

Geotermia en Colombia

Julián Andrés Grisales Parra

Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación
Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales

La geotermia es el campo de la ciencia dedicado al estudio del calor existente debajo de la superficie de la tierra, puntalmente más conocido como, calor interno de la tierra, como el nombre lo dice, es una cantidad significativa de calor almacenado en el interior de esta, resultado de la formación del planeta y la descomposición de materiales radiactivos en su núcleo, este calor se transfiere gradualmente hacia la superficie terrestre. Este concepto también va acompañado del gradiente Geotérmico, se puede entender que a medida que nos alejamos de la superficie terrestre hacia el interior de la tierra, la temperatura aumenta constantemente, este gradiente geotérmico es fundamental para el aprovechamiento de la energía geotérmica (Eadic, 2022). La energía geotérmica se fundamenta en la captación del calor almacenado en el interior de la Tierra, proveniente de procesos geológicos naturales. También se conoce con el mismo nombre al proceso por el cual se extrae la energía geotérmica para su posterior uso como energía eléctrica, principalmente (IngeoExpert, 2023). Este recurso, en constante renovación, ofrece la posibilidad de generar electricidad y proveer calefacción de manera continua y con bajas emisiones de gases de efecto invernadero. Estos estudios y generación de energía eléctrica a través de la geotermia se vienen aprovechando desde hace más de un siglo, dando inicio en Italia, donde algunos experimentos iniciaron en el año 1904 y 1905. Estos experimentos dieron el paso a la primera planta geotérmica del mundo, que se construyó y se puso en marcha en el año 1913, con una capacidad de apenas 250 kW, pero para el año 1950 se alcanzaron los 300 MW en Italia. De aquí en adelante se empezó a desarrollar la generación de energía en otros países, impulsando a Nueva Zelanda a iniciar su producción de energía geotérmica en el año 1958, luego ya se empezó a desplegar esta tecnología a través del mundo (Instituto Geológico y Minero de España, 2022). En la actualidad la energía geotérmica se genera en más de 20 países, siendo Estados Unidos el mayor productor mundial, seguido por Indonesia y Filipinas (statista,2023)

GIPEM 05, diciembre (2023)
pp. 93-99
www.gipem.co/revista-gipem
gipem_fiarman@unal.edu.co
©Derechos patrimoniales
Universidad Nacional de
Colombia

Existen diferentes tipos de energía geotérmica dependiendo del tipo de recurso natural del que se extraiga (de agua caliente, pozos secos, géiseres, vapor seco), la profundidad de perforación (superficial, desde algunos metros hasta grandes profundidades por encima de 10 km) o la temperatura del agua (de alta, media, baja y muy baja temperatura), entre otros (Iberdrola, 2023). Conociendo los principios básicos mencionados anteriormente, también tenemos tipos de Energías Geotérmicas, se pueden definir por temperatura, profundidad y/o tipos de recursos naturales de extracción. De acuerdo con lo mencionado anteriormente y puntualizando los conceptos, la energía geotérmica de alta temperatura, va de la mano con la energía geotérmica de grandes profundidades, donde la temperatura es lo suficientemente elevada como para generar vapor y producir electricidad. Estos sistemas son la base de las plantas geotérmicas para la generación de energía eléctrica (Llopis Trillo & Rodrigo Angulo, 2008), Para emplear esta fuente de energía renovable es necesario profundizar en la perforación hasta los 4 o 6 km. Aquí es donde se consiguen las temperaturas más altas que pueden variar entre los 150 °C hasta valores de 400 °C. La energía geotérmica a grandes profundidades permite la producción de electricidad a mayor escala. en este caso la infraestructura de la planta eléctrica es mucho más compleja y se emplean técnicas muy similares a las que podemos ver durante la extracción de petróleo. También debemos mencionar la posibilidad de extracción de energía geotérmica en rocas calientes que pueden encontrarse en yacimientos secos de entre 5 y 8 kilómetros de profundidad hacia el interior de la tierra (Endesa, 2023). Energía geotérmica de temperatura media, va unida a la energía geotérmica de profundidad media, en este caso el nivel de perforación alcanza entre 1 y 4 km de profundidad, en esas profundidades se consiguen temperaturas entre 100 a 150 °C, En este caso ya se puede emplear la energía geotérmica para la producción de electricidad mediante el uso de turbinas de vapor (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008), y cuando se habla de la energía geotérmica de baja y muy baja temperatura, es inevitable no mencionar la energía geotérmica superficial, donde la encontramos a escasos metros de la corteza terrestre, con una perforación de apenas 150 o 200 metros, alcanzando temperaturas menores a los 100 °C, este es el tipo de energía ideal para aplicaciones de calefacción directa, como la climatización de edificios y la agricultura. De acuerdo con los diferentes tipos de energía geotérmica, también existen los tipos de procesos de explotación, los procesos más conocidos son los de extracción de vapor o agua caliente, en los sistemas de alta temperatura, se perforan pozos para extraer vapor o agua caliente desde el subsuelo. El vapor o el agua caliente extraídos son utilizados para hacer girar turbinas que, a su vez, accionan generadores eléctricos, produciendo energía eléctrica limpia y sostenible (Olade, 1980). En este contexto existen muchas formas de aprovechar el calor de la Tierra, pero la gran mayoría de la generación de electricidad con energía geotérmica se obtiene a través del aprovechamiento de sistemas hidrotermales (González, 2023).

