al sistema geotérmico (García-Hidalgo et al., 2012). Por otro lado, el valor de la salinidad obtenido en campo fue de 0,4 ppt (partes por mil), que se traduce al Sistema Internacional en 0,4 g/L, esto permite su mejor interpretación, donde según Ribera (2016) en los rangos de concentraciones expuestos en su trabajo *“Salinidad y Aguas Subterráneas”*, las aguas dulces poseen valores de salinidad total menores a los 0,5 g/L, es decir que

para el caso de la fuente termal de interés, las agua son de este tipo y con baja concentración de sales disueltas, lo que indica que el nacimiento no se encuentra a una gran profundidad.

7.1.2. Caracterización socioeconómica de la finca

La finca Santa Rosa pertenece a la vereda Suaquira Abajo del municipio de Pachavita – Boyacá, el predio cuenta con un área 1,617 hectáreas y limita con la quebrada La Laja en la parte norte, en el oriente limita con el Río Garagoa, hacia el sur con dos fincas vecinas y en el occidente con la carretera departamental que conduce del municipio de Chinavita a la ciudad de Tunja, esto según constata en la escritura y se ratificó con las visitas realizadas. La actividad económica principal que se desarrolla en la finca, es la de los termales para el entretenimiento y turismo, a través del aprovechamiento de los recursos geotermales disponibles. La operación de los **Termales Aguacaliente** inicio en el año 2009 como se estipula en la Resolución No. 941 de CORPOCHIVOR, que otorgó al señor Pablo Emilio Amaya Chacón la **“Concesión de Agua Superficiales”**, quien administró dicho establecimiento hasta el año 2014, cuando fue tomado por el actual propietario el señor Darío Andrés Amaya Buitrago. En el año 2019 se solicitó la prórroga de la concesión, teniendo en cuenta que este tipo de permisos solo se da por 10 años, este proceso quedo registrado bajo la Resolución No. 626 y expediente 105-09, allí se enuncia la cantidad de agua concedida para la actividad, la cual es de 0,85 L/s con respecto a los 1,48 L/s del caudal natural, teniendo en cuenta que esta deriva de dos nacimientos Aguacaliente 1 y 2, esto para el beneficio y funcionamiento de tres piscinas termales, lo que se considera un uso industrial.

Según las observaciones realizadas en campo y con el acompañamiento del señor Darío Andrés Amaya Buitrago, el nacimiento es captado por medio de una tubería de PVC de cuatro pulgadas de diámetro y sigue su curso hasta la captación que se da en una caja de concreto y ladrillo, donde existen tuberías de dos pulgadas de diámetro para el rebose en caso de que se aumente el caudal, por último, el agua es dirigida a las piscinas por gravedad, desde una cámara subterránea. El flujo del recurso por las piscinas, es de paso, lo que quiere decir que se capta la totalidad del flujo, se llena la piscina, esta llega al nivel máximo que puede almacenar y por último se genera el vertimiento, el cual es liberado a unos escasos diez metros y sigue con su curso natural que conecta al Río Garagoa ubicado a escasos ochenta metros de distancia. Se identifican 3 piscinas de diferentes dimensiones y volúmenes, que funcionan de acuerdo a la época del año, teniendo como referencia la cantidad de personas que visitan el lugar, estas cuentan con las siguientes dimensiones:

Piscina No. 1	Piscina No. 2	Piscina No. 3
Largo: 9,80 m	Largo: 11,86 m	Largo: 7,383 m
Ancho: 4,84 m	Ancho: 5,90 m	Ancho: 5,90
Profundidad mínima: 0,55 m	Profundidad mínima: 1,10 m	Profundidad mínima: 1,10 m
Profundidad máxima: 0,85 m	Profundidad máxima: 1,70 m	Profundidad máxima: 1,70 m
Volumen: 33,2024 m ³	Volumen: 97,9636 m ³	Volumen: 60,984 m ³
Caudal de entrada: 0,38 L/s	Caudal de entrada: 1,13 L/s	Caudal de entrada: 0,705 L/s

El caudal que se necesita para el llenado de las tres piscinas es de 2,22 L/s, pero considerando que las mismas no se llenan todos los días sino cada tercer día y no todas se encuentran en funcionamiento al mismo tiempo, excepto en ciertas épocas de recreación y turismo, festivos y fechas vacacionales, se considera que el caudal concedido es suficiente para cubrir las capacidades ya diseñadas por el propietario del establecimiento. Dentro de las obligaciones del permiso concedido para la captación de

aguas superficiales por CORPOCHIVOR, el interesado debe caracterizar las actividades que generan vertimientos y si estos serán dirigidos al Río Garagoa o infiltrados al suelo, entregar el aforo volumétrico realizado día a día especificando la hora de toma y el caudal en (L/s), presentar la descripción de la operación del sistema y el certificado de inscripción al acueducto veredal al que pertenece. Este acueducto se beneficia principalmente de las aguas de la quebrada La Olla y fue construido en el año 2007 por la alcaldía del municipio de Pachavita, actualmente no se encuentra inscrito ante la Autoridad Ambiental pertinente, pero a partir del mes de marzo de 2022 se comenzó con la solicitud para el permiso de captación de aguas superficiales, el cual está siendo dirigido por la presidenta de la vereda, con el fin de beneficiar a los 41 usuarios que se encuentra inscritos.

Por otra parte, mucho antes de que se comenzara con la operación de los termales en la finca Santa Rosa, se cultivaban parcelas de caña y plátano, además de la ceiba de algunas cabezas de ganado, puesto que, al ser un minifundio, el suelo y pasto no permiten la estadía de una cantidad significativa de individuos. Con el inicio de la operación de los termales, estas actividades fueron abandonadas para dirigir todos los esfuerzos a la mejora constante del servicio de recreación que se les presta a los visitantes del lugar. Según lo expresado por el administrador las mejores temporadas son en vacaciones y fines de semana con festivos, donde aproximadamente ingresan al día 100 personas, y en las temporadas bajas no supera el ingreso de 5 personas al día, adicional a esto los termales operan todos los días del año, con un horario de atención de 9 a.m. a 10 p.m.

Los residuos que son generados en el lugar son separados directamente en la fuente, donde el plástico y cartón, además de los ordinarios son entregados a la empresa de aseo del municipio de Pachavita, quien transporta este material al relleno sanitario Pírgua en la ciudad de Tunja. En el caso de los residuos orgánicos, estos son utilizados como abono para las plantaciones que se tienen en la finca, por ejemplo, en la entrevista se mencionó que en los meses anteriores se sembraron 50 individuos de Gaque nativo, para un proyecto de reforestación que se está llevando a cabo en la finca, con el fin de aumentar la cantidad de especies arbóreas y mejorar la calidad paisajística del lugar.

Finalmente, a pesar de que los termales reciben un flujo significativo de visitantes, es evidente que la ubicación no es la más favorable para su visibilidad en la región, teniendo en cuenta que el estado de las vías de acceso no es el mejor. Complementando lo anterior, es importante mencionar que la administración actual del municipio ha mostrado poco interés en incentivar el turismo dirigido a este tipo de actividades, lo que ha causado el desconocimiento de la existencia de estos sitios de interés, provocando que no exista un aumento considerable en la afluencia de nuevos visitantes y de forma paralela no se pueda seguir apoyando a la comunidad de la vereda con la generación de empleos. Durante las mesas de trabajo que se han generado con los líderes del sector comercial manifiestan que es necesario que el municipio apoye y fortalezca las actividades de producción y promoción del sector artesanal, gastronómico, ecoturístico y folclórico. Se ha sugerido crear estrategias para mejorar el desarrollo e impulso a la actividad turística, identificando y apoyando la creación de unidades productivas agroturísticas, fortalecimiento en la atención al turista y formas de mercadeo innovadoras. Es importante que se empiecen a generar otro tipo de actividades que apoyen la operación de dicho establecimiento, pero que continúen con las tradiciones del territorio, generando así nuevas alternativas de negocio sostenibles y ambientalmente responsables, que permitan incrementar los ingresos y así mismo generar un punto de partida, para nuevos proyectos que se quieran implementar.

