



# Simulación Técnico-económica de un Sistema de Generación de Energía Geotérmica en el Volcán Cerro Machín

**Hernando Enrique Rodriguez Pantano**

Universidad ECCI.  
Maestría en Ingeniería con Énfasis en Mecánica  
Bogotá, Colombia  
2020.



# Simulación Técnico-económica de un Sistema de Generación de Energía Geotérmica en el Volcán Cerro Machín en Colombia

**Hernando Enrique Rodriguez Pantano**

Tesis de grado presentada como requisito para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería**

Director:

Ph.D. en Energía Juan Sebastián Solís-Chaves

Línea de Investigación:

Energía y Transporte

Grupo de Investigación

en Aprovechamiento Tecnológico de Materiales y Energía «GIATME»

Universidad ECCI

Maestría en ingeniería

Bogotá DC, Colombia

2020



## Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a Dios, a mi familia y a los grupos de interés que trabajan con los temas relacionados a la generación de energía a partir de fuentes renovables.

«Investigar es ver lo que todo el mundo ha visto, y pensar lo que nadie más ha pensado».

Albert Szent-Györgyi



## Agradecimientos

Primero que todo doy gracias a Dios que fue el que permitió culminar este trabajo, a mi familia que es un apoyo incondicional y mi director de proyecto de grado que creyó en mí y fue mi guía para poder cumplir esta meta.





# Declaración

Me permito afirmar que he realizado la presente tesis de manera autónoma y con la única ayuda de los medios permitidos y no diferentes a los mencionados en la propia tesis. Todos los pasajes que se han tomado de manera textual o figurativa de textos publicados y no publicados, los he reconocido en el presente trabajo. Ninguna parte del presente trabajo se ha empleado en ningún otro tipo de tesis.

Bogotá, D.C., 10/12/2020

---

Hernando Enrique Rodríguez Pantano



## Resumen

El potencial geotérmico colombiano para la generación de energía es interesante debido a la presencia de las tres cadenas montañosas andinas y la existencia de volcanes activos en la unión con manantiales y embalses subterráneos con la consecuente cercanía de los pozos hidrotermales disponibles. El volcán Machin es una pequeña montaña situada en el centro del país, que tiene un considerable potencial geotérmico con pozos en un rango de temperatura de  $160^{\circ}C$  a  $260^{\circ}C$ . Por esa razón, en este documento se propone una simulación tecnoeconómica para un Sistema de Generación de Energía Geotérmica, utilizando para ello el software Modelo de Asesor del Sistema (System Advisor Model -SAM, por sus siglas en inglés). El objetivo de esta investigación es presentar una imagen más alentadora para los inversores públicos y privados interesados en explotar este potencial energético en Colombia. Los resultados de la simulación incluyen aspectos técnicos y económicos como la producción de energía anual y mensual, la temperatura promedio mensual de los recursos geotérmicos y los factores de tiempo de entrega también se consideran. También se muestran algunas tablas con la configuración del sistema, los costos de la planta y la bomba, el Factor de capacidad y el Costo de energía nivelado real y nominal.

**Palabras clave:** Gradientes térmicos colombianos, análisis de factibilidad, energía geotérmica, sistemas de generación de energía renovable, Modelo de Asesor de Sistemas.

## Abstract

Colombian geothermal potential for power generation is interesting due to the presence of the three Andean mountain ranges and the existence of active volcanoes in junction with springs and underground reservoirs with the consequent closeness of available hydro-thermal water-wells. The Machin volcano is a small mountain placed in the middle of the country, that has a considerable geothermal potential with wells in a temperature range of  $160^{\circ}C$  a  $260^{\circ}C$ . For that reason, a techno-economic simulation for a Geothermal Energy Generation System is proposed in this paper, using for that the System Advisor Model software. The purpose of this research is to present a more encouraging landscape for public and private investors interested in exploiting this energy potential in Colombia. Simulation results include technical and economic aspects as annual and monthly energy production, geothermal resource monthly average temperature, and the Time of Delivery Factors are also considered. Some tables with system configuration, plant and pump costs, Capacity Factor, and real and nominal Levelized Cost of Energy are also shown.

**Keywords:** Colombian Thermal Gradients, Feasibility Analysis, Geothermal Energy, Renewable Energy Generation Systems, System Advisor Model.



# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>XI</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XV</b>
<b>Lista de tablas</b>	<b>XVII</b>
<b>Lista de símbolos</b>	<b>XIX</b>
<b>1 Introducción, Objetivos y Tipo de Investigación</b>	<b>1</b>
1.1 La Energía Geotérmica y su Potencial como Alternativa para la Generación de Electricidad . . . . .	1
1.2 Objetivos . . . . .	5
1.2.1 Objetivo General . . . . .	5
1.2.2 Objetivos Específicos . . . . .	6
1.3 Tipo de Investigación . . . . .	6
<b>2 Panorama de la Energía Geotérmica</b>	<b>7</b>
2.1 La energía geotérmica a nivel mundial . . . . .	8
2.2 La Energía Geotérmica en Latinoamérica . . . . .	10
2.3 La Energía Geotérmica en Colombia . . . . .	11
2.3.1 El Volcán Cerro Machín . . . . .	15
<b>3 Los Sistemas de Generación Geotérmica</b>	<b>20</b>
3.1 Geotermia . . . . .	20
3.1.1 Manifestaciones geotérmicas. . . . .	21
3.2 La Energía Geotérmica y el Desarrollo Sostenible . . . . .	22
3.3 Aplicaciones y Tipos de energía Geotérmica . . . . .	23
3.4 Yacimientos Geotérmicos. . . . .	24
3.4.1 Yacimientos de Muy Baja Temperatura. . . . .	24
3.4.2 Yacimientos de Baja Temperatura. . . . .	25
3.4.3 Yacimientos de Media Temperatura. . . . .	26
3.4.4 Yacimientos de Alta Temperatura. . . . .	26

3.5	Generación de Electricidad . . . . .	26
3.5.1	Plantas Geotérmicas de Vapor Seco . . . . .	27
3.5.2	Planta Geotérmica tipo Flash . . . . .	28
3.5.3	Plantas Geotérmicas de Ciclo Binario . . . . .	29
3.5.4	Planta Geotérmica Híbrida . . . . .	30
3.5.5	Planta Geotérmicas Estimuladas . . . . .	31
3.6	Costo Nivelizado de la Energía en una Planta de Energía Geotérmica . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Dimensionamiento del Modelo de la Planta GT para el Volcán Cerro Machín usando SAM</b>	<b>37</b>
4.1	System Advisor Model (SAM). . . . .	37
4.1.1	Modelos de Generación con Energías Renovables . . . . .	37
4.1.2	Modelos Financieros para los Sistemas de Generación con Energías Renovables . . . . .	38
4.2	Configuración del Modelo de Simulación GT en SAM . . . . .	38
4.2.1	Condiciones Ambientales . . . . .	38
4.2.2	Recurso Geotérmico . . . . .	40
4.2.3	Selección de la Planta Geotérmica . . . . .	41
4.2.4	Parámetros de la Bomba . . . . .	42
4.2.5	Bloque de Potencia . . . . .	45
4.2.6	Despacho de energía . . . . .	45
4.2.7	Costos del Sistema de Generación de Energía Geotérmica . . . . .	46
<b>5</b>	<b>Resultados de Simulación de la Planta GT para el Volcán Cerro Machín</b>	<b>50</b>
5.1	Resultados Técnicos . . . . .	51
5.1.1	Producción Mensual de Energía . . . . .	51
5.1.2	Producción Anual de Energía . . . . .	51
5.1.3	Temperatura promedio mensual del recurso geotermico . . . . .	52
5.1.4	Promedio anual diario de energía producida por la planta . . . . .	53
5.1.5	Factores de Tiempos de Entrega. . . . .	54
5.2	Resultados Económicos . . . . .	55
5.2.1	Costo de la Planta GT . . . . .	55
5.2.2	Resultados económicos de la planta geotermica . . . . .	56
5.2.3	Costo del Sistema de Bombeo de la Planta GT . . . . .	56
5.2.4	Rentabilidad de la Planta GT . . . . .	57
<b>6</b>	<b>Conclusiones y recomendaciones</b>	<b>60</b>
6.1	Conclusiones . . . . .	60
6.2	Productos Derivados de esta Tesis . . . . .	61
	<b>Bibliografía</b>	<b>62</b>

# Lista de Figuras

<b>1-1</b>	Energía geotérmica mundial Top 10 [1]. . . . .	3
<b>1-2</b>	Potencial Geotérmico [2]. . . . .	4
<b>2-1</b>	Energía Geotérmica [3]. . . . .	7
<b>2-2</b>	Capacidad de generación eléctrica de energías renovables en el mundo [4]. . . . .	8
<b>2-3</b>	Capacidad de Generación de Energía Geotérmica a Nivel Global [4]. . . . .	9
<b>2-4</b>	Mapa de las Placas Tectónicas Terrestres [5]. . . . .	10
<b>2-5</b>	Capacidad Geotérmica Instalada en América Latina, [4]. . . . .	12
<b>2-6</b>	Distribución del Recurso Geotérmico en América del Sur [6]. . . . .	13
<b>2-7</b>	Ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermo- eléctrico en Colombia [6]. . . . .	14
<b>2-8</b>	Volcán Cerro Machín [7]. . . . .	16
<b>2-9</b>	Mapa de localización de los pozos del Volcan Cerro Machín [7]. . . . .	17
<b>2-10</b>	Falla de Cajamarca [8]. . . . .	19
<b>3-1</b>	Capas terrestres [8] . . . . .	21
<b>3-2</b>	Yacimientos de Baja Temperatura [9]. . . . .	25
<b>3-3</b>	Planta de Energía Geotérmica [8]. . . . .	27
<b>3-4</b>	Esquema de una Planta Geotérmica de Vapor Seco [10]. . . . .	28
<b>3-5</b>	Esquema de una planta Geotérmica tipo Flash [10]. . . . .	29
<b>3-6</b>	Esquema de una planta Geotérmica Binaria [10]. . . . .	30
<b>3-7</b>	Esquema de una Planta Geotérmica Híbrida [10]. . . . .	31
<b>3-8</b>	Esquema de una Planta Geotérmica Mejorada (EGS) [10]. . . . .	32
<b>3-9</b>	Costos de Instalación por Tecnología y por Años [11]. . . . .	33
<b>3-10</b>	Pronóstico de Gastos de Capital (CAPEX) para una Planta de Energía Geotérmi- ca en la Unión Europea [11]. . . . .	34
<b>3-11</b>	Desglose del Costo Total de una Planta Geotérmica de 110 MW [11]. . . . .	34
<b>3-12</b>	LCOE a Nivel de Proyecto Geotérmico por Tecnología y por Año [11]. . . . .	35
<b>3-13</b>	Perfiles Típicos de Incertidumbre y Gasto para un Proyecto Geotérmico [11]. . . . .	36
<b>4-1</b>	Modelamiento del Sistema Geotérmico para la Generación de Electricidad. . . . .	38
<b>4-2</b>	Mapa de radiación solar de la Base de Datos de NREL [12]. . . . .	39
<b>4-3</b>	Impacto del Bombeo de Producción en las Ventas de Energía, [13]. . . . .	42

---

4-4	Parámetros para Determinar la Profundidad de Fraguado del Bombeo de Producción y el Cabezal de la Bomba de Inyección, Adaptada de [13]. . . . .	43
4-5	Manual de Despacho Diario de Energía [13]. . . . .	46
5-1	Producción mensual de energía eléctrica en $kW/h$ . . . . .	51
5-2	Producción Anual de Energía Eléctrica en $kWh$ . . . . .	52
5-3	Temperatura Promedio Mensual del Recurso Geotérmico. . . . .	53
5-4	Promedio anual diario de energía producida por la planta . . . . .	54
5-5	Factores de Tiempos de Entrega de Energía. . . . .	55
5-6	Flujo de caja del proyecto. . . . .	57
5-7	Efectivo disponible para el servicio de la deuda. . . . .	58
5-8	Pago total de la deuda. . . . .	58
5-9	Pago de intereses de la deuda. . . . .	59