Este recurso energético está presente en cualquier geografía, pero solo se puede aprovechar en localizaciones con unas condiciones físicas concretas. En las ubicaciones más favorables se manifiesta de forma natural mediante fuentes termales, géiseres o volcanes (Repsol Global, 2023). En el caso específico de Colombia, un país caracterizado por su riqueza geológica y diversidad climática, la exploración de la energía geotérmica se presenta como una estrategia clave para avanzar hacia un modelo energético más sostenible y resiliente, lo que añadiría una diversidad a la matriz energética del país, disminuyendo su dependencia a la energía hidráulica, pero la más importante, es disminuyendo la utilización de gases fósiles para la producción de energía. Entre las fuentes renovables, además de las de origen hidráulico, la geotérmica es la que con mayor grado de seguridad ha demostrado su factibilidad técnica y económica. Los recursos geotérmicos constituyen la energía derivada del calor que se extrae a través de los fluidos geotérmicos que surgen de procesos naturales o artificiales de acumulación y calentamiento del subsuelo (Naciones Unidas, 1998).

Bruni Sandro afirma que “No solo se trata de una tecnología limpia, renovable y de bajo impacto ambiental cuando se habla de Geotermia, sino también de una alternativa viable que favorece la diversificación de la matriz energética con una producción de energía constante e independiente de las fluctuaciones de los costos de los combustibles y de las variaciones meteorológicas (IDB, 2010). Hace tiempo la humanidad está buscando alternativas más sostenibles a las energías fósiles, mediante otras

renovables (Geotérmica, Solar y Eólica) que aprovechen los recursos que nos ofrece la naturaleza, sin perjudicarla en el proceso. Entre ellas, la geotermia destaca por ser de carácter continuo, disponible permanentemente con independencia de las condiciones meteorológicas, lo que junto a sus altas capacidades y sus múltiples localizaciones la convierten en una firme apuesta de futuro (MAPFRE, 2023). La energía geotérmica, al depender de recursos naturalmente renovables y continuos, presenta un carácter inagotable a largo plazo y/o posiblemente es un recurso completamente inagotable. Su implementación no solo contribuye a diversificar la matriz energética, sino que también reduce la dependencia de fuentes no renovables, disminuyendo las emisiones de gases de efecto invernadero y fomentando un desarrollo más sostenible y respetuoso con el medio ambiente (Unidad de Recursos Naturales & Division Medio Ambiente y Desarrollo de la CEPAL, 1995).