7.2. Estimar la cantidad de energía eléctrica producida, a partir de la aplicación del modelo del Ciclo Rankine en el software EES

Para realizar la aproximación a la cantidad de energía que se puede generar, a partir de la fuente termal Aguacaliente ubicada en la finca Santa Rosa, se empleó como herramienta el software EES (Engineering Equation Solver), donde uno de los datos de entrada principales es la temperatura media del fluido, la cual se calculó en el objetivo anterior, teniendo en cuenta una serie de mediciones realizada en campo. Otro de los datos de entrada es el de la calidad, el cual corresponde a la presencia de vapor en el sistema geotérmico, es decir que la calidad para un líquido saturado es 0 (o 0%) como en este caso, mientras que para vapor saturado es 1 (o 100%) (Cequeira & Fontana, 2019). Para los valores de presión inicial, presión de expansión, eficiencia de la bomba, eficiencia de la turbina y del flujo másico del Isobutano, se utilizaron los mismos del trabajo de (Peralta-Quilla & Miranda-Rodríguez, 2017).

Se decidió que el fluido secundario o de trabajo, con el que se iba a desarrollar el modelo en el software era el Isobutano, que posee un mejor comportamiento termodinámico, es decir bajo punto de ebullición y alta presión de vapor a bajas temperaturas. El fluido seleccionado es un hidrocarburo con un rango de estabilidad y punto crítico significativo, por lo que es más favorable que los refrigerantes desde el punto de vista de la generación de potencia. Como desventaja se tiene que este tipo de compuestos obliga a un rango de temperaturas más amplio en el fluido geotérmico procedente de la fuente termal o mayor área de transferencia en el evaporador, incrementando los costos de inversión (Cerrada-Galán, 2020). El diagrama de temperatura-entropía (**Figura 17**) permite deducir que el Isobutano requiere un mayor caudal de fluido en el ciclo, pero “su presión de saturación es mayor para la misma temperatura de evaporación, por lo que la turbina podrá trabajar con mayor relación de expansión, resultando más beneficiosos desde el punto de vista de la generación de potencia” (Cerrada-Galán, 2020, p.50).

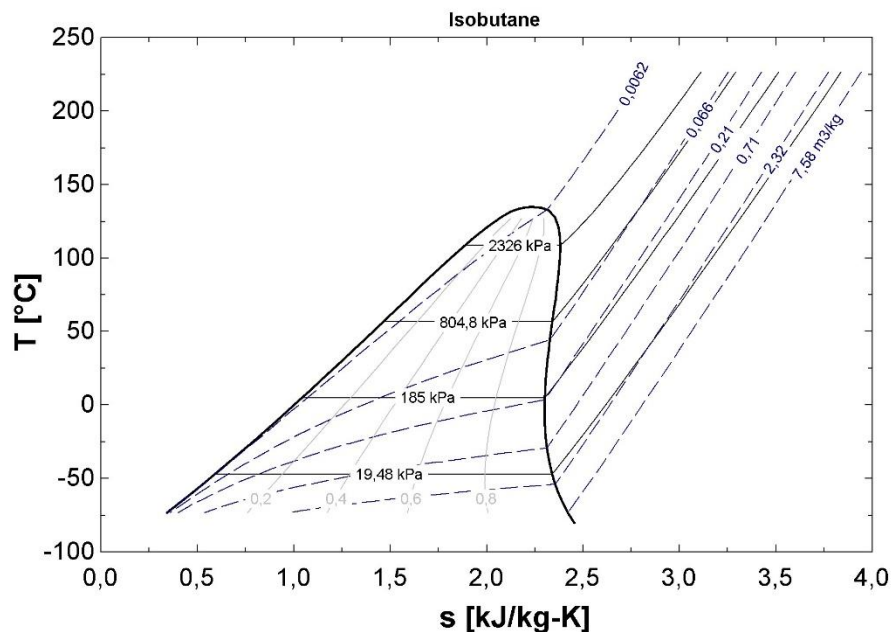
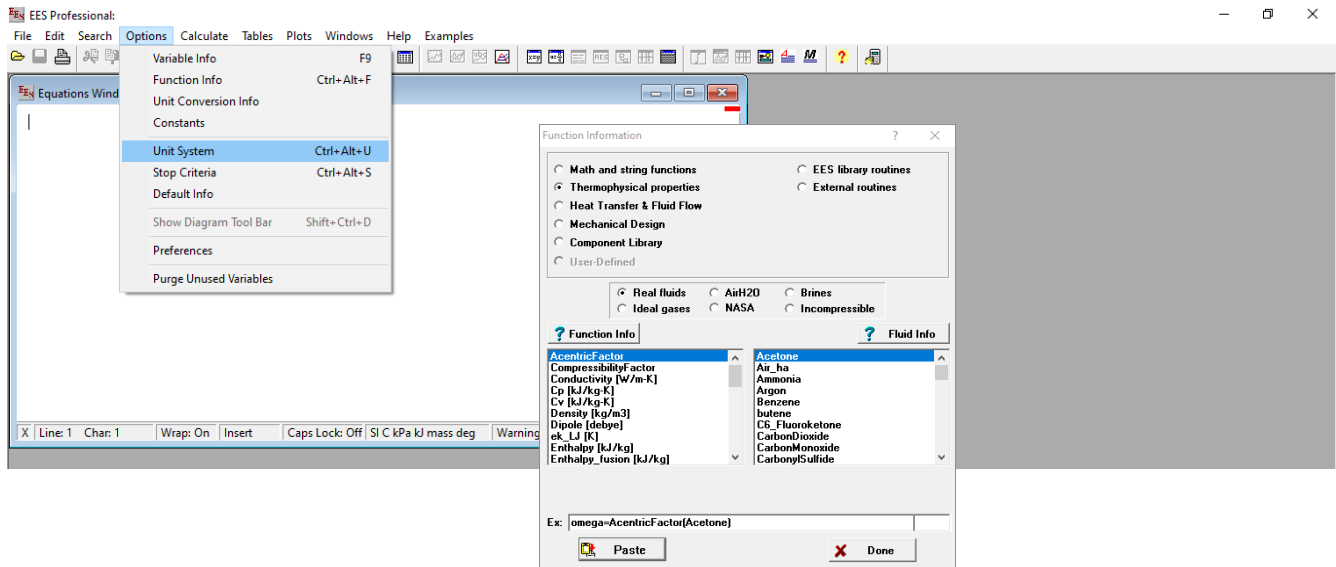
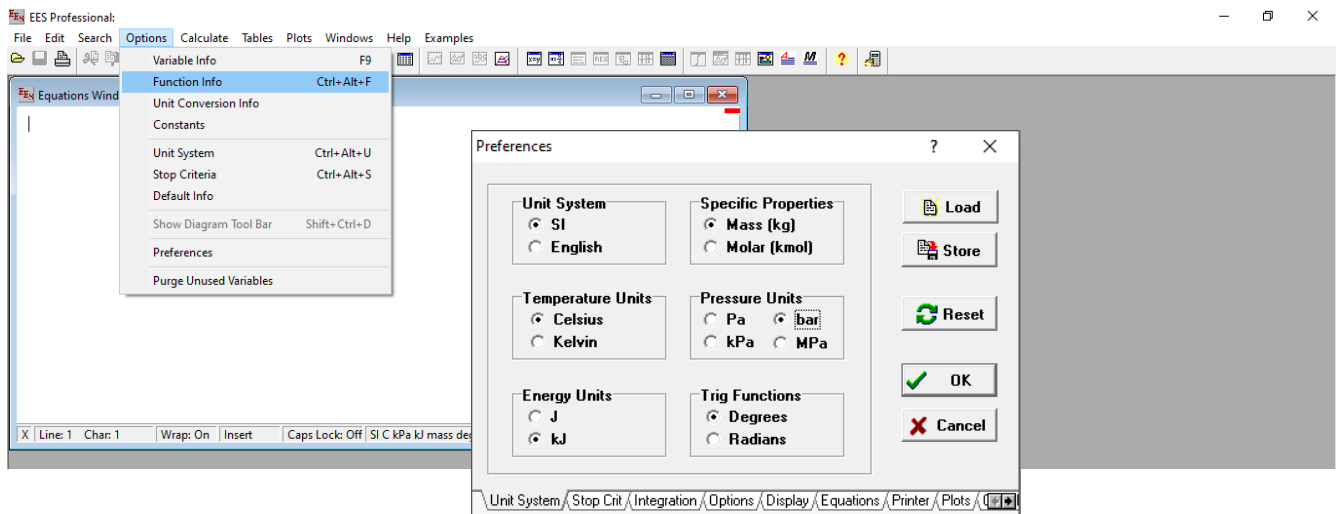


Figura 17. Curva de saturación del Isobutano.
Realizado por: Autora

De acuerdo a la metodología seleccionada, se procedió en primer lugar a configurar el software, teniendo en cuenta el tipo de función bajo la cual se desarrolla el modelo y las unidades con las que se va a trabajar. Para el caso del presente trabajo se seleccionó la opción de **Propiedades Termofísicas** (*Figura 18*) y las unidades fueron las del **Sistema Internacional** (*Figura 19*), a excepción de la presión que se puso en bares, esto no modifico las unidades de los resultados, puesto que el programa se encarga de hacer las conversiones por sí solo.