# Lista de Tablas

<b>2-1</b>	Características de los Proyectos con Perspectivas de Desarrollo Geotermo- eléctrico en Colombia [6]. . . . .	14
<b>2-2</b>	Principales Características de los Pozos del Volcán Cerro Machín [7]. . . . .	18
<b>3-1</b>	Aplicaciones de la Energía Geotérmica Según la Temperatura del Recurso [14].	24
<b>4-1</b>	Modelo de Recursos de Datos Solares de NSRDB [15]. . . . .	39
<b>4-2</b>	Parámetros solares y meteorológicos en Machín [15]. . . . .	40
<b>5-1</b>	Datos de simulación de la Planta Geotérmica del volcán Cerro Machín. . . . .	50
<b>5-2</b>	Costos de la Planta GT del volcán Cerro Machín. . . . .	55
<b>5-3</b>	Resultados económicos de la Planta GT del volcán Cerro Machín. . . . .	56
<b>5-4</b>	Costo del Sistema de Bombeo de la Planta GT del Volcán Cerro Machín. . . . .	56



# Lista de símbolos

## Símbolos y Unidades

Símbolo	Término	Unidad
$P$	Potencia	W
$T$	Temperatura	$^{\circ}C$
$A$	Área	$m^2$
$h$	Altura	$m$
$Q$	Caudal	$\frac{l}{s}$
$H$	Entalpia	$\frac{kJ}{kg}$

## Abreviaturas

Abreviatura	Término
CHEC	Central Hidroeléctrica de Caldas
SAM	System Advisor Model
LCOE	Costo Nivelado de energía
GTO	Oficina de Tecnologías Geotérmicas
CFE	Comisión Federal de Electricidad
GESA	Geocónsul y Geoenergía Andina S.A.
SGC	Servicio Geológico Colombiano
ISAGEN	Empresas Generadoras de Electricidad
EPM	Empresas Públicas de Medellín
UPME	Unidad de Planeación Mineroenergética
USTDA	Agencia de Comercio y Desarrollo de EE.UU
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
IVA	Impuesto Nacional al Valor Agregado
EGS	Planta Geotérmica Mejorada
CE	Comisión Europea
CAPEX	Pronóstico de Gastos de Capital
GT	Geotérmica
NREL	National Renewable Energy
NSRDB	National Solar Radiation Database
SETP	Solar Energy Technologies Program
DOE	U.S. Department of Energy
PPA	Acuerdo de Compra de Energía
GETEM	Modelo de Evaluación de Tecnología de Electricidad Geotérmica del Departamento de Energía

# 1 Introducción, Objetivos y Tipo de Investigación

## 1.1. La Energía Geotérmica y su Potencial como Alternativa para la Generación de Electricidad

En el planeta Tierra hay 7715 millones de habitantes; la riqueza del mundo no sólo sigue en manos de una pequeñísima minoría sino que, la brecha entre los ricos y los pobres se agrandó aún más; El 82 % del dinero que se generó en el mundo en el 2018 fue para el 1 % de los más ricos de la población global, mientras tanto, la mitad más pobre del planeta no percibe ningún incremento en sus ganancias. Por otro lado en el año 2019, estudios afirman que la fortuna del 1 % de los más ricos del mundo corresponde a más del doble de la riqueza acumulada de los 6.900 millones restantes, es decir un 92 % de la población del planeta.[16] Los altos costos de la energía, el agotamiento de los combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas natural, principales fuentes de producción de energía, son considerados generadores de emisiones de partículas y gases contaminantes a la atmósfera que favorecen el efecto invernadero, el calentamiento global y la necesidad por reducir las emisiones de  $CO_2$ , hacen que las energías renovables sean una estrategia fundamental para el desarrollo del planeta, la sociedad y la economía sostenible, que al día de hoy está superpoblado y la desigualdad va en aumento.

De las formas de energía sustentables que existen, la energía geotérmica, que es el calor aprovechable proveniente del interior de la tierra, cumple un papel fundamental en los diversos sectores: energético, agrícola, industrial, turístico y de la construcción, ya sea desde aplicaciones de confort, como los baños de aguas termales, el uso de invernaderos para hacer los cultivos más eficientes, pasando por la calefacción de zonas residenciales y terminando en usos industriales del vapor y la generación de electricidad [17, 18].

La energía geotérmica se remonta desde la tercera glaciación del mundo hace 20000 años, donde en Niisato, Japón fueron encontrados restos arqueológicos de objetos tallados en piedra volcánica que son considerados como los más antiguos de la historia. Las tribus indígenas en América del norte utilizaban las aguas termales para cocinar alimentos y sus minerales con propósitos medicinales. En Europa, los Griegos y Romanos utilizaban los baños como centros de ocio, salud y negocios, siendo un lugar muy famoso las llamadas «Termas de la Caracola» en Roma, con una capacidad para recibir 1600 personas. En el siglo XIV, se

desarrolla la primera calefacción de distrito geotérmica en Chaudes-Aigues, situada en la región de Auvernia, Francia.

La transformación de la energía geotérmica en eléctrica nace en Larderello Italia, con el Príncipe Piero Ginori Conti, en 1875, que inició realizando estudios de producción de energía mecánica mediante bombas accionadas por vapor para la producción de salmuera bórica utilizada en la industria química. En 1903, da inicio un programa de investigación y desarrollo tecnológico que incluía estudios y pruebas de laboratorio para evaluar la factibilidad técnica de usar fluidos geotérmicos en la producción de energía eléctrica utilizando un laboratorio móvil transportado por caballos para tomar muestras de fluidos e incrustaciones hidrotermales; así el 4 de julio de 1904 obtuvo como resultado la generación de energía eléctrica logrando encender 5 lámparas, haciendo uso de un motor de pistones accionado por vapor obtenido de un intercambiador de calor alimentado por fluidos producidos por un pozo térmico acoplándole al motor un dinamo de 10  $kW$ . El mismo experimento se repite en el año 1905, alcanzando a iluminar durante una década el palacio de la familia De Larderello-Ginori Conti y otros edificios civiles de Larderello. En los años de 1913 a 1916 se construye la primera central geotérmica de 7  $MW$  por la empresa electromecánica de Franco Tosi y también se realiza el montaje de la primera línea eléctrica del mundo alimentada por energía geotérmica. Tenía 25  $km$  de longitud y conectaba los centros de Pomarance y las Salinas de Volterra [19].

De 1919 a 1930 ocurrieron tres acontecimientos importantes que contribuyeron a la desarrollo de la energía geotérmica: en Beppu (zona volcánica de Japón) instalaron una planta experimental de un  $1kW$ . En California, Estados Unidos, proyectos geotérmicos estaban en fases de exploración y en Reijavik, Islandia, se incorporaba la primera red de calefacción geotérmica urbana que fue replicada en varios países de Europa, Asia y América. Después de la segunda guerra mundial muchos países vieron la energía geotérmica como una forma eficiente y eficaz para afrontar los fuertes inviernos y veranos utilizando bombas de calor con un ciclo directo e inverso, pero la gran revolución que se presentó fue en la década de los 70 debido al alza de los precios, generado por la decisión de la Organización de Países Árabes Exportadores de Petróleo de no exportar más crudo a las naciones que habían apoyado a Israel durante la guerra del Yom Kippure. Esta medida afectaba a Estados Unidos y a sus aliados de Europa Occidental obligándolos a tomar medidas al respecto, y no generar una dependencia directa de este recurso no renovable para el desarrollo de su economía. Muchos países desarrollados y en vía de desarrollo, retomaron investigaciones en la producción de energía eléctrica y sistemas de calefacción, a partir de la energía geotérmica, llevándolos a una evolución gradual, iniciando en el año de 1970 con una capacidad instalada de 1500  $MW$  y una energía producida de 500  $GWh$ , en la década de los 90 aumento un 400% llegando 6000  $MW$ , en el año 2000 se presenta un registro de 8000  $MW$  y en el año 2005 hasta el año 2018 de 15000  $MW$  y una generación 75000  $GWh$  a nivel mundial, esto se presenta en los países con características geológicas apropiadas para la existencia de recursos, regiones ubicadas en correspondencia de márgenes de placas tectónicas y afectadas por vulcanismo

[20].

A nivel mundial 40 países tienen el potencial para satisfacer la demanda de electricidad completa del mundo y en 24 de ellos hay plantas de energía térmica en la Figura 1-1 se presenta el Top 10 de países que tiene la capacidad instalada nivel mundial mas alta en *MW* hasta el año 2018.

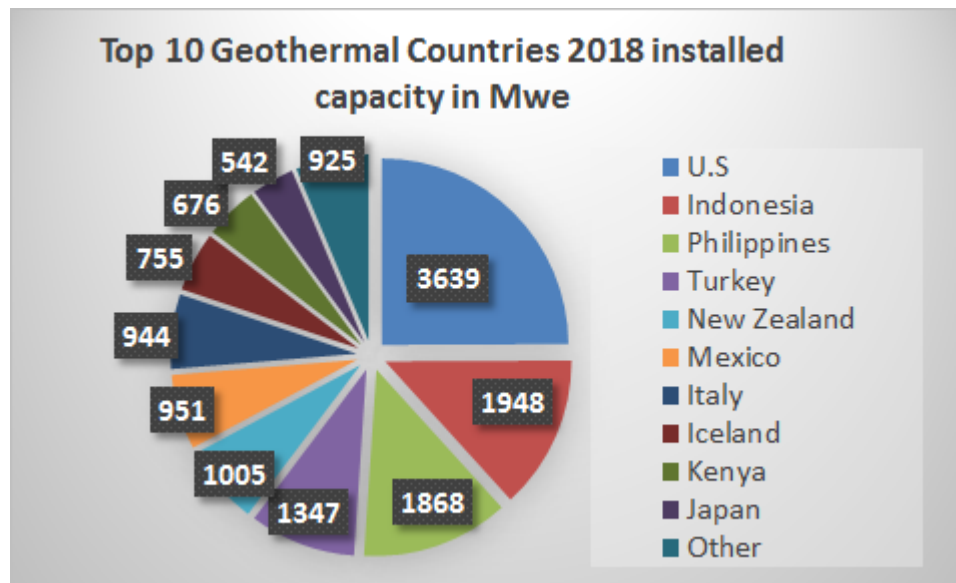


Figura 1-1: Energía geotérmica mundial Top 10 [1].

Estados Unidos como potencia Mundial seguidos de Indonesia y Filipinas, México representando a Latino América en un importante sexto puesto de 951 *MW*, Salvador, Honduras, República Dominicana con un nuevo esquema de incentivos y apoyo, podrían estar avanzando en los próximos años; América del Sur tiene un potencial geotérmico muy importante el 35% de la totalidad del planeta tierra, no lo han aprovechado de manera eficiente y eficaz, debido a que no han generado una regulación y legislación para introducir este tipo de fuente renovable como si lo han sabido hacer países como, Estados Unidos, Nueva Zelanda, Islandia y Filipinas donde la Agencia Internacional de Energía ha motivado a los gobiernos a desarrollar marcos logísticos de políticas geotérmicas que tienen consideraciones ambientales, sociales, económicas, necesidades de regulación, y apoyo a la investigación científica y de desarrollo sostenible.

El potencial geotérmico que tiene el planeta es mayor en un 5000% que el del petróleo, gas natural, residuos orgánicos y carbón; cuenta con una ventaja competitiva sobre los otros tipos de energía renovable, la centrales hidráulicas depende del nivel de agua que se encuentra en los embalses, los paneles solares están regulados por la radiación generada por el sol

a determinadas horas, los aerogeneradores por la velocidad que tiene el viento en lugares determinados, en cambio la energía geotérmica es continua, está disponible las 24 horas los 365 días del año, es el recurso más grande que existe en el planeta tierra, aunque se enfría, pues evacua más calor que el que produce, el ritmo de ese enfriamiento es de  $130^{\circ}C$  cada mil millones de años [14].