Retomando el título de este documento, ya conocemos la energía geotérmica de manera general, destacando su historia, principios básicos, tipos de geotermia y posibles formas de extracción, para así introducirnos en temas más específicos como lo es la geotermia en Colombia. Para introducirnos con claridad en ese tema, se tiene que revisar los informes de la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME), donde especifican con claridad cuáles son las fuentes de energía de toda la matriz energética Colombiana e informa cuales son las fuentes de energía convencionales y no convencionales, también cuales son energías renovables y cuáles no. Según la UPME, aproximadamente el 70 % de la energía eléctrica en Colombia proviene de centrales hidroeléctricas, el 29 % de combustibles fósiles (carbón, diésel, gasolina y centrales a gas) y el 1 % de otras fuentes (biomasa, eólica y solar) (UPME, 2015); estos datos ilustran la gran dependencia de Colombia de las centrales hidroeléctricas, cuyas condiciones y generación de electricidad están regidas por el clima y cuyos impactos ambientales son ampliamente cuestionados (Moreno Rendon, Lopez Sanchez, & Blessent, 2020). Un alto porcentaje de la energía eléctrica en Colombia sigue siendo generada por combustibles fósiles, y casi ninguna de la energía eléctrica proviene de energías renovables, pero según ACOLGEN, “la matriz de generación eléctrica colombiana es la sexta matriz más limpia del mundo, el 68% de la capacidad instalada es de fuentes renovables de energía eléctrica. Las empresas Asociadas a ACOLGEN, representan el 70% de la capacidad instalada del país, de la cual el 85 % son plantas de fuentes renovables”. Teniendo en cuenta esta discusión y analizando que la matriz energética colombiana es predominantemente hidráulica, lo cual se introduce en fuentes de “Energía Limpia” pero algunos ambientalistas no están de acuerdo con ese concepto por los impactos ambientales y sociales que esta tecnología produce. De acuerdo con la IHA (*International Hydropower Association*) “existen nueve aspectos clave que hay que tener en cuenta para mantener el potencial hidroeléctrico con un desarrollo sostenible en materia medioambiental, calidad del agua, erosión y transporte de sedimentos, hidrología y flujos medioambientales del río, especies endémicas y en peligro de extinción, paso de especies, plagas animales y vegetales en los embalses, aspectos sanitarios, actividades de construcción y sistemas de gestión ambiental”. Estos son los nueve aspectos que cumplir para que la energía hidroeléctrica pueda ser caracterizada completamente como una energía limpia. Mencionando todo lo que debe de cumplir la energía hidroeléctrica, da la gran oportunidad y mucha más fuerza a la geotermia definida por la UPME en la resolución 468 del 2022 como, Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER) aquellos recursos de energía renovable disponibles a nivel mundial que son ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son empleados o son utilizados de manera marginal y no se comercializan ampliamente. Se consideran FNCER la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, la geotérmica, la solar y los mares (UPME, 2022). Sabiendo esto, el protagonismo ha venido creciendo de manera exponencial, por las condiciones geográficas que Colombia les aporta a estas tecnologías (*Universidad Externado de Colombia*, 2023), Resaltando la geotermia ante las otras FNCERs por la capacidad que tiene de producir energía 24 horas al día y 7 días a la semana. Este recurso se genera y se almacena en la Tierra, proviniendo en un 20 % de la formación original del planeta y en un 80 % de la desintegración radiactiva de algunos minerales en su interior (González, 2023).

La actividad volcánica de Colombia se genera por la subducción de la placa tectónica de Nazca bajo la placa Sudamericana. Este fenómeno genera energía geotérmica, que se manifiesta en la elevada actividad

volcánica e hidrotermal en las cordilleras centrales y occidentales del país. Las regiones geotérmicas más estudiadas en Colombia han sido las áreas geotérmicas de Paipa, el sistema volcánico Chiles-Cerro Negro y el Sistema Volcánico del Nevado del Ruiz (Lund, 2015). Visualizando el panorama colombiano a nivel nacional con respecto al aprovechamiento de las energías de tipo geotérmicas, vemos que no hay ningún tipo de aprovechamiento de esta, sin embargo, no significa que no se hayan realizado estudios científicos y económicos con respecto a esa tecnología de energía renovable (Salazar Blanco, 2016). Las primeras investigaciones se remontan al año de 1968, cuando la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) por medio el Ente Nacional de Electricidad de Italia (ENEL) realizó una evaluación para el desarrollo geotérmico en el complejo volcánico del Nevado del Ruiz, tal estudio se realizó en un área de 1500 km², en donde se observaron zonas con potencial geotérmico y se recomendó continuar con la investigación (Bona & Coviello, 2016). El lento crecimiento para el desarrollo de estas tecnologías en el país se debe a diferentes causas las cuales están comprendidas por, el costo de la investigación, exploración in situ y los recursos especializados que se requieren para la implementación de tales tecnologías, la inversión en tal investigación es considerada de alto riesgo, lo cual genera incertidumbre en los posibles desarrolladores de esta tecnología y el mercado como tal. las áreas con potencial geotérmico se encuentran ubicadas en zonas volcánicas, en su mayoría las mismas son parques naturales con protección ambiental en el país, lo cual implica varios desafíos técnicos, ambientales e infraestructurales (Servicio Geológico Colombiano, 2019). la conexión de la generación geotérmica a la red interconectada nacional es compleja debido a la ubicación de las zonas con potencial geotérmico, lo cual puede implicar un uso acotado a las zonas donde se encuentre tal potencial. culturalmente se debe capacitar a la comunidad debido al desconocimiento sobre el uso, ventajas y adversidades de tal tecnología, y, por último, no se ha realizado aprovechamiento de tal recurso en el país lo que implica incertidumbre en los resultados que se puedan obtener, por ende, se requiere un asesoramiento externo; tomando como referencia los resultados obtenidos en otros países (Marzolf, 2013). Conociendo mucho más esta tecnología, los proyectos geotérmicos a gran escala tienen altos niveles de riesgo, principalmente antes de realizar la etapa de perforación exploratoria profunda. Esto se debe a que no se puede garantizar la existencia del recurso hidrotermal hasta que: no se perfora el reservorio, luego se obtenga fluido caliente y finalmente se hagan pruebas para determinar la viabilidad de su uso para generación de electricidad (González, 2023).