*Figura 18. Selección del tipo de función.
Realizado por: Autora*



*Figura 19. Selección de las funciones.
Realizado por: Autora*

Para comenzar con el modelo en el programa es importante entender que dentro del ciclo existen procesos isentrópicos, designados como transformaciones adiabáticas. Las bombas, turbinas, toberas y difusores son esencialmente adiabáticos en su funcionamiento, y tienen mejor desempeño cuando se minimizan las irreversibilidades, como la fricción asociada al proceso. En este caso es preciso mencionar

que un proceso adiabático reversible necesariamente es isentrópico ($S_2 = S_1$) (Cerrada-Galán, 2020). Ahora bien, se procedió a digitar la información en la ventana de ecuaciones, que para su mejor interpretación se dividió en cuatro estados, donde para cada uno se encontró el valor correspondiente a la entalpía y entropía, teniendo en cuenta las propiedades termodinámicas del fluido de trabajo, las cuales el software ya trae por defecto.

```

"Datos de entrada"
T1=43,8[C]
P1=10[bar]
P2=0,65[bar]
nt=0,9
nb=0,8
x=0
mfs=0,5014 [Kg/s]

"Estado 1"
h1=Enthalpy(Isobutane;P=P1;T=T1)
s1=Entropy(Isobutane;P=P1;T=T1)

"Estado 2"
s1=s2
h2=Enthalpy(Isobutane;P=P2;s=s2)
h2r=h1-nt*(h1-h2)

"Estado 3"
P3=P2
h3=Enthalpy(Isobutane;P=P3;x=x)
s3=Entropy(Isobutane;P=P3;x=x)

"Estado 4"
v=Volume(Isobutane;P=P3;x=x)
P4=P1
h4=h3+v*(P4-P3)*100
h4r=h3-((h3-h4)/nb)
T4=Temperature(Isobutane;h=h4;P=P4)
s4=Entropy(Isobutane;T=T4;P=P4)

Wt=(h1-h2r)
Wb=(h4r-h3)
Pt=mfs*(h1-h2r)
Pb=mfs*(h4r-h3)
Pn=Pt-Pb
np=(1-((h2-h3)/(h1-h4)))^100

```

Figura 20. Modelo matemático del Ciclo Rankine en el software EES
Realizado por: Autora

Con el modelo digitado en la ventana de ecuaciones se procede a que el software calcule cada una de las variables que se desconocen, teniendo en cuenta que el valor de la **Potencia Neta** (P_n) y el **Rendimiento Térmico** (n_p), son los parámetros que permiten interpretar la cantidad de energía que se puede producir a partir de la implementación del Ciclo Rankine, para el aprovechamiento de la energía geotérmica disponible en la fuente termal Aguacaliente.

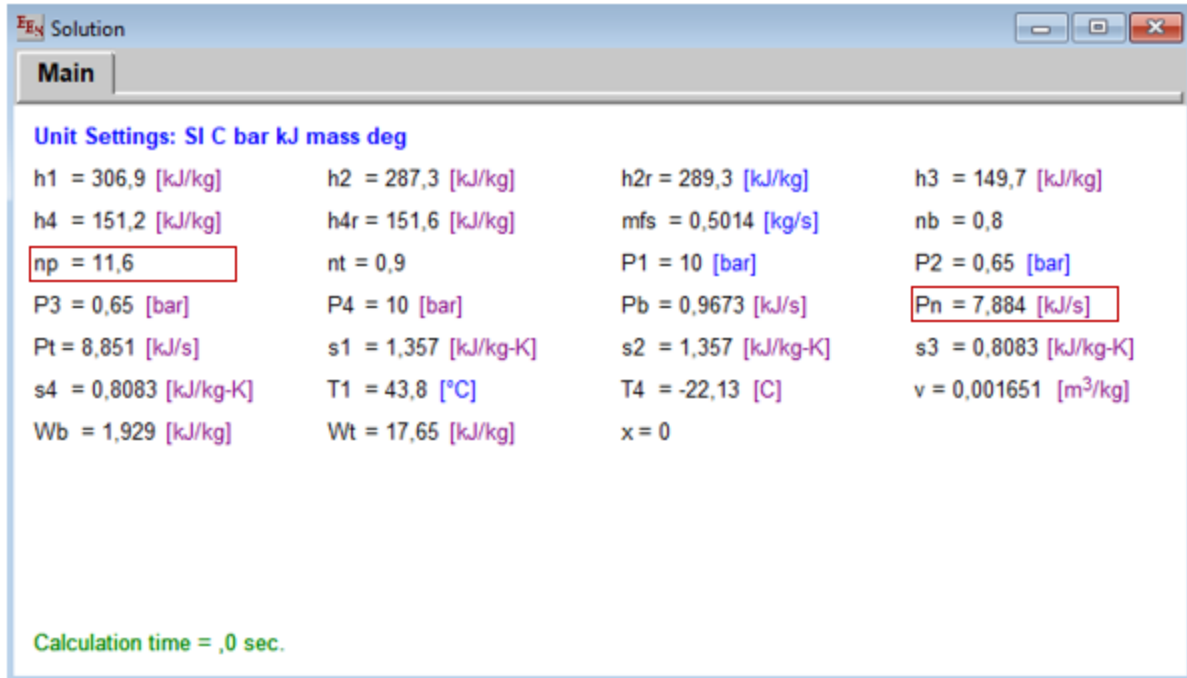


Figura 21. Resultados del modelo matemático del Ciclo Rankine en el software EES
Realizado por: Autora

La potencia neta (P_n) se define como la potencia generada en las turbinas, menos el calor para generación, que incluye la potencia utilizada para el accionamiento de las bombas (Matamala-Avilés, 2014), para el caso del presente trabajo este valor fue de $7,884 \frac{kJ}{s} \approx 7,9 kW$ y se estableció que el tiempo de funcionamiento del ciclo será de 12 horas (t), teniendo en cuenta el periodo de operación del lugar, el cual es de 9 a.m. a 9 p.m. Para el cálculo de la energía producida en un día, se tienen en cuenta los dos datos mencionados anteriormente, es decir que esta es igual a:

$$E = P_n * t = 7,9kW * 12h = \mathbf{94,8kWh} \text{ (Ecuación 17).}$$

El rendimiento térmico (n_p) del Ciclo Rankine resultante del diseño del modelo ejecutado el software, fue de **11,6%** lo que muestra una eficiencia aceptable de calor transformado a partir de la combustión relacionada con el rendimiento mecánico de los componentes del ciclo. Se establece que, para mejorar este valor, se puede incrementar la presión de operación de la caldera y automáticamente se eleva la temperatura a la cual tiene lugar la ebullición; esto produce un aumento de la temperatura promedio a la que se añade calor al vapor y, por tanto, mejora el rendimiento térmico del ciclo. Para explicar lo anterior, Cerrada-Galán (2020) menciona que

al aumentar la presión en la caldera produce un vapor más pesado, energéticamente hablando, debido a que su entalpía se incrementa en el estado 1, por lo que la diferencia de entalpías entre 1 y 4 se hace más alta, disminuyendo el cociente de entalpías anterior y aumentando el rendimiento térmico del ciclo. (p.16)

7.3. Establecer las posibles aplicaciones o usos, para el correcto aprovechamiento de la energía geotérmica disponible en la finca.

Los recursos geotérmicos de baja temperatura, presentan diferentes limitantes para su aprovechamiento y explotación comercial, que consecuentemente se traducen en una deficiente investigación geológica de estas manifestaciones. En primer lugar, es importante resaltar que estas fuentes no contienen vapor de agua, solo proporcionan calor localizado y a una distancia de pocos kilómetros del yacimiento del que se extrae el agua. En segundo lugar existe una alta probabilidad de que en los acuíferos profundos, existan altas concentraciones de sales, que para preservar las dinámicas existente sea necesario reinyectar el agua de nuevo al sistema (Llopis-Trilla & Rodrigo-Angulo, 2008); estas dos condiciones propician que, aunque sus alternativas de utilización sean amplias, como se evidencia en la **Figura 22**, en la actualidad solo se emplean para los sistemas de calefacción urbana, establecimientos de baños termales y algunos cultivos.