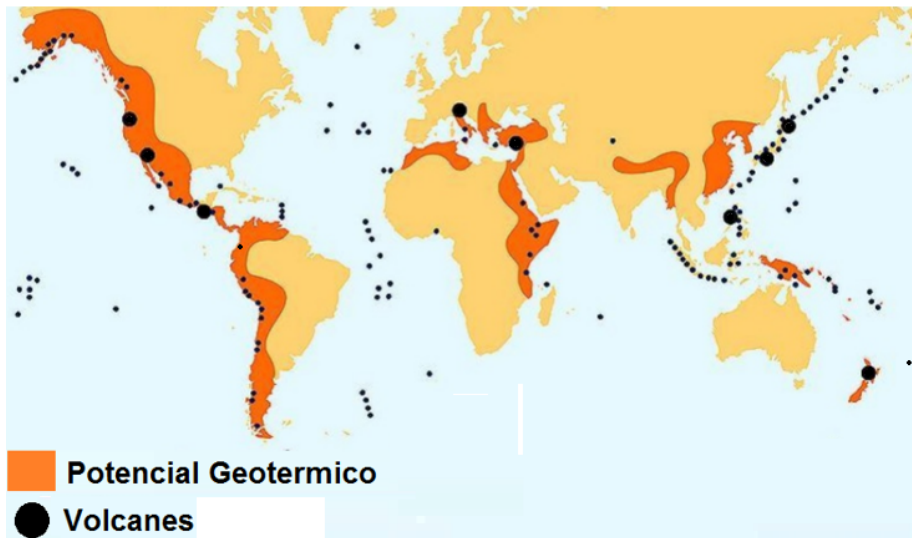


Figura 1-2: Potencial Geotérmico [2].

El mapa que se presenta en la Figura 3-3, representa el potencial geotérmico del planeta tierra, algunos volcanes y como están distribuidos por continentes. Permite identificar lo importante que es el continente americano para la explotación de energía geotérmica y como los países de sur América pueden ser potencia, en la generación de electricidad utilizando este tipo de recurso renovable, que tiene mayor confiabilidad, sustentabilidad, altos factores de carga, buena competitividad y generan un 80 % menos  $CO_2$  comparándolas con las plantas de combustibles fósiles.

En Colombia se da inicio al estudio geotérmico en el año de 1968, cuando el ente Nacional de Electricidad de Italia recibe en encargo por la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) una investigación en el volcán Nevado del Ruiz, donde evaluó los rasgos geotermales en un área de  $1.500 km^2$ , sin embargo el trabajo no continuo hasta quince años después por la misma (CHEC), cuando en 1983 completó un estudio de prefactibilidad seleccionado tres lugares de interés con un potencial geotérmico importante el valle de las Nereidas ubicado en el departamento de caldas, la Laguna de Otún ubicada en el departamento de Risaralda y el Volcán cerro Machín ubicado en el departamento del Tolima; Hasta el año 2016 se han identificado 300 fuentes de termales y 11 fumarolas, localizadas en la región andina y aso-



ciadas con volcanes.

Se presentan tres proyectos en proceso de prefactibilidad el Proyecto Geotérmico Binacional «Tufiño-Chiles-Cerro Negro» y el volcán Azufral ubicado en la Cordillera Occidental del suroeste de Colombia en el departamento de Nariño en la frontera Colombo-Ecuatoriana, El prospecto geotérmico de Paipa se encuentra en la zona axial de la cordillera andina oriental de Colombia, departamento de Boyacá y el Nevado del Ruíz es parte de un imponente complejo volcánico activo ubicado en la cordillera occidental de Colombia [21].

Este trabajo quiere dar a conocer el dimensionamiento de un sistema geotérmico utilizando el software System Advisor Model (SAM) y haciendo una investigación detallada del volcán Cerro Machín que esta ubicado en el municipio de Cajamarca, Tolima que se encuentra a 2750 *m* sobre el nivel del mar y a una distancia de 150 *km* al suroccidente de Bogotá, a 17 *km* al oeste de Ibagué, 30 *km* al este de la ciudad de Armenia con una Latitud: 4 29' N y Longitud: 75 22' O, es catalogado como un anillo piroclástico complejo de 2.4 *km* de diámetro máximo con domos taponando su cráter. Es un volcán activo en estado de reposo que cuenta con yacimientos de aguas termales con un rango de temperatura que oscila entre 42 °C y 90 °C , y temperaturas tomadas por geotermómetros de Calcedonia conductiva y cuarzo adiabático de 148 °C hasta 260 °C identificándolo como un yacimiento de Alta temperatura se caracterizan por tener un gradiente térmico de 90 °C a 150 °C y se encuentran a 2000 *m* hasta 4000 *m* de profundidad y se utilizan para aplicaciones de generación de electricidad debido a que ya se puede realizar un cambio de fase de agua a vapor para aumentar la entalpía de la sustancia de manera significativa haciendo que una planta geotérmica funcione de manera correcta [22].

Este modelo computacional estima el costo nivelado de energía (LCOE), por sus siglas en inglés) para un proyecto de generación de energía renovable por medio del uso del poder geotérmico. El modelo necesita como entradas predeterminadas por el usuario el potencial total del recurso geotérmico, la temperatura y la profundidad. Con esta información, se estima un costo de generación con base en varios escenarios de recursos definidos y evaluados previamente por la que la Oficina de Tecnologías Geotérmicas (GTO) del Departamento de Energía de EEUU (DOE) [23].

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo General

Realizar una Simulación Tecno-económica de un Sistema de Generación de Energía Geotérmica en el Volcán Cerro Machín utilizando el software SAM para determinar la electricidad que se puede generar y a qué costo, así como la factibilidad y rentabilidad del proyecto.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

- Determinar las características y el potencial geotérmico del volcán Cerro Machín por medio una investigación basada en fuentes primarias.
- Seleccionar el tipo de planta geotérmica que se va a utilizar en la Simulación Tecno-económica.
- Validar el modelo simulado con respecto a la literatura y los reportes de otros proyectos GT disponible, con el fin de evaluar los datos energéticos y económicos obtenidos durante el proceso de simulación, para la socialización y sustentación de los resultados obtenidos.

### **1.3. Tipo de Investigación**

El tipo de Investigación que se desarrolló es aplicada, cuasi-experimental y de simulación, obteniendo la información necesaria de artículos de investigación, revistas científicas y tesis de posgrado; ésta es utilizada para realizar la Simulación Tecno-económica del sistema de generación de energía geotérmica y un análisis de resultados que permiten evaluar la fase de prefactibilidad un proyecto geotérmico.

## 2 Panorama de la Energía Geotérmica

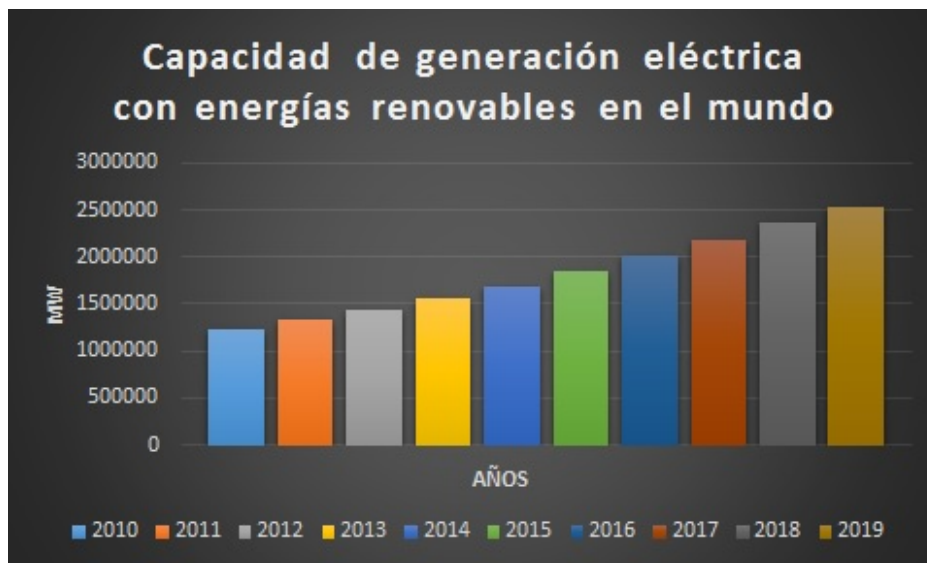
La energía geotérmica, es el calor que se utiliza del centro de la tierra para la generación de electricidad, calefacción o enfriamiento en edificios de uso doméstico hospitalario e industrial, el secado de productos agrícolas y puesta a punto de invernaderos. Presenta unas ventajas muy importantes cuando se tiene un proyecto de implementación debido a que es una energía renovable, limpia e inagotable, es un recurso que está disponible las 24 horas del día durante todo el año, sin importar las estaciones, no depende de factores externos ambientales como es el clima, la radiación solar, el viento, el caudal del agua y el nivel de la marea, no hay generación  $CO_2$  ni partículas volátiles al medio ambiente, el impacto visual es nulo comparándolo con otros tipos de fuentes de energía. Gran parte de la población desconoce este tipo de energía, en la gran mayoría de países no hay una regulación ni legislación clara, existen pocos profesionales en el área, un alto costo de ejecución y de implementación y las barreras económicas que presentan los monopolios que están a cargo de la explotación de combustibles fósiles y las hidroeléctricas suelen ser bastante elevados [24], en la Figura 2-1 se muestra el poder de este tipo de energía en forma de un géiser.



Figura 2-1: Energía Geotérmica [3].

## 2.1. La energía geotérmica a nivel mundial

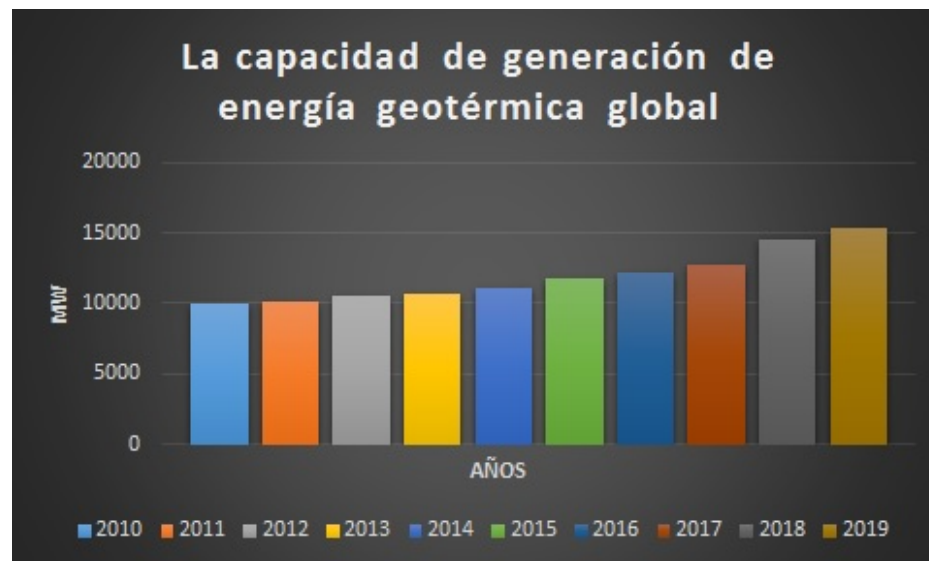
Las energías renovables en el planeta tierra son fuentes limpias e inagotables, para el año 2019 presentan una capacidad de generación eléctrica instalada de 2'536.853 *MW* a nivel mundial, haciendo que la energía geotérmica haga un aporte del 0.6 % teniendo un crecimiento anual del 10 %. Los datos de capacidad de generación eléctrica con energías renovables que se muestran en la Figura 2-2 representan la capacidad máxima de generación neta de las centrales eléctricas y otras instalaciones que utilizan fuentes de energías renovables para producir electricidad y la Figura 2-3 representa la capacidad de generación de energía geotérmica global.



**Figura 2-2:** Capacidad de generación eléctrica de energías renovables en el mundo [4].

La energía geotérmica a nivel mundial se presenta en las zonas de gran actividad tectónica, es donde la placa oceánica de la tierra y de la corteza choca y se monta una sobre la otra como se puede observar en la Figura 2-4 mapa de las placas tectónicas . En los continentes de América, Europa, Asia, África y Oceanía se encuentran los puntos calientes, que son lugares fijos en la Tierra que producen magma frecuentemente y dan origen a manantiales y volcanes, como la cadena de las Islas Hawaii [25].

Los 10 principales países geotérmicos en el año 2019 según la capacidad de generación instalada *MW* son Estado unidos con 3676 *MW* es el mayor productor de energía geotermica en el mundo,cuenta con 22 plantas geotérmicas en su base en California que generan 16,7 mil millones de kilovatios hora *kWh* de energía geotérmica durante todo el año, según la proyección realizada podría aumentar más de 26 veces , alcanzando 60 *GW* de capacidad instalada para el año 2050.