Teniendo en cuenta esto, Colombia es un país con un potencial muy elevado para la explotación y aprovechamiento de esta tecnología, por lo tanto, estas son sus zonas con mayor potencial de exploración y explotación de este recurso “inagotable”. Proyecto Binacional Tufiño-Chile-Cerro Negro, Arias y Acevedo (2017) según ellos, Empresas nacionales como ISAGEN y EPM han realizado en el último tiempo grandes esfuerzos que puedan reactivar la exploración de zonas con potencial geotérmico como en la zona del Nevado del Ruiz y el proyecto binacional de Colombia y Ecuador Tufiño Chile-Cerro Negro, la cual fue descubierta por instituto ecuatoriano de electrificación (INECEL) en 1978, durante reconocimientos geotérmico. Por parte del proyecto binacional Tufiño-Chile-Cerro Negro inicia su investigación en el año 2010 con la firma de los Gobiernos de Colombia y Ecuador para la exploración de la zonas fronterizas, tal proyecto se encuentra en una etapa de estudio de pre factibilidad que permita realizar una cuantificación de los recursos existentes en la zona y definir los pozos a explorar, su inversión se presupuesta en 6.860.000 US a cargo de ISAGEN por Colombia y CELEP EP por Ecuador, el cual tiene una oposición social en el territorio Colombiano, generado por la poca divulgación a las comunidades de influencia referente a los beneficios y riesgos del proyecto (Arias Marín & Acevedo Sánchez, 2017). Volcán Azufral, esta área con potencial geotérmico se encuentra ubicada en la cordillera occidental del suroeste de Colombia, en el departamento de Nariño, cuenta en la cercanía de la ladera del volcán con la ciudad de Tuquerres y una carretera la cual hace que el área sea atractiva en términos logísticos y acceso, además se tiene el beneficio de la cercanía de una de las líneas de interconexión eléctrica de Colombia y Ecuador (Servicio Geológico Colombiano, 2022). En 1982 el área se clasificó como una zona de alta prioridad para el reconocimiento de potencial geotérmico; sin embargo, los estudios e investigaciones reales iniciaron a finales de la década del noventa bajo la dirección de INGEOMINAS (Hoy el Servicio Geológico Colombiano) bajo mandato del gobierno nacional de la época.

Luego tal proyecto tuvo el apoyo del BID, con financiamiento del Fondo Fiduciario del Japón, el cual se encargó de realizar un estudio de pre-factibilidad asignando tal estudio en abril del 2001, mediante una licitación internacional, a la firmas consultoras *West Japan Engineering Consultants* y *Geohazards Consultants International*; el cual se canceló sin dar inicio al proceso en el año 2002, debido a problemas de seguridad en la zona y falta de apoyo de autoridades locales, por tanto INGEOMINAS siguió la investigación en el área, completando la cartografía en 2003 y realizando la exploración geotérmica en 2006 (Marzolf, 2013) y (Bona & Coviello, 2016). *Nevado del Ruiz*, tal proyecto se encuentra ubicado en la cordillera occidental de Colombia, en el cual se encuentra además del Nevado del Ruiz, otros centros volcánicos importantes como 20 Cerro Bravo, Santo Domingo, Santa Rosa de Cabal, El bosque, Nevado del Tolima, Cerro Machín el cual componen unas 100 manifestaciones termales, las cuales componen un tercio de toda Colombia. Estas manifestaciones en el Nevado del Ruiz se dividen en tres diferentes grupos denominadas por: Sector Nororiente, Sector Suroccidental y Sector Occidental en donde en esta última se encuentran fuentes termales con aguas cloruradas de alta temperatura (Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2020).