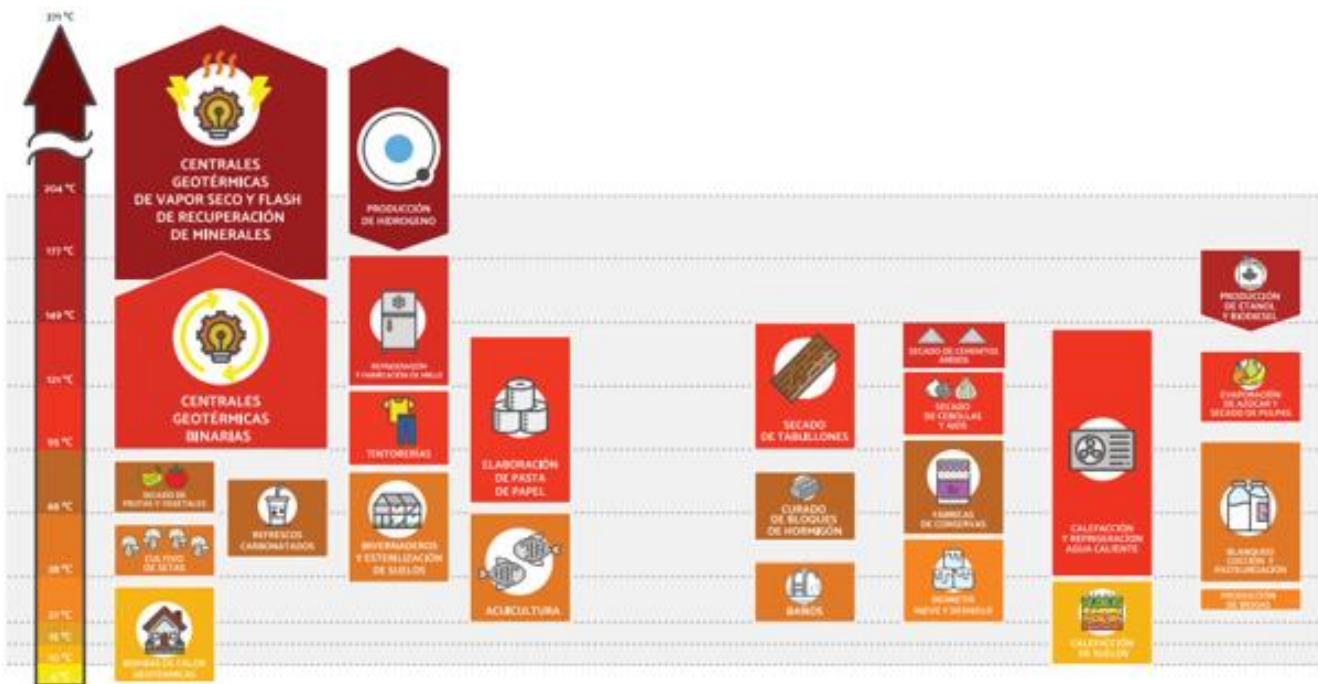


Figura 22. Usos típicos de la Energía Geotérmica a diferentes temperaturas.




Tomado de: (Servicio Geológico Colombiano, 2019)




Autores como Sanchez-Guzmán *et al.* (2011), dicen que la utilización del Ciclo Rankine para la producción de energía eléctrica en yacimientos de baja temperatura, presentan costes altos y eficacias bajas en la conversión de calor a electricidad. En los casos donde se implementa este sistema, la potencia de las unidades producidas varía desde 250 kW hasta 130 MW y cabe citar como ejemplo una de las unidades pequeñas de la compañía Ormat Technologies Inc., instalada en Tailandia, que utiliza fluidos geotérmicos a unos 49°C.

A partir de los resultados obtenidos en el objetivo anterior se estimó la cantidad de energía producida al mes, donde se toma la cantidad generada en un día que es igual a 94,8 kWh y se multiplica por los 30 días de un mes, para un total mensual de 2.844 kWh. Adicional a lo anterior, se tuvo acceso a la

facturación del periodo de enero a marzo, donde en la sección de determinación del consumo se muestra un valor de 867 kWh (Anexo 4), es decir que esa cantidad es la demandada por el funcionamiento del lugar en un intervalo de tres meses, esta se puede satisfacer con la energía generada por la puesta en marcha del Ciclo Rankine en solo un mes. En temporadas altas, el consumo registrado ha alcanzado los 1.014 kWh y el promedio calculado por la empresa de energía es de 337 kWh. Para la estimación de las tarifas del servicio, EBSA tiene en cuenta la generación, transmisión, distribución, comercialización, pérdidas y restricciones, para así definir un costo unitario por kWh de \$688,16. En seguida se realizó la identificación de los componentes que están directamente conectados a la red eléctrica y a partir de la cantidad, potencia y tiempo de uso, se estableció el consumo mensual en kWh de cada uno. En la siguiente tabla se resumió lo encontrado en las diferentes visitas, con el fin de hacer una aproximación basada en la observación y los valores de potencia suministrados por algunos fabricantes.

Tabla 8. Consumo mensual de los componentes conectados a la red eléctrica.

Componente	Cantidad	Potencia (kW)	Tiempo de uso al día (h)	Consumo mensual (kWh)
Congelador horizontal 	1	0,6	8	144
Nevera industrial horizontal 	1	0,805	8	193,2
Consola de sonido 	1	0,25	10	75

Bombillas incandescentes		5	0,06	4	36
Lámpara LED		6	0,08	4	57,6
Reflector LED		2	0,1	4	24
Total consumido (aproximación)					529,8

Realizado por: Autora

(Para el tiempo de uso en el día se hizo una estimación de acuerdo a lo evidenciado con las visitas, claro está que éste varía según la temporada y la cantidad de visitantes que se tengan. Es importante resaltar que los componentes mostrados en la Tabla 8 solo corresponden al establecimiento.)

La implementación de proyectos para la generación de energía eléctrica a esta escala, presenta varios obstáculos relacionados a los altos costos de inversión y a la poca información disponible para la etapa de exploración, que lleva a pensar a las poblaciones desde un contexto del desconocimiento, en los posibles impactos asociados a la operación. En el trabajo de Chaparro-Guevara (2018), se realizó un primer diagnóstico de las alternativas para el aprovechamiento del potencial energético disponible en las fuentes termales de acuerdo a la percepción de las comunidades, donde se pudo evidenciar que el turismo no es bien recibido, y se manifiesta que el beneficio se encuentra privado y para unos pocos. Es por esto que se establecieron algunos indicadores iniciales, lo cuales son: la valoración del sistema hídrico, territorial, social y ecológico, que en conjunto permiten una aproximación a los impactos que se generan con la ejecución. Para el caso específico del trabajo desarrollado en Paipa, se mencionó que las alternativas agropecuarias representan una viabilidad alta, teniendo en cuenta la caracterización de las actividades del territorio, también se identificaron como alternativas más favorables el pago por Servicios Ambientales y cultivos de organismos termofílicos, esto no quiere decir que sean las únicas teniendo en cuenta que se deben generar estudios de prefactibilidad.

En el caso de la fuente termal Aguacaliente se propone que más adelante se realice un diagnóstico de las alternativas que presentan una alta viabilidad según la percepción de la comunidad local y el concepto técnico de las autoridades, como la alcaldía municipal y CORPOCHIVOR, quienes cuentan con las herramientas para este tipo de investigaciones. Por otra parte, el turismo es la actividad que se ha desarrollado durante los últimos diez años, es por esto que se propone continuar con la misma, desde un enfoque sostenible de alta calidad ambiental, lo cual repercutiría en beneficios económicos para el municipio y ecológicos en términos de la conservación del paisaje. Adicionalmente en el trabajo de Chaparro-Guevara (2018) se menciona que un aprovechamiento que se le puede dar a este recurso es el calentamiento de galpones, que para el caso del presente trabajo también se considera como una alternativa, puesto que se encontró que según el censo pecuario de 2016 (Hernández & Alarcón, 2017), el municipio de Pachavita contaba con un total de aves igual a 48.000, distribuidas en cuatro predios avícolas, en los que se resalta la avícola Los Cambulos ubicada en la vereda Hato Grande (Alcaldía Municipal de Pachavita, 2020).