**Figura 2-3:** Capacidad de Generación de Energía Geotérmica a Nivel Global [4].

Indonesia 2133 *MW* y las proyecciones determinan que superará a los EE. UU. en términos de capacidad geotérmica para el año 2027, al día de hoy el país alberga cuatro de los 10 principales proyectos de energía geotérmica del mundo, teniendo la instalación de Gunung Salak, puesta en línea en 1994, tiene la capacidad activa más grande del mundo con 375 *MW*, mientras que el proyecto Sarulla 1, lanzado en 2017, sigue de cerca con una producción de 330 *MW*.

Filipinas con 1918 *MW* cuenta con el complejo geotérmico Makban y el complejo geotérmico Tiwi, que tienen capacidades de 458 *MW* y 289 *MW* respectivamente. Turquía cuenta con 1526 *MW* tiene la planta de Kızıldere, con una capacidad instalada de 95 *MW*. está ubicada en el pueblo de Kızıldere del distrito de Sarayköy en la provincia de Denizli y también la planta de Efeler en Aydın está experimentando una expansión que se planea proporcionar una capacidad de 260 *MW*.

Nueva Zelanda presenta una capacidad instalada de 1005*MW*, México cuenta con 963 *MW*, Italia con 944 *MW* y Kenia con 861 *MW*. Esto significa que se agregaron un total de 759 *MW* en 2019. Otros países representan una capacidad instalada de generación de energía de 1024 *MW*, lo que eleva la capacidad total instalada de generación de energía geotérmica a fines de 2019 a 15.406 *MW*. Se estima que este es el mayor crecimiento anual de la capacidad de generación de energía geotérmica que podemos seguir al menos desde el año 2000. Sin embargo, es cerca de 2014, cuando el crecimiento respecto al año anterior fue de alrededor de 750 *MW*. [26]

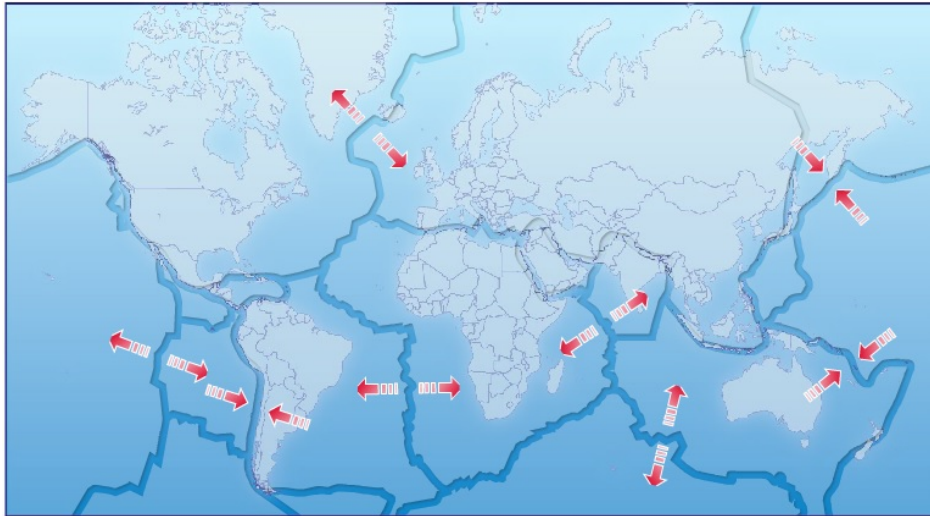


Figura 2-4: Mapa de las Placas Tectónicas Terrestres [5].

## 2.2. La Energía Geotérmica en Latinoamérica

Latinoamérica, está conformada por 22 países los cuales hablan lenguas derivadas del Latín y tiene una área de veinte millones de metros cuadrados, hace un aporte muy importante al desarrollo geotérmico, por ejemplo: México, es uno de los países más avanzados en cuanto a la producción de energía geotérmica, tiene una capacidad instalada de 951 *MW* al año 2018, impulsada en gran parte por el complejo de la estación de Cerro Prieto que es considerado uno de los pozos más grandes del mundo con una capacidad instalada de 620 *MW* y que es propiedad y es operada por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se encuentra ubicada en Baja California. El complejo cuenta con cinco unidades individuales, la primera de las cuales fue encargada en 1973. El campo geotérmico de los Azufres en Michoacán con una capacidad instalada de 160 *MW* y dos proyectos que se encuentran en etapa de evaluación: La Primavera en Jalisco y Los Humeros en Puebla. Se espera que México incremente su capacidad instalada hasta los 1400 *MW* para los próximos 10 años.

Costa Rica tiene una capacidad instalada de 262 *MW* y cuenta con en el proyecto del volcán de Miravalles, la planta de Pailas y dos proyectos más, uno llamado El Borinquen, que se encuentra en etapa de factibilidad y El Pocosol, en perfectibilidad. Este país se caracteriza por solo utilizar el 23% de su potencial geotérmico, debido a las limitaciones legislativas por parte del estado nacional ya que las normatividad lo restringen de explotar los 875 *MW* de potencial geotérmico que cubrirían la demanda nacional de energía eléctrica y permitiría exportar este recurso.

El Salvador cuenta con una capacidad instalada de 204 *MW*, en los últimos 7 años ha incrementado en 35% su producción de energía eléctrica, a partir de recursos renovables, la

geotermia es una fuente tradicional desde 1975 y satisface el 23 % de la demanda de energía en el país. Los proyectos actuales son Ahuachapán y Berlín a cargo de la empresa La Geo.

Nicaragua cuenta con una capacidad instalada de 157 *MW*, en la actualidad cuenta con dos campos geotérmicos en explotación Momotombo entro en operación en el año 1983 y tiene una capacidad de 85 *MW* y el campo de San Jacinto Tizate se explota desde el año 2005 y tiene una capacidad 72 *MW*. Cuenta con 10 zonas de interés que se entregaron a empresas privadas en concesión para que se realicen investigaciones geocientíficas y se proyecten en un futuro como campos explotación geotérmica.[27]

En América del sur se iniciaron estudios en 1970 y desde ese año se determinó que todos los países que están situados en lo largo de la cordillera de los Andes tienen un potencial geotérmico muy importante para generación de energía eléctrica; Argentina fue pionera en el año de 1988 con la planta piloto ubicada en Copahue que tenía una capacidad de generación eléctrica de 0,67 *MW* pero en 1997 fue abandonada.

Iniciando el año de 1990 el sector energético se puso a prueba, debido al alza de los precios en los combustibles fósiles y el calentamiento global generado por el calentamiento global, haciendo que las energías renovables tuvieran un auge a nivel global, haciendo que el cono sur, presente un impacto débil, sólo con la representación de Chile que genera energía eléctrica a partir de fuente geotérmica con una capacidad instalada de 40*MW*, contando además con una planta que inició operación en el año 2017 en Cerro Pabellón.

La Figura 2-5 da a conocer la capacidad instalada que tiene Latinoamérica. Haciendo referencia a los países que no se habían mencionado anteriormente, aparece Guatemala con 52 *MW*, seguido por Honduras con 35 *MW* y Guadalupe con 15 *MW*; Panamá ,Perú y Argentina tienen proyectos en desarrollo, Colombia y Ecuador en fases de exploración, Bolivia y Brasil tiene un potencial geotérmico el cual no se ha explorado a profundidad. Belice, Guayana, Paraguay, Venezuela, Uruguay y Surinam tienen su recurso geotérmico aún sin explorar [6].

La Figura 2-6 muestra los mapas de flujo de calor, de recurso base y recurso recuperable por área unitaria. Los puntos azules indican datos medidos, mientras que el retículo de puntos uniformemente distribuidos corresponde a datos estimados. Estos mapas nos dan conocer el gran potencial geotérmico que tiene Latinoamérica y como la energía geotérmica podría satisfacer la demanda de electricidad en todo el continente.

## 2.3. La Energía Geotérmica en Colombia

Colombia cuenta con un potencial geotérmico muy importante, tiene 20 volcanes activos con características hidrotermales y gradientes geotérmicos según las exploraciones petroleras de 65 °C/*km*. Las investigaciones[10] dan a conocer que alrededor del 20 % de la demanda de





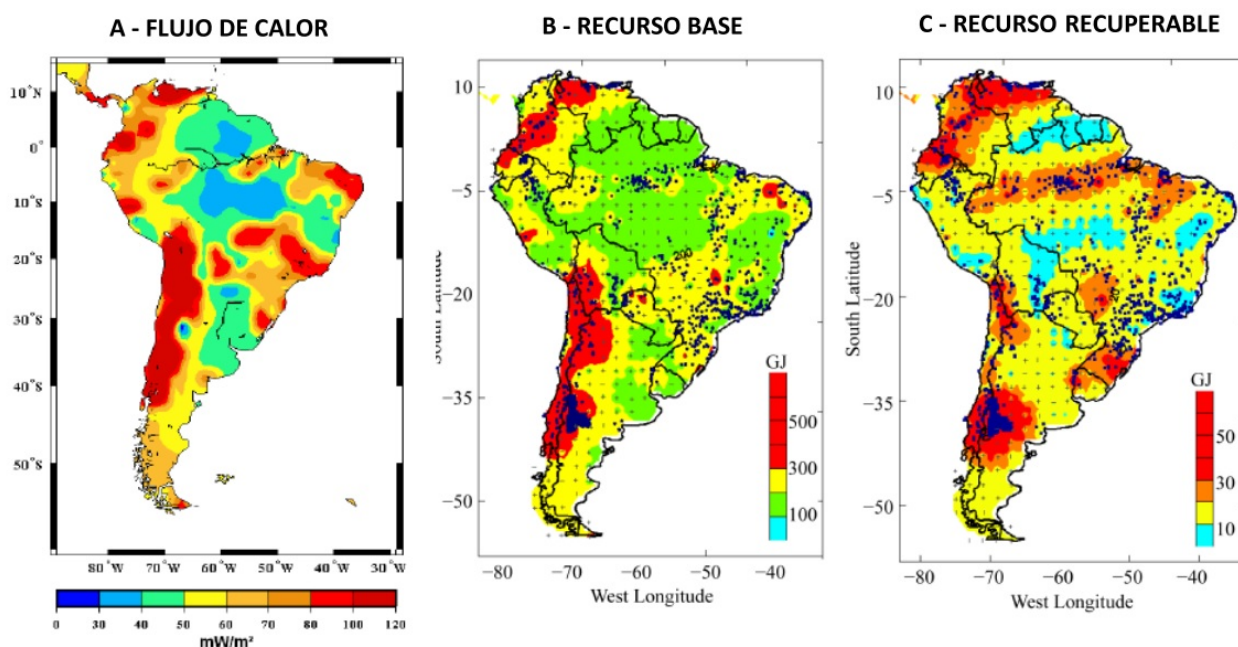
**Figura 2-5:** Capacidad Geotérmica Instalada en América Latina, [4].

energía podría satisfacerse utilizando recursos geotérmicos. Los primeros estudios inician en el año 1968, cuando el ente Nacional de electricidad de Italia (ENEL) recibe de la Central Hidroeléctrica de Caldas (CHEC) una concesión para realizar una investigación en el Nevado del Ruiz que concluyó presencia de zonas promisorias y recomendó continuar la exploración con estudios geológicos, geoquímicos y geofísicos, y hasta 1983 fueron retomadas las investigaciones por la CHEC, realizando un estudio de pre-factibilidad sobre todo el complejo del Nevado del Ruiz y seleccionó tres áreas Nereidas, Laguna de Otún y Volcán Machín.

En los años 90 CHEC hizo estudios adicionales con la empresa mexicana Geocónsul y Geoenergía Andina S.A. (GESA), en el área del Nevado del Ruiz haciendo la primera perforación de un pozo geotérmico en Colombia en Nereidas, teniendo una profundidad de 1466 m y una temperatura de 200°C, pero el proyecto no tuvo continuidad debido que no se presentaba permeabilidad en las rocas.