Según las contribuciones del SGC en la RENAG 2017, los campos de estudio en los que ya se ha trabajado para el Nevado del Ruiz son la geología y la geoquímica del agua. Además, se ha avanzado en gravimetría, magnetometría, modelado magnetotérmico 2D, modelado geotérmico 2D, modelado conceptual y el mapeo del área geotérmica (RENAG, 2017). Por último, el SGC menciona que aún quedan pendientes estudios más específicos relativos a geología estructural, sondeos de temperatura, modelos magnetotérmicos 3D, gases difusos y geoquímica de gases (Radón). La cantidad y diversidad de estudios que se han realizado desde 1968 para estudiar el potencial y aprovechamiento de los recursos geotérmicos en el Nevado del Ruiz hacen de esta área la zona geotérmica más investigada en Colombia hasta el día de hoy. Uno de los mayores hitos de este proyecto fue la perforación del pozo exploratorio Nereidas 1 en 1997. Este pozo tiene una profundidad vertical de 1363 metros y una temperatura en fondo de 197 °C aproximadamente. Sin embargo, con este pozo no se llegó al reservorio geotérmico, por lo que se encuentra seco y despresurizado (errez, 2021). Los estudios más recientes acerca del potencial geotérmico de la zona fueron realizados en 2016. Los resultados que se destacan de este trabajo son: 5 nuevos blancos para perforación exploratoria profunda, una temperatura estimada de reservorio que oscila entre 240 y 260 °C y un 90% de probabilidad de que el yacimiento pueda alimentar una planta de 65 MW eléctricos, esto a partir de la aplicación del modelo volumétrico islandés (González, 2023). De acuerdo con las características de este proyecto, se propuso dos diferentes ciclos de aprovechamiento de la fuente de energía, el primer ciclo que fue usado en los cálculos es el Flash Simple con turbina de condensación. Este sistema se usa cuando se puede extraer vapor del fluido del pozo a través de un separador, conservando una alta temperatura que permita una expansión considerable en la turbina. El otro ciclo que se seleccionó fue el Binario de alta entalpía. Este ciclo está ganando terreno en la industria siendo relativamente nuevo. Empresas como *Turboden* y *Ormat* lo han venido implementando con éxito, sustituyendo en algunos casos el uso de sistemas Flash Simple, siendo este último el tipo de planta con mayor capacidad instalada a nivel mundial (Cappetti, 2019). Adicional a esto, el fluido de trabajo que se usó fue isopentano. Este entra a la turbina a una presión de 2500 kPa como vapor saturado y sale a una presión de 100 kPa para entrar al condensador. Cabe resaltar que se tuvo especial cuidado con la selección del fluido de trabajo, ya que este afecta directamente la eficiencia del ciclo (González, 2023). Para elegir la mejor opción, se deben tener en cuenta principalmente las condiciones de caudal y temperatura del fluido geotérmico y el tipo de ciclo binario que se quiere aplicar. Otros parámetros que entran en juego son: restricciones operativas o de diseño impuestas en la planta, inflamabilidad del fluido, toxicidad, agresividad química, los peligros potenciales para el medio ambiente y el costo (DiPippo, 2016).

En este proyecto se desarrolló la iniciativa que permitiría generar entre 50 y 100 MW de energía renovable a través del aprovechamiento del potencial geotérmico en el Nevado del Ruiz, donde empresas como lo son, *Ecopetrol S.A.*, *Baker Hughes* y la *Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC)*, firmaron un memorando de entendimiento para estructurar estudios de factibilidad del proyecto

geotérmico anteriormente mencionado, con su ubicación exacta en el Valle de Nereidas. Dicho acuerdo se llevará a cabo durante 12 meses, tiempo donde se realizarán estudios de todo tipo, para así realizar una propuesta de generación de energía renovable que su plan piloto inicial será en el departamento de Caldas, muy cerca de su capital como lo es Manizales la ciudad de las puertas abiertas. “La geotermia juega un papel elemental para lograr una mezcla de energía sostenible y reducir emisiones. Me complace ser parte de un proyecto geotérmico en una de las cuencas más relevantes de Colombia junto con nuestro socio y cliente Ecopetrol, así como con CHEC. Estamos seguros de que nuestra experiencia y tecnología en geotermia pueden ayudar a Ecopetrol a alcanzar su objetivo de proporcionar 900 MW de energías renovables para 2025”, dijo el presidente y director ejecutivo de Baker Hughes, Lorenzo Simonelli (Ecopetrol, 2023). Sumando al análisis de alianza entre estas tres empresas, podemos concluir que tenemos una alianza en la cual no solo se tratan de inversionistas en temas económicos, empezando con la empresa Ecopetrol, es una empresa experta en perforaciones de todo tipo, temas y experiencia fundamental para llevar a cabo este proyecto; tenemos también a la empresa CHEC con sus años de recorrido en la generación, transmisión, distribución y comercialización de energía eléctrica, y por ultimo y no menos importante Baker Hughes, empresa enfocada en la tecnología energética, ya sean servicios y equipos petroleros y/o tecnología industrial y energética (Baker Hughes, 2023).