Los resultados obtenidos de la caracterización fisicoquímica realizada en campo, fueron comparados con la información facilitada en la aplicación de INVTERMALES del Servicio Geológico Colombiano, donde en el histórico de mediciones se muestra que la última fecha de toma de datos se dio el día 20 de marzo del año 2010 y se reportó una temperatura de 37,3°C, un pH de 6,70 y una conductividad eléctrica de 732 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Alfaro, 2015; Servicio Geológico Colombiano, n.d.). En relación con los resultados obtenidos en campo, gracias a la realización del presente trabajo, el único parámetro en el que no se dio una variación significativa fue el de pH, que para la medición realizada el día 26 de marzo del 2022 el valor reportado fue igual a 6,78. Por otra parte, el valor de la temperatura si presentó un aumento notable en comparación a las mediciones registradas en la aplicación, dando como resultado una diferencia de 6,5°C en un periodo de doce años. Es importante mencionar que las entidades especializadas en estas temáticas deben actualizar de forma constante esta información, con el fin de que la comunidad científica pueda trabajar con datos actualizados, que permitan la generación de nuevos proyectos que amplíen la oferta energética del país.

Aunque autores como Sanchez-Guzmán et al. (2011) mencionan que la implementación de ciclos binarios en fuentes termales de baja temperatura no es eficiente, los estudios técnicos preliminares podrán definir si esto es cierto o no, este tipo de tecnologías son empleadas a nivel mundial y su ejecución a representado grandes beneficios para los territorios, preparando a las comunidades frente a los retos de un crecimiento exponencial de la población. Dentro de las ventajas del Ciclo Rankine, se tiene que es un sistema de bajo mantenimiento, compacto, poco ruidoso y no genera emisiones directas; como desventajas se menciona que este tipo de sistemas se deben diseñar de acuerdo a las condiciones de aplicación, es decir que no existe un equipo estándar para la implementación e instalación de los mismos (Amat-Albuixech, 2017). Para el funcionamiento de dicho ciclo se hace necesario emplear un fluido secundario que permita aprovechar de manera eficiente la energía del agua termal y para el caso preciso del presente trabajo de grado, se tuvieron en cuenta las propiedades termodinámicas del Isobutano al momento del modelamiento en el software EES. Se seleccionó este fluido de trabajo teniendo en cuenta las propiedades que se señalan en la **Tabla 1**, donde ambientalmente el uso de hidrocarburos reduce la cantidad de gases con potencial de agotamiento de la capa de ozono (ODP) y potencial de efecto invernadero (GPW), esto a comparación de los gases refrigerantes que si poseen valores significativos; los problemas asociados al uso de hidrocarburos está relacionado al riesgo ocupacional con el manejo de

los mismos, al ser altamente inflamables pueden causar afectaciones en caso de fugas o eventos de ignición (Hernández-Fernández et al., 2020).

Dentro de los retos que presenta el desarrollo de la energía geotérmica en el país, se encuentran el desconocimiento de las comunidades indígenas y en general sobre las características de estas tecnologías, las zonas potenciales para la geotermia se encuentran en territorios de gran importancia ambiental o que su valor se encuentra relacionado a la productividad del campo. El aprovechamiento de los recursos geotérmicos en la generación de energía, permite explorar de manera simultánea, la posibilidad de otros usos como la agricultura, acuicultura, calefacción, extracción de minerales, recreación y turismo (Marzolf, 2015). Por otro lado, actualmente en Colombia no se cuentan con mecanismos de financiación que respalden los riesgos de manera parcial o total en la fase de exploración, lo que no permite la inversión extranjera como se da en otros países a nivel mundial, también al ser tecnologías relativamente nuevas los costos asociados son bastante elevados y limitan la competitividad con energías alternativas tales como la hidroeléctrica, donde los gobiernos han enfocado sus políticas, destinando grandes fondos monetarios para la realización de estos proyectos (Sánchez-Alvarado et al., 2020).

8. Conclusiones

El presente trabajo de investigación se consideró como una primera aproximación a la implementación de ciclos binarios, para el aprovechamiento y generación de energía a partir de fuentes termales de baja temperatura en la región geográfica del Valle de Tenza. El desarrollo del mismo, permitió analizar el territorio de la finca de manera integral, teniendo en cuenta el contexto actual y el desconocimiento que existe sobre la disponibilidad de estos recursos energéticos en la región. Durante el proceso investigativo que se llevó a cabo, se conocieron diferentes tecnologías empleadas a nivel mundial para la transformación de esa energía disponible en las formaciones geotérmicas.

La fuente termal Aguacaliente es de origen telúrico, lo que quiere decir que la temperatura de sus aguas está relacionada a la infiltración y percolación de las mismas hasta el interior de la corteza terrestre, esto se da gracias a las fisuras y fracturas en las rocas presentes en el sistema geotérmico. La temperatura promedio obtenida a partir de la evaluación en campo durante cuatro meses, fue de **43,8°C**, lo que clasifica esta fuente como de baja temperatura. En los parámetros fisicoquímicos evaluados con el multiparámetro, se identificó un pH de **6,78** que es considerado como neutro y se asocia a la presencia de **bicarbonatos** (HCO_3) como se comprobó con el Diagrama triangular Cl - HCO_3 - SO_4 , donde también se interpretó que estas aguas poseen una muy baja cantidad de sulfatos, lo cual se manifiesta en campo con un olor imperceptible a azufre, una característica importante en las aguas altamente sulfatadas; lo anterior también se apoya en el resultado obtenido en el parámetro de salinidad, donde según el Diagrama de Stiff, en la fuente evaluada, predomina los aniones de HCO_3 sobre los de Cl y SO_4 .

Con el valor de la temperatura promedio como uno de los valores de entrada, se comenzó a modelar el Ciclo Rankine en el software EES teniendo en cuenta el trabajo realizado por Peralta-Quilla & Miranda-Rodríguez en 2017. Como fluido secundario se eligió el Isobutano, teniendo en cuenta sus propiedades termodinámicas favorables y finalmente se obtuvo una potencia neta del ciclo cerrado igual a **7,9 kW** y un rendimiento térmico de **11,6%**. En base al resultado correspondiente a la potencia y conociendo las horas de operación del lugar, se calculó la energía producida en un día gracias al funcionamiento de esta tecnología en la finca, la cual es igual a **94,8 kWh**.

Para establecer si la cantidad de energía producida por el ciclo fue suficiente para reemplazar el consumo relacionado a la red eléctrica que abastece la región, se obtuvo que en un mes de operación de 30 días, el funcionamiento del ciclo es capaz de producir **2.844 kWh** de energía, lo cual supera el consumo en un periodo de tres meses en la temporada alta de mediados de septiembre hasta la mitad del mes de diciembre, puesto que según lo evidenciado en la factura correspondiente a estos meses el valor fue de **1.014 kWh**. Es decir, que teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, con el funcionamiento del Ciclo Rankine en solo un mes, se llega a cubrir con la demanda de tres meses, lo cual demuestra que la implementación de este proyecto cumple con las expectativas. Uno de los problemas para la ejecución, se centra en la inversión inicial que se debe realizar, haciendo referencia a los estudios de la línea base que permitan asegurar las condiciones óptimas, por otro lado, el diseño y construcción del sistema, que implican una serie de conceptos técnicos soportados en investigaciones y proyectos ya ejecutados.

La caracterización de las fuentes termales es de gran importancia en el país, porque permite conocer el potencial de estas manifestaciones para la generación de energía limpia, contribuyendo de manera sustancial al desarrollo sostenibles de los territorios rurales, sin afectar en gran medida su entorno; abriendo una visión técnica y soportada para la generación de electricidad, satisfaciendo la demanda energética creciente, que la canasta actual no podrá soportar en un futuro. Cuando se entablaron conversaciones con el administrador y trabajadores del lugar, demostraron no tener conocimiento sobre la generación de Energía Geotérmica a partir de estas manifestaciones, es decir que, por el desconocimiento, no se presentan propuestas de desarrollo en relación con el recurso; ese mismo desconocimiento se traduce en obstáculos para proyectos que posiblemente beneficien al municipio y mejoren la calidad de vida.

9. Recomendaciones

Se debe continuar con este tipo de investigaciones con el fin de generar un primer acercamiento a la gestión sostenible de los recursos geotérmicos disponibles en la región, puesto que gracias al aplicativo de INVTERMALES del Servicio Geológico Colombiano, se pudo identificar que en el departamento de Boyacá existen una gran cantidad de manifestaciones termales, que pueden ser empleadas para la generación de energía nivel local y para el beneficio de las comunidades rurales.