En 1997 el gobierno nacional encargó a INGEOMINAS, hoy en día Servicio Geológico Colombiano (SGC) un estudio completo de todo lo relacionado con energía geotérmica, tanto en investigación como en desarrollo de proyectos, obteniendo como resultados, entre otros, el mapa de potencial y gradientes geotérmicos, el mapa de fuentes termales, así como estudios

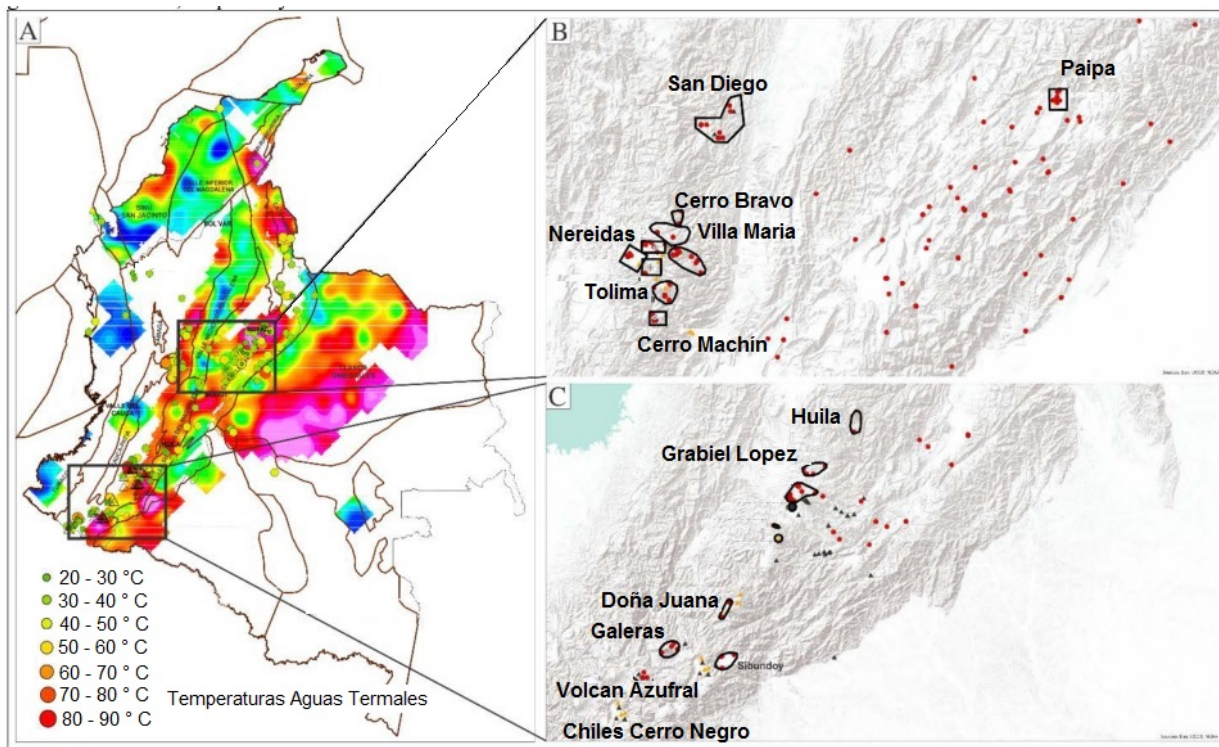




**Figura 2-6:** Distribución del Recurso Geotérmico en América del Sur [6].

geológicos, geoquímicos y geofísicos en varias de las áreas de mayor interés en el ámbito nacional. Las principales contribuciones se dieron en los prospectos del Volcán Azufreal, Paipa y en todo el sector del macizo volcánico del Ruiz [6].

En el siglo XXI las Empresas Generadoras de Electricidad (ISAGEN) y las Empresas Públicas de Medellín (EPM) retoman los estudios y las investigaciones realizadas en años anteriores, haciendo énfasis en los proyectos Tufiño - Chiles - Cerró Negro, proyectando la perforación de pozos exploratorios para la confirmación del recurso geotérmico en el área de estudio, también firmando en el año 2008 un acuerdo de cooperación con el SGC, Minciencias, la Unidad de Planeación Mineroenergética (UPME), Universidad Nacional de Colombia, la Agencia de Comercio y Desarrollo de EE.UU (USTDA) Y el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), identificando las siguientes áreas geotérmicas: Nevado del Ruíz, Santa Rosa, el Cerro Machín, San Diego, Paipa, Azufreal, Chiles-Cerro Negro y Dabeiba. Totalizando un potencial para la generación de electricidad como se presenta en la Figura 2-7 y sus principales características se encuentran resumidas en la Tabla 2-1.



**Figura 2-7:** Ubicación de los principales proyectos con perspectivas de desarrollo geotermoeléctrico en Colombia [6].

Área Geotérmica	Temperatura °C	Profundidad del recurso (m)	Altura (m.s.n.m)	Potencial (MWe)
Nevado del Ruiz	230	1438	3600	100
Santa Rosa	260	2000	4000	Desconocido
San Diego	160	3500	1150	Desconocido
Paipa	175-230	1750	2575	150
Volcán Azufral	220-240	2000	4070	0
Chiles-Cerro Negro	230	1500	4748	138
<b>Cerro Machín</b>	<b>200</b>	<b>1500</b>	<b>2650</b>	<b>75</b>

**Tabla 2-1:** Características de los Proyectos con Perspectivas de Desarrollo Geotermoeléctrico en Colombia [6].

El marco legal colombiano no cuenta con una legislación específica clara para la exploración, otorgamiento y administración de concesiones geotérmicas, no obstante cuenta con un marco jurídico regulado por el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Pro-

tección del Medio Ambiente que establece que la Nación se reserva el dominio de los recursos geotérmicos, considerando como posibles usos la producción de energía, la producción de calor directo para fines industriales o de refrigeración o calefacción, la producción de agua dulce, y la extracción de su contenido mineral. En el caso de la geotermia, la concesión del recurso implica también la concesión de uso de aguas para explotar la fuente geotérmica. También se encuentra la Ley 697 de 2001 de Fomento del Uso Racional y Eficiente de la Energía (URE) y la Ley 1715 del 2014, la cual establece incentivos fiscales para fomentar la investigación, el desarrollo y la inversión en el sector de las fuentes no convencionales de energía, previendo la detracción desde la renta anual del 50% de las inversiones realizadas durante 15 años, exención del Impuesto Nacional al Valor Agregado (IVA) y derechos de importación para equipos no producido localmente según la ley 1715 del 2014. El Actual Gobierno estableció en el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 una definición de un marco regulatorio para proyectos geotermiales, el SGC realizará estudios para caracterizar la potencial geotermal de Colombia.

### 2.3.1. El Volcán Cerro Machín

Es un volcán localizado en el departamento del Tolima Colombia, en la cordillera Central de los Andes a 150 *km* al suroccidente de Bogotá, a 17 *km* al oeste de Ibagué, 30 *km* al este de la ciudad de Armenia a una altura de 2750 *msnm*, a una latitud de 4.487 ° y una longitud -75,386 °, tiene tres accesos por los municipios de Cajamarca, Ibagué y Salento. Se caracteriza por su alta explosividad, es catalogado como un volcán activo con muchas semejanzas al Volcán Pinatubo ubicado en la isla de Luzón en las Filipinas y está dentro de los volcanes plinianos, que hacen erupciones magmáticas muy violentas, cuyas columnas alcanzan los 25 *km* a 30 *km* de altura; debido al largo periodo de aparente inactividad acumulan mucha presión que es vertida cada vez que explotan. Su cráter, de cerca de 2.5 *km*, posee una cantidad de montículos denominados domos de lava, que de alguna manera obturan el cráter del volcán, se clasifica como un volcán de cono compuesto, esto significa que su estructura alterna ceniza y lava. Geoquímicamente, su lava se caracteriza por ser supremamente ácida por su alto contenido de sílice [7].

El volcán Machín fue descubierto por el alemán Friedlaender en el año 1927, en las últimas dos décadas ha estado en vista de los entes gubernamentales y científicos, debido a la actividad sísmica que ha venido presentando en el edificio volcánico y sus alrededores. Esto se está registrando desde finales del año 1998 pero ha ido incrementándose. En el año 2007 se monitorizaron 381 movimientos telúricos de baja intensidad, en enero de 2008 fueron 492, en febrero 162, en marzo 80, en abril 747 y en mayo 437. Buena parte de esos microsismos tienen su origen en ruptura o quiebre de estructuras geológicas al interior del volcán y eso es lo preocupante. Se presentan otro tipo de señales de actividad volcánica como el aumento en la presencia de humo en las fumarolas, cambios en las emanaciones de gas Radón y posibles

deformaciones en uno de los domos que obstruye el cráter del volcán. El 23 de diciembre de 2015 se reportaron sismos en lugares cercanos al volcán información confirmada por el SGC. La Figura 2-8 presenta una fotografía del domo taponado y el borde del cráter del Cerro Machín.



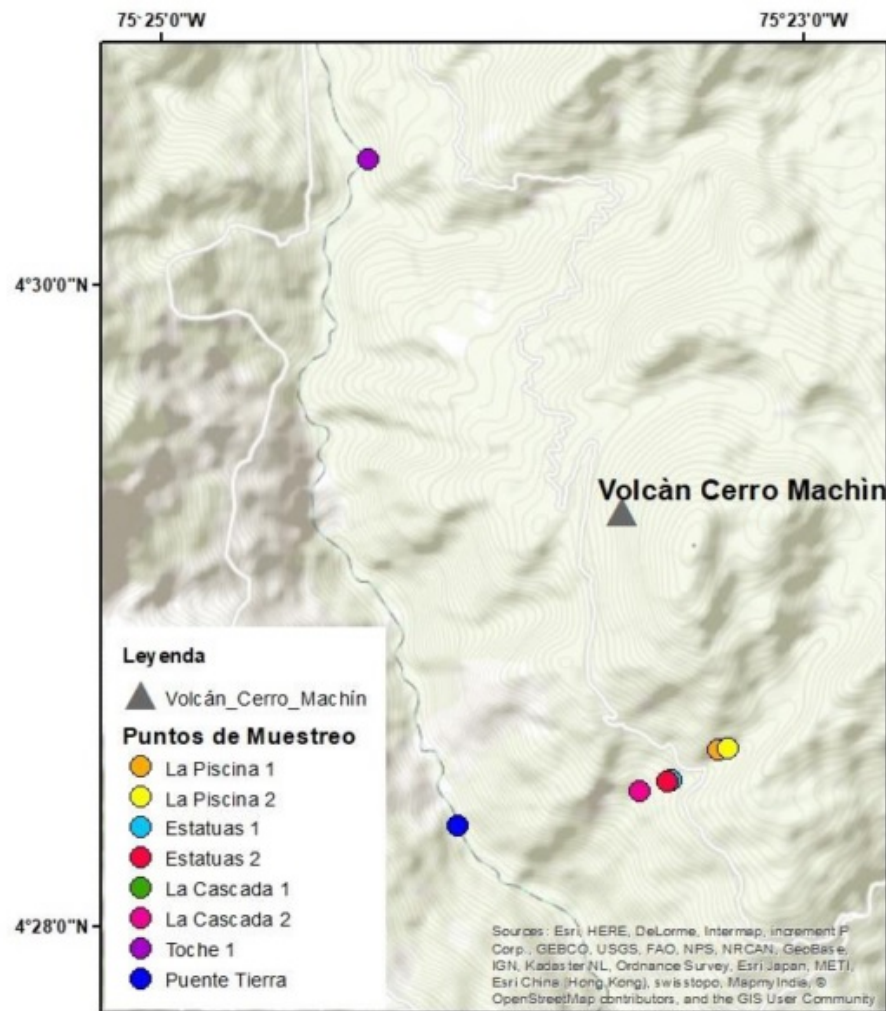
Figura 2-8: Volcán Cerro Machín [7].

Según los estudios realizados en los últimos años por el SGC, Universidades y asociaciones científicas, en el volcán Cerro Machín se identificaron los siguientes campos geotérmicos, a saber: La Piscina I, La Piscina II, Estatuas I, Estatuas II, Puente Tierra, La Cascada I, La Cascada II y Toche I. Se caracterizan por tener valores de  $PH$  entre 6.38 y 7.34, lo cual indica aguas neutras para la zona de estudio sin variaciones de temperatura debido a que no existen cambios químicos en la composición del suelo. La temperatura de las fuentes se encuentra en un rango que oscila entre  $42\text{ }^{\circ}C$  y  $90\text{ }^{\circ}C$ , con un valor promedio de  $73.24\text{ }^{\circ}C$ . Las aguas termales con mayor temperatura son las de los puntos de muestreo Estatuas I y La Cascada II, con valores de  $90\text{ }^{\circ}C$  y  $84.5\text{ }^{\circ}C$ , con un caudal entre 0.8 y 1 l/s, respectivamente. La de menor temperatura se obtuvo en el punto de muestreo Toche 1 con un caudal de l/s, esto indica circulación somera e interacción con aguas meteóricas[7].