Finalmente, a lo largo de todo este documento se pudo analizar que la generación de energía eléctrica abarca temas de gran importancia, como lo son, las energías renovables y las no renovables, destacando la energía geotérmica en Colombia como una energía renovable, limpia y posiblemente inagotable como lo es la energía geotérmica, la cual no ha sido explotada adecuadamente, también es una energía con muy bajos índices de Gases de Efecto Invernadero, lo cual cada vez más la hace más atractiva. La exploración de la energía geotérmica en Colombia se erige como una estrategia prometedora para impulsar la sostenibilidad y la diversificación de la matriz energética del país. También, se ha examinado en detalle la definición y principios fundamentales de la energía geotérmica, así como su potencial, beneficios y desafíos en el contexto colombiano. Colombia ha demostrado un compromiso activo con el desarrollo de la energía geotérmica, con proyectos piloto, estudios de evaluación a nivel nacional y colaboraciones internacionales. La participación del sector privado y la creación de un marco normativo sólido son pasos cruciales para el éxito a largo plazo de estas iniciativas. Sin olvidar y mirar mas detenidamente la sociedad o acuerdo que se tiene entre Ecopetrol y CHEC, Ecopetrol es una empresa que no puede estar en todos los negocios relacionados con la energía eléctrica, en palabras mas concretas, Ecopetrol no puede estar linealmente en todos los campos de la energía (integración vertical), puntualmente no puede estar en el negocio de la generación de energía, porque ya se encuentra en el negocio de trasmisión, así como lo prohíbe la ley 143 de 1994, en cambio CHEC y todo el grupo EPM son la excepción a dicha ley.

Referencias

acolgen. (2023). acolgen. Obtenido de <https://acolgen.org.co/>

Arias Marín, G., & Acevedo Sánchez, A. (2017). *Estado Actual de la Produccion de Energía Geotérmica en Colombia*. Obtenido de <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/13221/1087995573.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Baker Hughes. (2023). *Baker Hughes*. Obtenido de <https://www.bakerhughes.com/company/about-us>

Bona, P., & Coviello, M. (2016). *Valoracion y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del sur*. Obtenido de <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/24c78dcd-fad9-4f29-b628-833ff762c82e/content>

- Cappetti, G. (17 de Julio de 2019). *Cerro Pabellón geothermal plant: a success story*. Obtenido de newenergyevents.com/geolac/wp-content/uploads/sites/7/2019/07/Guido-Cappetti-Cerro-Pabellon.pdf
- DiPippo, R. (03 de 06 de 2016). *Geothermal Power Generation: Developments and Innovation*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780081003374000012#preview-section-cited-by>
- Eadic. (2022). *Eadic*. Obtenido de <https://eadic.com/blog/entrada/principios-basicos-de-la-energia-geotermica/#:~:text=La%20energ%C3%ADa%20geot%C3%A9rmica%20utiliza%20el%20calor%20de%20la%20tierra%20para,tierra%20aumenta%20con%20la%20profundidad.>
- Ecopetrol. (08 de 03 de 2023). *Ecopetrol*. Obtenido de <https://www.ecopetrol.com.co/wps/portal/Home/es/noticias/detalle/alianza-entre-ecopetrol-baker-hughes-y-chec-para-impulsar-la-energia-geotermica-en-colombia>
- Endesa. (2023). *Endesa*. Obtenido de Endesa: <https://www.endesa.com/es/la-cara-e/energias-renovables/energia-geotermica>
- errez, J. R.-G. (08 de 06 de 2021). *Approach to the geothermal potential of Colombia*. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375650521001292>
- González, J. A. (01 de 06 de 2023). *Revista UIS Ingenierías*. Obtenido de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/13672/12984>