Por otra parte, se recomienda hacer un análisis de alternativas para identificar las posibles actividades para el aprovechamiento del potencial geotérmico de la fuente Aguacaliente, teniendo en cuenta que el turismo realizado en estos lugares resulta deficiente e insostenible en términos ambientales y actualmente existen otro tipo de alternativas, con menor impacto y mayor beneficio socioeconómico, que también se pueden desarrollar teniendo en cuenta las realidades del territorio y los posibles retos que se puedan generar en el futuro.

Es importante que la Autoridad Ambiental con jurisdicción sobre el territorio, se involucre de manera directa y participativa en la identificación de los posibles proyectos de energías alternativas que se pueden desarrollar en relación con los recursos energéticos disponibles. Para lo anterior, es necesario que este tipo de entidades capaciten al personal en estos temas, con el fin de generar una línea base que facilite realizar los estudios respectivos a la exploración, con el objetivo de mejorar la canasta energética y enfrentar así la demanda asociada al crecimiento poblacional por el que atraviesa la región.

Por último, es necesario que se dé un levantamiento cartográfico geológico, geomorfológico y estructural, más detallado en la región, puesto que la información existente se encuentra desactualizada

e incompleta, lo que limita muchas veces la generación de nuevos conocimientos y proyectos. Gracias a la bibliografía consultada se pudo establecer que la fuente termal en cuestión es de origen telúrico, que posiblemente está asociada a una falla presente en la cuenca sedimentaria asociada al sistema geotérmico, pero cuando se revisó la información disponible en los sistemas de información se encontró que no existe este fenómeno geológico, lo cual es contradictorio con lo observado en la vista acompañada por el director.

10. Referencias Bibliográficas

- Abril-Castiblanco, M. Á. (2017). *Estudio sobre la generación de Energía Geotérmica para su aprovechamiento en el sector de la construcción y de la construcción y las cimentaciones*. <http://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4472/Abrilmiguel2017.pdf?se>
- Alcaldía Municipal de Pachavita. (2020). *Plan de Desarrollo Territorial 2020 - 2023. Unidos por Nuestra Tierra*. https://drive.google.com/file/d/1_-hrb9QHmo9DQ0ltyHZyBZODiMDxfjQi/view
- Alfaro, C. (2015). Improvement of Perception of the Geothermal Energy as a Potential Source of Electrical Energy in Colombia, Country Update. In *Proceedings World Geothermal Congress*. <https://pangea.stanford.edu/ERE/db/WGC/papers/WGC/2015/01005.pdf>
- Alfaro, C., Aguirre, A., Bernal, N. F., & Gokcen, G. (2003). *Inventario de fuentes termales del departamento de Cundinamarca*. <http://recordcenter.sgc.gov.co/B3/12006000002744/documento/pdf/0101027441101000.pdf>
- Amat-Albuixech, M. (2017). *Desarrollo de un modelo de ciclo orgánico Rankine. Ejemplo de aplicación para análisis de fluidos de trabajo de bajo potencial de efecto invernadero*. http://repositori.uji.es/xmlui/bitstream/handle/10234/170068/TFM_2017_AmatAlbuixechMarta.pdf?sequence=1
- Bertani, R. (2015). Geothermal Power Generation in the World 2010-2014 Update Report. *Proceedings World Geothermal Congress*, 19–25.
- Cadena, Á. (2008). Fuentes energéticas alternativas. *Revista de Ingeniería*, 28. http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0121-49932008000200009
- Cadena, Á., Cadena, Á. I., Botero, S., Táutiva, C., Betancur, L., & Vesga, D. (2009). “Regulación para incentivar las energías alternas y la generación distribuida en Colombia” - Conclusiones. *Revista de Ingeniería*, 0(28), 90–98. <https://doi.org/10.16924/riua.v0i28.270>
- Caldiño-Herrera, U., García, J. C., Sierra-Espinosa, F. Z., & Dávalos, J. O. (2017). *Diseño termodinámico de un ciclo Rankine orgánico para el aprovechamiento energético de aguas termales*. http://somim.org.mx/memorias/memorias2017/articulos/A4_86.pdf
- Carbon Trust. (2015). *Análisis Económico y Evaluación Costo Beneficio de los Mecanismos, Herramientas y Estrategias para la Promoción de FNCER en Colombia*. <http://rirc.itiud.org/Documents/1589246701.pdf>
- Cárcamo-Palencia, E. A., & Rivera-Calderón, A. J. (2016). *Diseño conceptual de un sistema híbrido integrado de simple flash - binario para una planta geotérmica*. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/12726/1/Proyecto%20Graduacion%20Flash%20Binario%20Integrado.pdf>
- Cerpa-Londoño, A. C. (2018). *Caracterización del potencial geotérmico a partir de análisis geoquímicos de fuentes termales, en el Volcán Cerro Machín, Colombia*. [Universidad EIA]. <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2250>
- Chaparro-Guevara, M. J. (2018). *Diagnóstico ambiental de alternativas para el aprovechamiento del potencial geotérmico del paisaje salino en la vereda La Esperanza, Paipa -Boyacá*.

- https://repositorio.unbosque.edu.co/bitstream/handle/20.500.12495/3314/Chaparro_Guevara_Mar%C3%ada_Juliana_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Colmenar-Santos, A., Folch-Calvo, M., Rosales-Asensio, E., & Borge-Diez, D. (2015). The geothermal potential in Spain. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 56, 865–886.
<https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.11.070>
- Congreso de Colombia. (1993). *Ley 99 de 1993*.
https://www.mininterior.gov.co/sites/default/files/dacn_ley_99_de_1993_0.pdf
- Congreso de Colombia. (2001). *Ley 697 de 2001*.
<https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/reglamentacion/ley-697-2001.pdf>
- Congreso de Colombia. (2014). *Ley 1715 de 2014*.
https://www.upme.gov.co/Normatividad/Nacional/2014/LEY_1715_2014.pdf
- Consorcio Energético CorpoEma. (2010). *Plan de Desarrollo para las Fuentes No Convencionales de Energía en Colombia (PDFNCE)*.
http://www.upme.gov.co/Sigic/DocumentosF/Vol_1_Plan_Desarrollo.pdf
- Corpochivor. (2020). *Plan de Acción Cuatrienal 2020-2023*. <https://www.corpochivor.gov.co/wp-content/uploads/2021/02/CORPOCHIVOR-PLAN-DE-ACCION-CUATRIENAL-2020-2023-V.-14-05-2020-Aprobado.pdf>
- Dávila-Newman, G. (2006). El razonamiento inductivo y deductivo dentro del proceso investigativo en ciencias experimentales y sociales. *Laurus*, 12, 180–205.
- Departamento Nacional de Planeación. (2019). *Energía asequible y no contaminante*.
<https://www.ods.gov.co/es/objetivos/energia-asequible-y-no-contaminante>
- Farietta-Jiménez, K. (2014). Políticas públicas en Colombia de Generación distribuida en nuevas Fuentes energéticas: El Caso de la Geotermia y las Zonas no interconectadas. [Universidad Santo Tomás de Colombia]. In *Via Inveniendi et Iudicandi* (Vol. 8, Issue 2).
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.15332/s1909-0528.2013.0002.07>
- Fiter, J., & Sánchez, L. (2012). *Aplicación del Ciclo Orgánico de Rankine para el aprovechamiento de calor residual en una refinería*. http://oa.upm.es/15019/1/PFC_Laia_Sanchez_Junco_Fiter.pdf
- Giraldo, M., Vacca Ramírez, R., & Quintanilla, A. U. (2018, February 24). Las Energías Alternativas ¿Una oportunidad para Colombia? *Punto de Vista*.
<https://doi.org/https://doi.org/10.15765/pdv.v9i13.1117>
- Giraldo-Ocampo, D. (2017). *El marco normativo de las energías alternativas en Colombia no garantiza su pleno desarrollo*.
<https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/16221/DanielFelpeGiraldoOcampo2017.pdf;jsessionid=4C9EAECD97A9FC9ABA08B97141C19470?sequence=1>
- Gischler, C., Perks, M., Gonzáles, C., Correa, C., Aragón, R., Haratsu, M., García-Fernández, J., & Siroit, G. (2020). *Capturando el potencial geotérmico en América Latina y El Caribe: Una perspectiva del camino a seguir | Publications*.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Capturando-el-potencial-geotermico-en-America-Latina-y-El-Caribe-Una-perspectiva-del-camino-a-seguir.pdf>
- González-Velasco, Jaime. (2012). *Energías renovables*. Editorial Reverté. <https://elibro-net.ezproxy.unbosque.edu.co/es/ereader/unbosque/46748>
- Grupo de Investigación Xué, & Semillero de Investigación Barión. (2020). *Geotermia en la Región Central*. <https://regioncentralrape.gov.co/wp-content/uploads/2020/04/GEOTERMIA-EN-LA-REGION-CENTRAL.pdf>
- Hernández, B., & Alarcón, E. (2017). *POMCA Río Garagoa*. <https://www.corpochivor.gov.co/wp-content/uploads/2015/11/4.2.-Sociecon%C3%B3mico-V4.pdf>