Las aguas que presentan altas temperaturas indican una circulación rápida y profunda dentro del conducto volcánico, y tiene una relación de bajos tiempos de interacción del fluido



con la roca, y las que tienen temperaturas menores indican una circulación relativamente superficial, una de las causas de que se presente en algunos casos gradientes geotérmico bajos, es debido a que hay fuentes de agua fría que se mezclan con fluidos geotermales antes de alcanzar la superficie. La Figura 2-9: Mapa de localización de los pozos del Volcán Cerro Machín. Muestra de forma detallada cada una de las fuentes y la cercanía que hay entre ellas, exceptuando la de Toche I.



**Figura 2-9:** Mapa de localización de los pozos del Volcán Cerro Machín [7].

Los geotermómetros son una herramienta de bajo costo para obtener temperaturas de equilibrio en sistemas geotérmicos. Su técnica radica en el uso ecuaciones analíticas de forma empírica, provenientes de las bases de datos, tomados de la composición química y de temperatura medidas en pozos geotermales con seguimiento detallado y continuo. En el estudio que se realizó para poder obtener los resultados de la Tabla 2-2. Para determinar las principales características de los pozos del Volcán Cerro Machín se utilizaron los geotermómetros

Estación	<i>PH</i>	Temperatura superior ( $^{\circ}C$ )	Altura (m.s.n.m)	Caudal (L/s)	Temperatura Reservoirio ( $^{\circ}C$ ) Calcedonia conductiva	Temperatura Reservoirio ( $^{\circ}C$ ) Cuarzo Adiabático
La piscina 1	6,94	82	2240	0,25	186	187
La piscina 2	6,99	74	2232	0,8	232	218
Estatuas 1	6,97	90	2160	0,8	220	209
Estatuas 2	7,34	74	2161	0,8	200	197
Puente Tierra	7,32	57	1700	0,5	178	182
La Cascada 1	6,75	82,5	2062	1	158	168
La Cascada 2	6,98	84,5	2087	0,06	158	168
Toche I	6,38	42	2014	0,25	148	160

**Tabla 2-2:** Principales Características de los Pozos del Volcán Cerro Machín [7].

de Sílice y cationes Na – K - Mg, calcedonia conductiva y cuarzo adiabático; identificando los minerales solubles, para obtener un resultado sobre el equilibrio entre la interacción agua-roca y estimar temperaturas de reservorio.

Los ruidos, fumarolas y flujos que emergen del volcán corresponden al choque de dos fallas geológicas en su profundidad: Machín y Cajamarca. Los resultados obtenidos de campo por el SGC permiten reafirmar el control estructural de la falla de Cajamarca en dirección NE con componente dextral. Aunque varios estudios científicos han rastreado esta falla en el medio del volcán Cerro Machín, hasta ahora no se ha encontrado evidencia del cambio en la Orientación de la falla. En el sector del arroyo Agua tibia, se encontró un plano estriado en las cúpulas intracráticas, que en conjunto con el surgimiento de aguas termales en el mismo vapor, significaría un plano de debilidad en la misma dirección a Cajamarca falla y el sistema de fallas de Ibagué. El Grupo de Exploración de Recursos Geotérmicos del SGC está realizando los estudios de magnetotélúrico, y métodos potenciales (gravedad y magnetismo), junto con una nueva etapa de muestreo de agua y gases. Estos métodos deben realizarse durante los años 2019-2020 con el objetivo de reconocer la estructura resistiva del subsuelo y generar la modelo conceptual que describe esta área [8].

La Figura 2-10 presenta la Falla de Cajamarca y da a conocer los manantiales de agua termal, las tres salidas de vapor sobre el cráter (los círculos azules), los lugares donde hay presencia de ácido sulfhídrico ( $H_2S$ ) y la falla dextral que es el movimiento de las fallas de desplazamiento de rumbo que hace mover las rocas hacia la derecha.

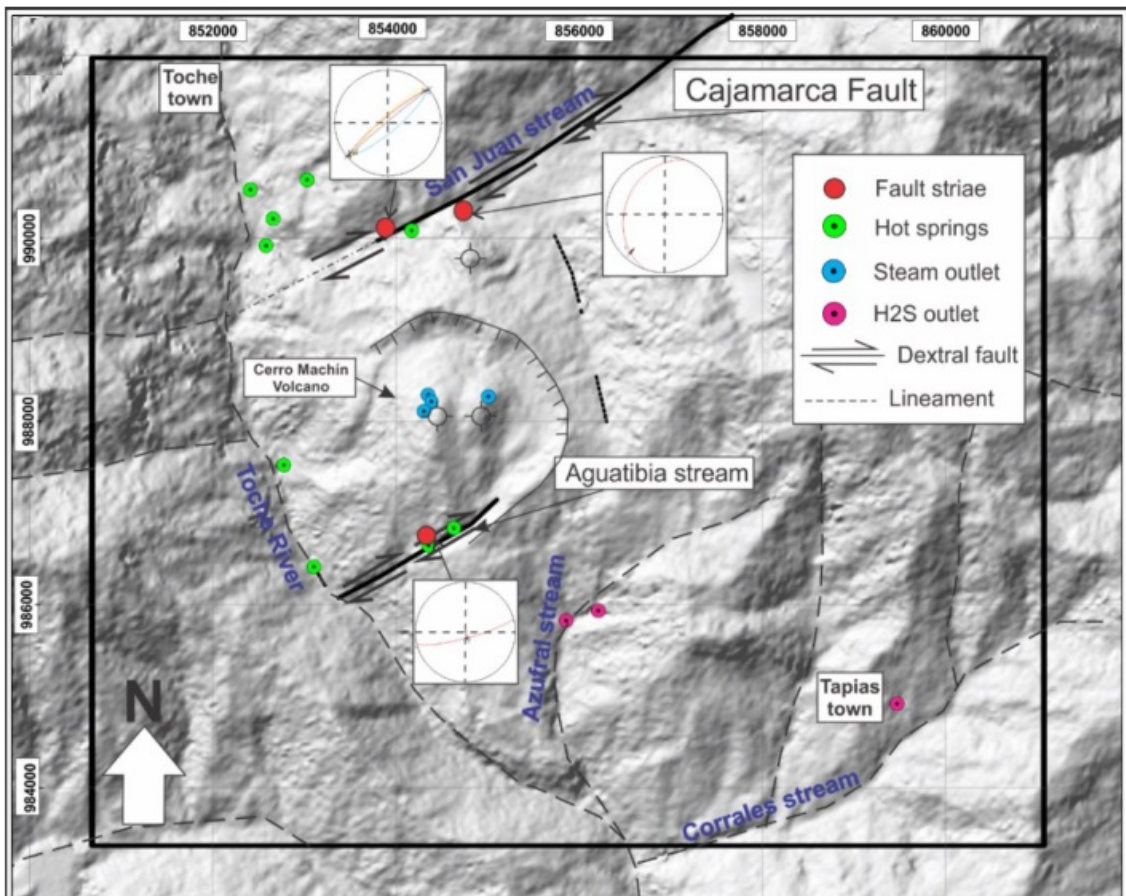


Figura 2-10: Falla de Cajamarca [8].

# 3 Los Sistemas de Generación Geotérmica

El planeta Tierra internamente nunca está en reposo y mucho menos es frío esta constituido por un sistema operante que percibe y trasmite energía al medio que le rodea, y el calor es la principal fuente de esa energía. Todos los sucesos geodinámicos que ocurren en el planeta, desde los más superficiales, hasta los volcanes, los terremotos y el metamorfismo, son controlados por la transferencia y generación de calor en su interior. El calor es el motor de la tectónica de placas, que involucra a la litosfera y a la astenósfera, y de otros procesos a mayor profundidad, como los movimientos de convección entre el manto y el núcleo externo.[28]

## 3.1. Geotermia

*Geotermia* es una palabra de origen griego, emana de “geos” que quiere decir *tierra*, y de “thermos” que significa *calor*. Se utiliza para la ciencia que estudia los fenómenos térmicos internos del planeta como al conjunto de procesos industriales que utiliza ese calor para producir energía eléctrica, calefacción, esterilización y procesos agroindustriales [29]. Desde su interior hasta la superficie, el planeta tierra está compuesto por tres capas sucesivas de temperatura decreciente que se muestran de manera detallada en la Figura 3-1.

El núcleo del planeta tierra es sólido en su parte interna y líquido en su exterior, su temperatura puede llegar a los  $4.200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . El manto está cubierto con temperaturas que oscilan desde los  $3.000\text{ }^{\circ}\text{C}$  a  $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$  y tiene una textura plástica hacia el centro que se vuelve sólido hacia la superficie. La corteza, es la cubierta superficial su temperatura varía desde los  $1.000\text{ }^{\circ}\text{C}$  en su contacto con el manto, hasta los  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  de la superficie terrestre y cuenta con un espesor que varía desde  $5\text{ km}$  a  $20\text{ km}$  en las profundidades oceánicas, y desde  $30\text{ km}$  a  $70\text{ km}$  bajo los continentes. [14].



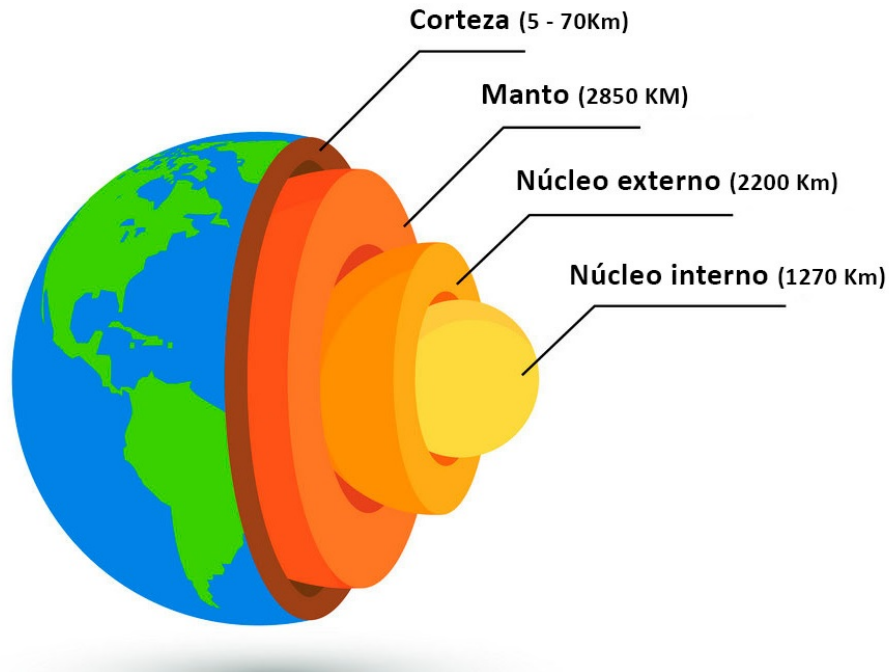


Figura 3-1: Capas terrestres [8]

### 3.1.1. Manifestaciones geotérmicas.

En el planeta tierra, determinadas zonas de la litosfera están sujetas a tensiones que producen calor y presión en grandes magnitudes, teniendo como consecuencia fracturas y fallas por las cuales pueden ascender desde el manto, magmas, masas de rocas incandescentes, en estado de fusión total o parcial, con pequeñas cantidades de materias volátiles como agua, gases, ácido sulfúrico y clorhídrico.

Si las condiciones tectónicas son propicias, la lava pueden ejercer un empuje hacia la superficie de la tierra, formando volcanes que producen lava, cenizas y gases. La cantidad de magma expulsada por un volcán, en una erupción, significa que permanece debajo de la tierra un volumen 10 veces mayor al arrojado, formando cámaras magmáticas que calientan las rocas circundantes que pueden estar fracturadas o ser permeables, y existe circulación de agua subterránea, esta última capta el calor de las rocas, pudiendo ascender hasta la superficie a través de grietas o fallas, dando lugar a la formación de aguas termales, géiseres, fumarolas y volcanes de fango [14].