- Hernández-Fernández, N. J., Zumalacárregui, L., & Pérez-Ones, O. (2020). Simulación de condiciones de operación y fluidos de trabajo para ciclos Rankine orgánicos. *Revista de Investigación Desarrollo e Innovación*, 10, 349–358.
https://revistas.uptc.edu.co/index.php/investigacion_duitama/article/view/10213/9004
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, M. del P. (2014). *Metodología de la Investigación* (Sexta). Mc Graw Hill. <http://observatorio.epacartagena.gov.co/wp-content/uploads/2017/08/metodologia-de-la-investigacion-sexta-edicion.compressed.pdf>
- Hiriart Le Bert, G. (2011). *Evaluación de la Energía Geotérmica en México*.
<https://www.cre.gob.mx/documento/2026.pdf>
- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, & Instituto Geológico y Minero de España. (2008). *Manual de Geotermia*.
- Joquera, C. (2018, June 20). *Piensa en Geotermia*. La Energía Geotérmica y Su Papel Clave Para Europa - Séptimo Informe Anual Del Mercado Geotérmico de EGEC.
<https://www.piensageotermia.com/la-energia-geotermica-y-su-papel-clave-para-europa-septimo-informe-anual-del-mercado-geotermico-de-egeg/>
- Llopis-Trilla, G., & Rodrigo-Angulo, V. (2008). *Guía de la Energía Geotérmica*.
<https://www.fenercom.com/wp-content/uploads/2008/01/Guia-de-la-Energia-Geotermica-fenercom-2008.pdf>
- Martínez-Martínez, J. A. (2021). *Marco Jurídico sobre la generación de Energía Geotérmica en Colombia*.
<https://repository.javeriana.edu.co/bitstream/handle/10554/56109/%282%29%20Marco%20Jur%20C3%ADdico%20Sobre%20la%20Generaci%20C3%B3n%20de%20Energ%20C3%ADa%20Geot%20C3%A9rmica%20en%20Colombia.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Marzolf, N. C. (2015). *Emprendimiento de la energía geotérmica en Colombia*.
<https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Emprendimiento-de-la-energía-geotérmica-en-Colombia.pdf>
- Ministerio de Minas y Energía. (2003). *Decreto 3683 de 2003*.
https://www.redjurista.com/Documents/decreto_3683_de_2003_presidencia_de_la_republica.aspx#/
- Montalvo-Bonilla, V. (2016). *Suministro de Energía para las Zonas Rurales de Colombia*.
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/15744/u729099.pdf?sequence=1>
- Ortiz-Motta, D. C., Sabogal-Aguilar, J., & Hurtado-Aguirre, E. (2012). Una revisión a la reglamentación e incentivos de las energías renovables en Colombia. *Rev.Fac.Cienc.Econ*, XX(2), 55–67.
- Peralta-Quilla, R., & Miranda-Rodríguez, R. E. (2017). *Análisis de estudio de la energía geotérmica de las aguas termales de Putina empleando isobutano para la generación de energía eléctrica para la localidad de Putina*.
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/5722/Peralta_Quilla_Ronald_Miranda_Rodriguez_Rolando_Efrain.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Philippe, D., Angelino, L., Latham, A., & Pinzuti, V. (2013). *Developing geothermal district heating in Europe*. http://geodh.eu/wp-content/uploads/2012/07/GeoDH-Report-2014_web.pdf
- Picó-Heras, S. (2002). *Desarrollo e implantación de energías renovables: situación actual y tendencias*. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/3428>
- Presidencia de la República. (1974). *Decreto 2811 de 1974*.
- Presidencia de la República. (1991). *Constitución Política de Colombia 1991*.

- Prol-Ledesma, R. M. (1996). El calor de la Tierra. In *El calor de la Tierra*. FONDO DE CULTURA ECONÓMICA.
<http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/058/htm/tierra.htm>
- Rico, G. (2018, June 6). *Hidroeléctricas en Colombia: entre el impacto ambiental y el desarrollo*.
<https://es.mongabay.com/2018/06/hidroelectricas-colombia-hidroituango/>
- Sánchez-Alvarado, E. J., León-Gómez, S. T., & Vargas-Soto, C. A. (2020). *Análisis del caso de éxito del proyecto de transformación energética de Islandia*.
<https://repository.ean.edu.co/bitstream/handle/10882/10351/VargasCarlos2020.pdf;jsessionid=AC2D83570678872145B69BDA18B43C25?sequence=1>
- Servicio Geológico Colombiano. (n.d.). *Inventario Nacional de Manifestaciones Hidrotermales*. Retrieved May 29, 2021, from <http://hidrotermales.sgc.gov.co/>
- Servicio Geológico Colombiano. (2019a). *Geotermia en Colombia*.
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/geotermia-en-colombia.pdf>
- Servicio Geológico Colombiano. (2019b). *¿Qué es Exploración Geotérmica?*
<https://www2.sgc.gov.co/Publicaciones/Cientificas/NoSeriadas/Documents/Geotermia-exploracion.pdf>
- Servicio Geológico Mexicano. (2017, March 22). *Geotermia*.
https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Geotermia.html
- Tapia-Huacoto, E. J. (2016). *Caracterización geonérgica de fuentes termales: Pasanacollo, Acora, Ollachea, Cuyo Cuyo, Loripongo y Puente Bello*.
http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/2881/Tapia_Huacoto_Edith_Jhovana.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2010). *Programa de uso racional y eficiente de energía y fuentes no convencionales - PROURE*.
<https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/MarcoNormatividad/plan.pdf>
- Unidad de Planeación Minero Energética. (2019). *Plan Energético Nacional*.
https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf
- UPME. (2015). *Integración de las energías renovables no convencionales en Colombia*.
https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/INTEGRACION_ENERGIAS_RENOVANLES_WEB.pdf
- YSI incorporated. (n.d.). *Manual de Operaciones*. Retrieved April 7, 2022, from
<https://www.ysi.com/File%20Library/Documents/Manuals%20for%20Discontinued%20Products/31178-Spanish-YSI-Model-63-Operations-Manual-RevC.pdf>

11. Anexos

11.1. Anexo 1. Plan de Trabajo

	Fases	Actividades	Resultados
<p>Identificar las características fisicoquímicas de la fuente termal Aguacaliente y las socioeconómicas de la finca.</p>	<p>1</p>  <p>Caracterización in situ de la fuente termal y la finca</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Delimitación del área de estudio • Diseño de de la entrevista dirigida al propietario • Muestreo en campo • Análisis observacional • Clasificar la fuente termal, en base a los parámetros evaluados 	<ul style="list-style-type: none"> • Caracterización fisicoquímica preliminar • Valor de la temperatura media • Contextualización de la finca y sus dinámicas • Tipo de fuente termal • Identificación de los factores que inciden en el fenómeno estudiado
<p>Estimar la cantidad de energía eléctrica producida, a partir de la aplicación del modelo del Ciclo Rankine en el software EES.</p>	<p>2</p>  <p>Modelación matemática del Ciclo Rankine</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Establecer el fluido de trabajo y sus respectivas propiedades termodinámicas • Esquematizar el modelo teniendo en cuenta cada uno de los estados • Digitar cada una de las ecuaciones en el software • Calcular la potencia y el rendimiento térmico del sistema 	<ul style="list-style-type: none"> • Fluido termodinámico con mejores propiedades termodinámicas • Valor de la potencia y porcentaje de rendimiento térmico • Cantidad de energía producida de acuerdo a los periodos de operación
<p>Establecer las posibles aplicaciones o usos, para el correcto aprovechamiento de la energía geotérmica disponible en la finca.</p>	<p>3</p>  <p>Reconocimiento de los usos de la fuente termal</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Estimar la cantidad de energía mensual, que se produciría con el funcionamiento del ciclo • Identificar los elementos que consumen energía dentro del establecimiento • Proponer las actividades en las que se puede aprovechar el potencial de la fuente 	<ul style="list-style-type: none"> • Posibles aplicaciones según el potencial de la fuente • Valor de la energía resultante de un mes de operación del sistema • Considerar si la cantidad de energía producida es suficiente para suplir la demanda del establecimiento • Establecer las posibles alternativas de aprovechamiento, de acuerdo a las características de la región

11.2. Anexo 2. Entrevista – Caracterización socioeconómica de la finca

Nombre de la Finca:

- ¿En qué año se inició la operación de los termales?
- ¿Cuántos propietarios ha tenido el establecimiento?
- ¿Desde qué año adquirió el establecimiento el actual dueño?
- ¿Qué tipo de actividades se desarrollaban en la finca, antes de la realización de los termales?
- ¿Actualmente se desarrolla otro tipo de actividad diferente al turismo recreativo?
- ¿Cuál es la mejor y peor temporada para los termales?
- ¿Qué horario se tiene para el funcionamiento de las piscinas?
- ¿Cuántas personas viven en la finca?
- ¿Cuántas personas trabajan en el establecimiento?
- ¿Las personas que prestan sus servicios son de la comunidad o externos?
- ¿Cuál es el promedio de personas que visitan los termales en temporada alta y baja?
- ¿Qué tipo de usuario es el establecimiento para los cobros del servicio de energía eléctrica?
- ¿Se hace la separación de residuos sólidos en la fuente?
- ¿Qué empresa de aseo recoge los residuos sólidos resultantes de la operación del establecimiento?
- ¿Cómo fue el proceso de reforestación que se llevó a cabo en la finca?
- ¿Se ha tenido algún tipo de problema de convivencia con alguno de los vecinos?
- ¿El público que visita los termales es de la región o de otras?
- ¿Se tienen en mente otros proyectos para la ejecución dentro de la finca?
- ¿Hace falta acompañamiento por parte de la alcaldía o gobernación, para impulsar el turismo?
- ¿Se ha pensado en estrategias publicitarias para impulsar los servicios que se prestan?

11.3. Anexo 3. Memoria de cálculo digitado en el software EES.

"Datos de entrada"

T1=43,8[°C]
P1=10[bar]
P2=0,65[bar]
nt=0,9
nb=0,8
x=0
mfs=0,5014 [Kg/s]

"Estado 1"

h1=Enthalpy(Isobutane;P=P1;T=T1)
s1=Entropy(Isobutane;P=P1;T=T1)

"Estado 2"

s1=s2
h2=Enthalpy(Isobutane;P=P2;s=s2)
h2r=h1-nt*(h1-h2)

"Estado 3"

P3=P2
h3=Enthalpy(Isobutane;P=P3;x=x)
s3=Entropy(Isobutane;P=P3;x=x)

"Estado 4"

v=Volume(Isobutane;P=P3;x=x)
P4=P1
h4=h3+v*(P4-P3)*100
h4r=h3-((h3-h4)/nb)
T4=Temperature(Isobutane;h=h4;P=P4)
s4=Entropy(Isobutane;T=T4;P=P4)

Wt=(h1-h2r)
Wb=(h4r-h3)
Pt=mfs*(h1-h2r)
Pb=mfs*(h4r-h3)
Pn=Pt-Pb
np=(1-((h2-h3)/(h1-h4)))*100

11.4. Anexo 4. Facturación del servicio de energía.



EBSA
Empresa de Energía
de Boyacá S.A. E.S.P.
Pura Energía Boyacense

NIT. 891.800.219-1 www.ebsa.com.co
O.R: EBSA E.S.P. Cra 10 No.15-87 Tunja Tel 7405000
Somos Autorretenedores Res. DIAN 0547 de 2002 y grandes contribuyentes Res. 076 de 2016.
Vigilada Superservicios.

DOCUMENTO EQUIVALENTE N° 000167002545
PERIODO DEL SERVICIO 16/12/2021 - 15/03/2022
PERIODO FACTURADO ENE-2022 A MAR-2022
FECHA DE EMISIÓN 20/ABR/2022
TIPO DE FACTURA: FACTURACIÓN: Rural

CONSEJOS PARA QUE GARANTICES TU SEGURIDAD ELÉCTRICA

CONSEJOS PRÁCTICOS

Apaga de inmediato todo electrodoméstico que haga chispas y llévalo a reparación.

No tires de los cables, desenchufa adecuadamente todo aparato que estés usando.

Nunca uses herramientas o aparatos eléctricos con las manos mojadas.

Evita sobrecargar los enchufes.

Tu seguridad eléctrica también es nuestra prioridad, únete a nuestro compromiso de CERO INCIDENTES.



INFORMACIÓN CLIENTE							EVOLUCIÓN DE SU CONSUMO								
Cliente Nit. C.C.			Rural VR SUAQUIRA ABAJO			Nit. A.	Tipo	Código	DIC	SEP	JUN	MAR	DIC	SEP	Promedio
Dirección			Pachavita			Contacto AP	1	activa	1014	1012	695	818	348	126	337
INFORMACIÓN TÉCNICA							DETERMINACIÓN DE SU CONSUMO								
Cuenta		Ruta Entrega		000-00006013050			Tipo	Código	Lectura Anterior	Lectura Actual	Factor Mult.	Consumo en (KWh)	Observ. Lectura		
Estrato		Clase Servicio		Residencial			AS Contador-1	Interno	35286	36153	1	867	0		
Carga (kw)		Nivel Tensión		Secundaria											
Medidor No.		Medidor No.													
Tipo Medidor		Tipo Medidor													
Circuito		Nodo Conexión		8715											
CALIDAD DEL SERVICIO							DETALLE DE SU CUENTA								
Mes	Dia	Diam	Diug	Fiu	Fium	Fiug	Descripción	Cantidad	Periodo	Subsidio / Contribución	VALOR TOTAL				
3	.0608	0	39.59	1	0	36	1-Activa-Sencilla 130	2022/03	% 49.99	\$ 44,739					
2	.0608	0	39.59	1	0	36	1Activa-Sencilla 159	2022/03		\$ 109,417					
1	2.2338	0	39.59	4	0	36	1Activa-Sencilla 130	2022/02		\$ 44,004					
							1Activa-Sencilla 159	2022/02		\$ 107,271					
							1Activa-Sencilla 130	2022/01		\$ 43,685					
							1Activa-Sencilla 159	2022/01		\$ 105,168					
COSTO DE PRESTACIÓN DEL SERVICIO							VALOR TOTAL CONSUMO								
G	T	D	R	P	Cv	Cf	CU	VALOR (SUBSIDIO/CONTRIBUCIÓN)	% 49.99	\$ -130,724					
275.92	46.18	208.90	0.54	50.88	105.74	0.00	688.16	VALOR CONSUMO FACTURADO		\$ 454,284					
G+T+D+P+R+Cv+Cf															
INFORMACIÓN DE PAGOS							DETALLE DE LA FACTURA								
Valor Ultimo Pago			\$ 453,830			Fecha	01-ABR-22	Valor factura periodo	453,825						
Saldo esta Factura			\$ 0			Remanente Recaudado	\$ 0	Ajuste Decena	5						
Periodo Cobro:			- hasta ENE-2022			Pago Aplicado a Factura							-453830		
INFORMACIÓN SUBSIDIO FOES							VALOR TOTAL A PAGAR								
Consumo (kwh)			V/Total FOES (\$)			No. Factura		PAGO OPORTUNO ANTES DE	02/MAY/2022	\$ 0					
Valor Unitario (\$/KWh)															
INFORMACIÓN DE INTERES							DETALLE FINANCIACION								
En EBSA pensamos en el medio ambiente, por eso te invitamos a hacer uso racional de energía, apagando las luces de tu casa antes de salir, para conocer mas tips ingresa a nuestra pagina www.ebsa.com.co El valor por la prestación del servicio es de \$696.3089 por kWh, sin embargo por la aplicación de la Resoluciones CREG 058 y la 012 del 2020 el Costo Unitario aplicado a esta factura es de \$688.1566 por kWh							Descripción	Valor	Cuotas	Cuotas Cobradas	Saldo	Intereses	Periodicidad	A partir de	
Este documento es equivalente a la factura presta merito ejecutivo de conformidad con el Artículo 130 de la Ley 142 d asimila en sus defectos a la letra de cambio (Art. 774 del Código de Comercio).							DOCUMENTO EQUIVALENTE N°	000167002545							
							PERIODO FACTURADO	ENE-2022 A MAR-2022							
							PAGO OPORTUNO ANTES DE:	02/MAY/2022							
							VALOR A PAGAR	\$ 0							



EBSA
Empresa de Energía
de Boyacá S.A. E.S.P.
Pura Energía Boyacense

NIT. 891.800.219-1



(415)770999800483(8020)0785265077(3900)000000000