**Volcanes:** Los volcanes son las manifestaciones superficiales visibles del calor de la Tierra, son los que han promovido la investigación científica y el estudio de la energía geotérmica. Contienen una abertura en la corteza terrestre por la cual sale lava, vapor y cenizas.

**Aguas termales:** Son manantiales naturales de los que brota agua con temperaturas que oscilan desde los  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  hasta los  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

**Géiser:** Surtidor intermitente de agua líquida mezclada con vapor de agua, a una temperatura entre  $70$  y  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , con gran cantidad de sales disueltas y en suspensión.

**Fumarolas:** Agujeros que emiten gases y vapor de agua a temperaturas que oscilan entre los  $100\text{ }^{\circ}$  y los  $500\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 3.2. La Energía Geotérmica y el Desarrollo Sostenible

La política energética constituye una especificación sectorial de la socioeconómica de largo plazo tendiente a inducir una cierta orientación al proceso de desarrollo. Dada la importancia de la energía como elemento determinante de la calidad de vida de la población, como insumo imprescindible y difundido sobre todo el aparato productivo, como destino de una considerable magnitud de las inversiones requeridas por el sistema de abastecimiento y atendiendo a la fuerte interacción con el medio ambiente, tanto por el uso intensivo de los recursos naturales como por los impactos derivados de su producción, transporte y utilización, la política energética desempeña un rol de especial significación dentro de las políticas de desarrollo.[30]

La energía geotérmica es el recurso energético más grande que existe en el planeta. Aunque la Tierra pierde calor, la regularidad de ese enfriamiento es de unos  $0.13\text{ }^{\circ}\text{C}$  cada año, debido a esto se considera, que el potencial geotérmico es ilimitado; si lo comparamos con energías fósiles que se agotan a medida que se explotan.

Ningún montaje industrial que utilice energía geotérmica emplea combustibles fósiles, por ello, no emite gases de efecto invernadero. Las bombas de calor que se usan para refrigeración calefacción, y producción de agua caliente residencial e industrial, sólo consumen electricidad para el funcionamiento de los compresores, las bombas de circulación y los ventiladores al interior de las edificaciones. Cada día son más eficientes y presentan una tendencia a disminuir el consumo eléctrico. Si se hace un paralelo con la energía solar, eólica e hidráulica y se compara con la geotérmica se concluye que no depende del clima, de la radiación solar ni del viento, está disponible 24 horas al día, 365 días al año pero depende las características del suelo y subsuelo. Los coeficientes de disponibilidad de las centrales geotérmicas eléctricas son del 90 % de media, y en redes de calefacción se puede alcanzar el 100 % [31].

En el marco legal Colombia no cuenta con una legislación específica clara para la exploración, otorgamiento y administración de concesiones geotérmicas, no obstante cuenta con un marco jurídico regulados por el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente, establece que la Nación se reserva el dominio de los recursos geotérmicos, considerando como posibles usos la producción de energía, la producción de calor

directo para fines industriales o de refrigeración o calefacción, la producción de agua dulce, y la extracción de su contenido mineral. En el caso de la geotermia, la concesión del recurso implica también la concesión de uso de aguas para explotar la fuente geotérmica. También se encuentra la Ley 697 de 2001 de Fomento del Uso Racional y Eficiente de la Energía y la Ley 1715 del 2014 establece incentivos fiscales para fomentar la investigación, el desarrollo y la inversión en el sector de las fuentes no convencionales de energía prevén la detracción desde la renta anual del 50 % de las inversiones realizadas dura.

En Colombia para el estudio de pre factibilidad de un proyecto geotérmico se deben tener clara sus políticas publicas donde la energía geotérmica esta respaldada por ley 1715 del año 2014 ley tiene por objeto promover el desarrollo y la utilización de las fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable, en el sistema energético nacional, mediante su integración al mercado eléctrico. También esta resolución 030 del 2018 CREG Comisión reguladora de energía y gas , por las cuales se regulan las actividades de autogeneración a pequeña escala y de generación de distribuida en el sistema interconectado nacional.

La agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, que tiene 17 objetivos lo cual este proyecto cumple con el numero 7 energía asequible y no contaminante, 8 trabajo decente y crecimiento económico,9 industria innovación e infraestructura y el 11 ciudades y comunidades sostenibles

### **3.3. Aplicaciones y Tipos de energía Geotérmica**

El uso de la energía geotérmica depende de su contenido de calor o entalpía, que se define como la cantidad de energía térmica que un fluido, o un objeto, puede intercambiar con su entorno, sus unidades en sistema internacional son  $kJ/kg$  o  $kcal/kg$  y no cuenta con instrumentación para poder medirla de forma directa del subsuelo, por esta razón se utilizan sondas térmicas que sirven para determinar la temperatura del fluido y poder establecer el tipo de recurso según las escalas de temperatura y de esta manera indicar aplicación que se le puede dar al campo geotérmico esto se explica de forma detallada en la Tabla **3-1** Aplicaciones de la energía geotérmica según la temperatura del recurso.

Temperatura del recurso geotérmico	Vivienda Ocio y Salud	Agricultura y Alimentación	Industria
Baja ( 30°C -90°C)	Calefacción con bombas de calor	Piscicultura	Pre calentamiento de agua y aire
	Piscinas	Invernaderos	Deshielo
	Termalismo	Pre calentamiento de agua y aire	
	Esterilización en hospitales y Hoteles		
Media (90°C -150°C)	Calefacción Urbana	Secados de productos Agrícolas y Maderas.	Mantenimiento de obras civiles
		Transformación de materias primas	Lavado de Lanas
			Secado de productos industriales
			Producción de electricidad por ciclo binario
Alta ( 150°C - 400°C)	Ninguna	Fábricas de conservas	Recuperación de metales
			Destilación de agua dulce
			Producción de electricidad por ciclo Flash
			Refrigeración por absorción por amoníaco

Tabla 3-1: Aplicaciones de la Energía Geotérmica Según la Temperatura del Recurso [14].

### 3.4. Yacimientos Geotérmicos.

#### 3.4.1. Yacimientos de Muy Baja Temperatura.

El planeta tierra esta compuesto en su gran parte por yacimientos de recursos geotérmicos de muy baja temperatura, menos de 30 °C, que están detenidos por la presencia de aguas subterráneas y corrientes marinas. Según estudios realizados se determino que en cualquier lugar de la superficie del planeta se puede aprovechar el calor almacenado en las capas superficiales del subsuelo,

El suelo intercambia calor con la atmósfera y presentan los cambios de temperatura a una profundidad de 0,5 m. permaneciendo estable, entre 7 °C y 13 °C, esto es debido al calor

recibido del Sol, que calienta la corteza terrestre.

Los yacimientos de muy baja temperatura tiene variaciones que son perceptibles en el terreno hasta una profundidad de 10 m a 15 m. A partir de ahí y con poca circulación de agua subterránea, el subsuelo es capaz de almacenar el calor que recibe y mantenerlo incluso estacionalmente, de forma que el terreno permanece a una temperatura prácticamente constante durante todo el año [14].

### 3.4.2. Yacimientos de Baja Temperatura.

Los Yacimientos geotérmicos de baja temperatura, están entre 30 y 100 °C, se encuentran en áreas geológicas con presencia de acuíferos profundos. Su explotación esta en extraer agua caliente del acuífero e inyectarla fría por medio de bombas e intercambiadores calor como se representa en la Figura 3-2 . Tiene usos directos en invernaderos ,sistemas de calefacción residenciales y en procesos industriales.

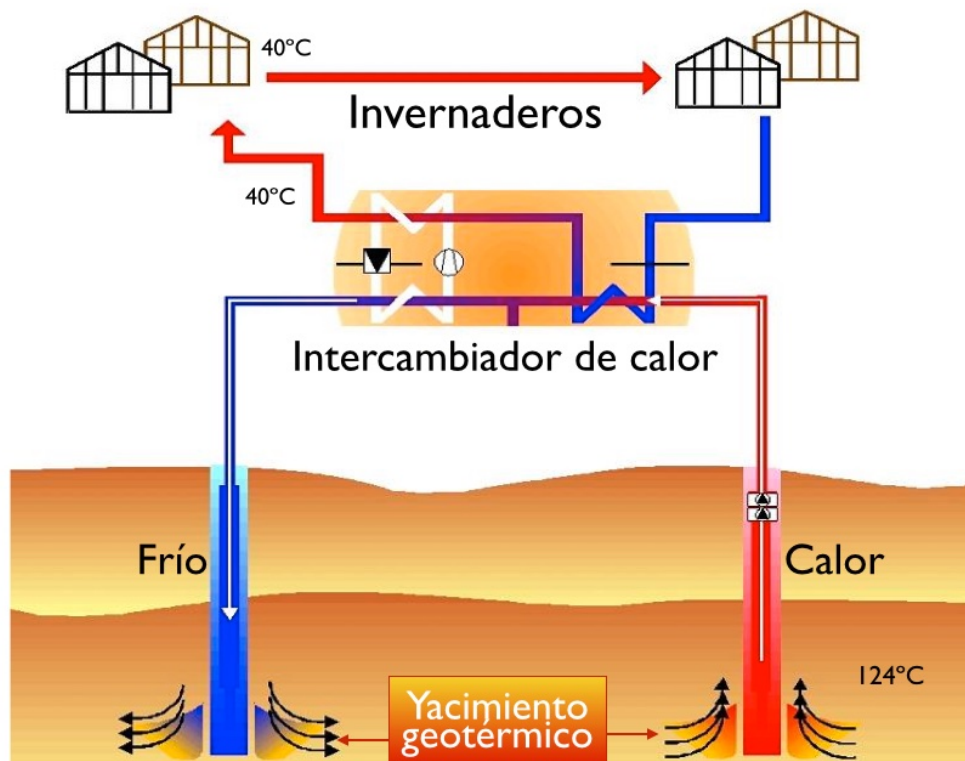


Figura 3-2: Yacimientos de Baja Temperatura [9].

### 3.4.3. Yacimientos de Media Temperatura.

Los yacimientos de media temperatura están comprendidos entre  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  y  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$  se encuentran en cuencas sedimentarias, como los de baja temperatura, pero a profundidades entre  $1500\text{ m}$  y  $4.000\text{ m}$ ; en zonas de adelgazamiento litosférico; o los lugares geológicos que se encuentran yacimientos de alta temperatura, pero a menos profundidad, evidenciando su presencia mediante aguas termales. Tiene las mismas aplicaciones directas que los yacimientos de baja temperatura pero adicionalmente se pueden aprovechar para la generación de electricidad utilizando plantas binarias donde su principio de funcionamiento se explica en la Figura 3-6.

### 3.4.4. Yacimientos de Alta Temperatura.

Los yacimientos de alta temperatura están comprendidos entre los  $170^{\circ}\text{C}$  en adelante, se encuentran en zonas geográficas con gradiente geotérmico elevado, hasta  $30^{\circ}\text{C}$  cada  $100\text{ m}$ . Están ubicados en áreas con actividad sísmica elevada, formación de cordilleras y actividad volcánica reciente. Se suelen explotar a profundidades comprendidas entre  $1.500$  y  $3.000\text{ m}$ , su uso es únicamente para la generación de electricidad utilizando plantas Flash donde su principio de funcionamiento se explica en la Figura 3-5.

## 3.5. Generación de Electricidad

Los yacimientos geotérmicos de media y alta temperatura se utilizan para generar electricidad mediante un ciclo similar al utilizado en las centrales termoeléctricas convencionales; dependiendo de las características del recurso, la generación se realiza mediante turbinas de vapor convencionales ciclo Rankine y plantas de ciclo binario.

En la Figura 3-3 se puede visualizar cómo es funcionamiento de general de una Planta de energía geotérmica. En el inicio del ciclo se toma del pozo agua saturada por medio de una bomba o vapor sobrecalentado que se hace pasar por una tubería que lo lleva a un intercambiador de calor, que se encargar de garantizar que entre a la turbina la sustancia en estado gaseoso, la cual esta conectada de forma paralela a un alternador que es el que genera la electricidad. El vapor que sale de la turbina, se trasporta hasta un condensador para cambiarlo de estado a liquido comprimido, para dirigirlo por medio de una bomba de agua a la torre de refrigeración y allí vuelve hacer inyectado a la tierra [14].

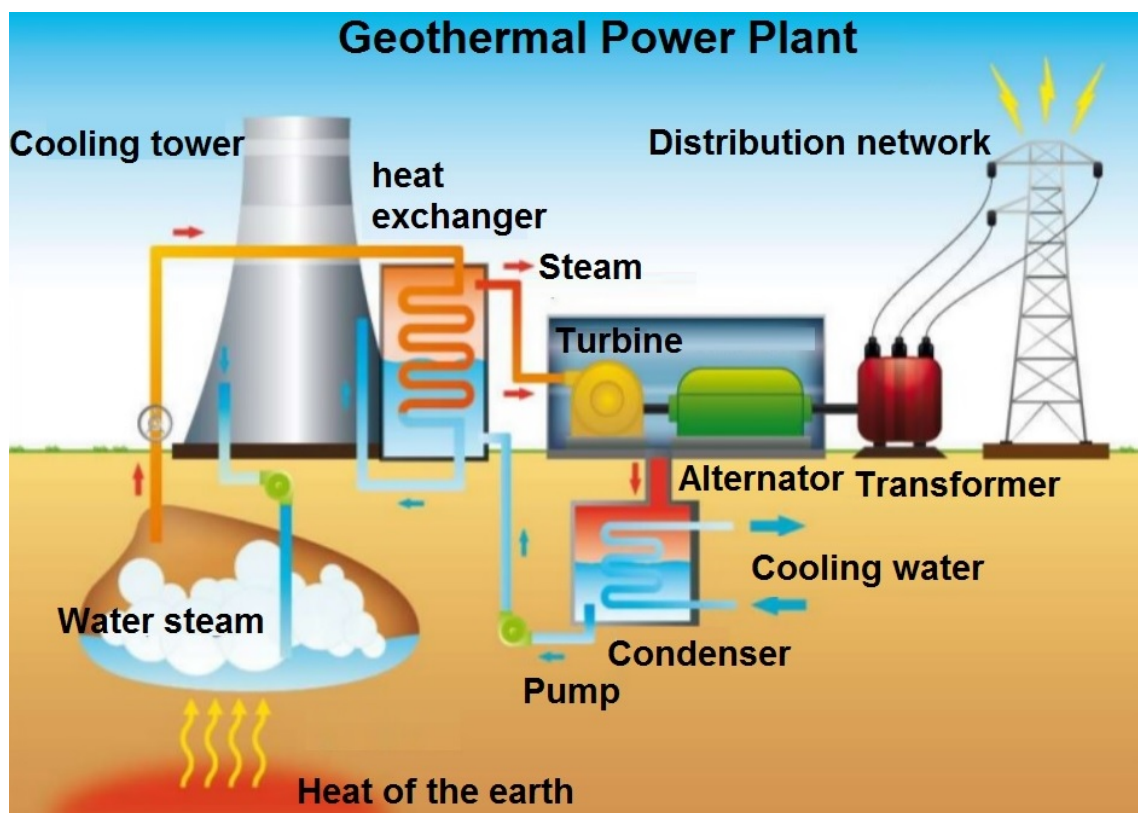


Figura 3-3: Planta de Energía Geotérmica [8].

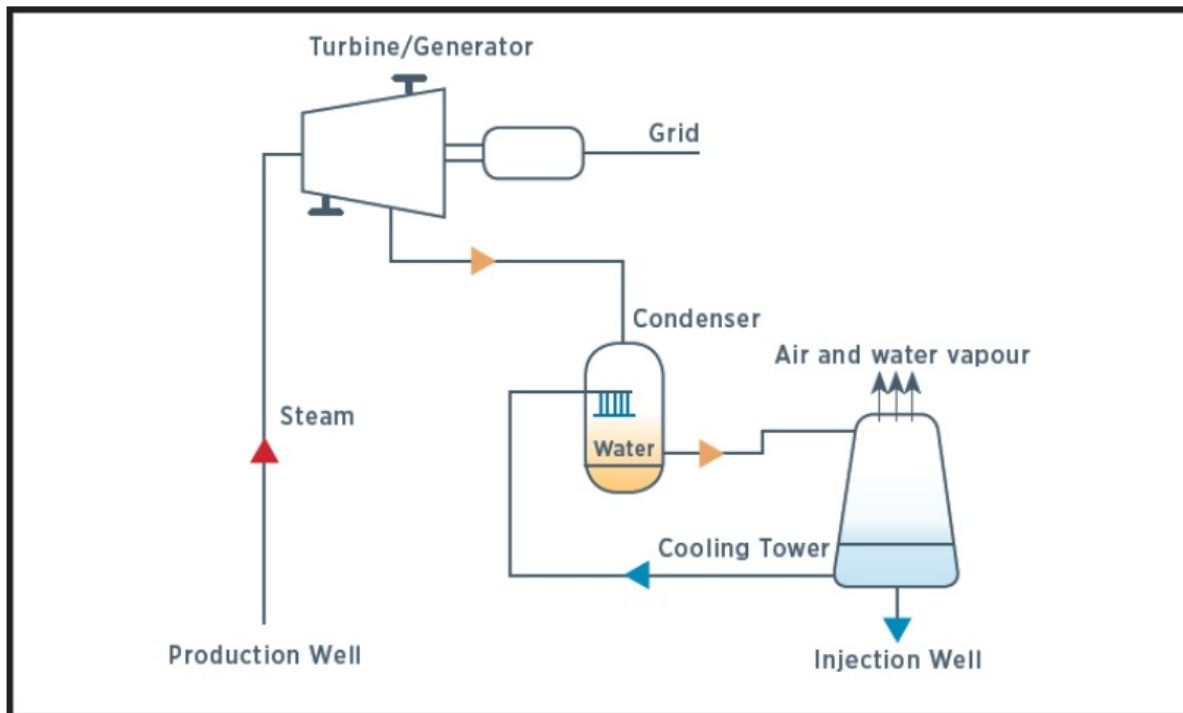
La generación de electricidad a partir de la energía geotérmica se puede realizar utilizando varios tipos de centrales eléctricas, entre los principales tipos de plantas se encuentran la tipo binaria, la tipo flash individual, y la de vapor seco; esto dependiendo del tipo de recurso que se obtiene en la fase de exploración.

### 3.5.1. Plantas Geotérmicas de Vapor Seco

Las plantas geotérmicas de vapor seco toman el vapor directamente del yacimiento, por medio de una tubería haciéndolo pasar primero por un filtro para retener cualquier impureza, después es conducido a la turbina la cual está conectada de forma paralela a un alternador que es el que genera la electricidad. El vapor que sale de la turbina, se transporta hasta un condensador para cambiarlo de estado a líquido comprimido. Finalmente, el agua es reinyectada al yacimiento para volver a ser calentada en un proceso posterior. En la Figura 3-4 se representa el esquema de la planta de vapor seco.

Este tipo de plantas tiene eficiencias muy bajas debido a que no se garantiza la entrada de vapor sobrecalentado a la turbina, sino que en estado de mezcla y ésta sufre mucho

desgaste por el impacto de las partículas de agua a presión, lo que conlleva un elevado costo de mantenimiento [10].

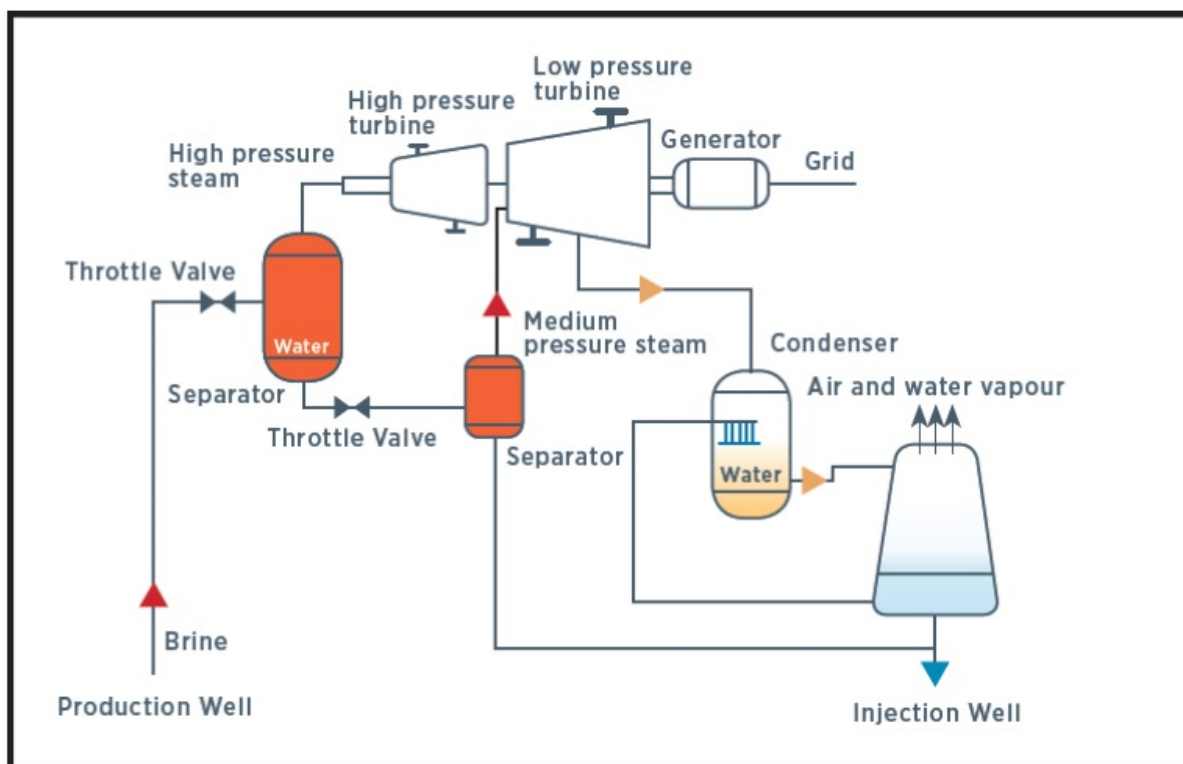


**Figura 3-4:** Esquema de una Planta Geotérmica de Vapor Seco [10].

### 3.5.2. Planta Geotérmica tipo Flash

Las plantas geotérmicas tipo Flash toman una mezcla de vapor y líquido a una presión que depende del pozo y de la temperatura del estado de saturación, el fluido se dirige a unos separadores, donde la fracción de vapor se lleva a la turbina para producir electricidad y la líquida se rechaza, esto se muestra en la Figura 3-5 [10].





**Figura 3-5:** Esquema de una planta Geotérmica tipo Flash [10].

### 3.5.3. Plantas Geotérmicas de Ciclo Binario

Las plantas de ciclo binario se utilizan cuando se presentan temperaturas entre  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Se caracterizan por que utilizan dos fluidos de manera paralela, el primero es el vapor sobrecalentado extraído del pozo que por medio de una tubería es conducido a un intercambiador de calor como se muestra en la Figura 3-6. luego el fluido secundario, que es un refrigerante de bajo punto de ebullición y alta presión es conducido a la turbina la cual esta conectada de forma paralela a un alternador que es el que genera la electricidad. El vapor que sale de la turbina, se transporta hasta un condensador para cambiarlo de estado a líquido comprimido, para dirigirlo por medio de una bomba de agua a la torre de refrigeración y allí vuelve hacer inyectado a la tierra.[10]

La eficiencia de las plantas binarias ha ido aumentando durante los últimos años. En sus inicios se obtenían eficiencias cercanas al 10%, sin embargo al día de hoy, eficiencias entre un 45% a un 60% han sido alcanzadas. Esto depende principalmente de la temperatura de entrada del fluido la variación de la eficiencia: Si se modifica la temperatura de entrada del fluido geotérmico, es posible determinar el rango de operación óptima para cada uno de los ciclos de calor. Por lo tanto, si se cuenta con un recurso geotérmico por debajo de los  $146\text{ }^{\circ}\text{C}$

la opción más eficiente será usar una planta de ciclo binario modificado y, si por el contrario, se tiene un recurso geotérmico con una temperatura mayor, lo recomendable es usar una planta basada en un ciclo binario convencional.

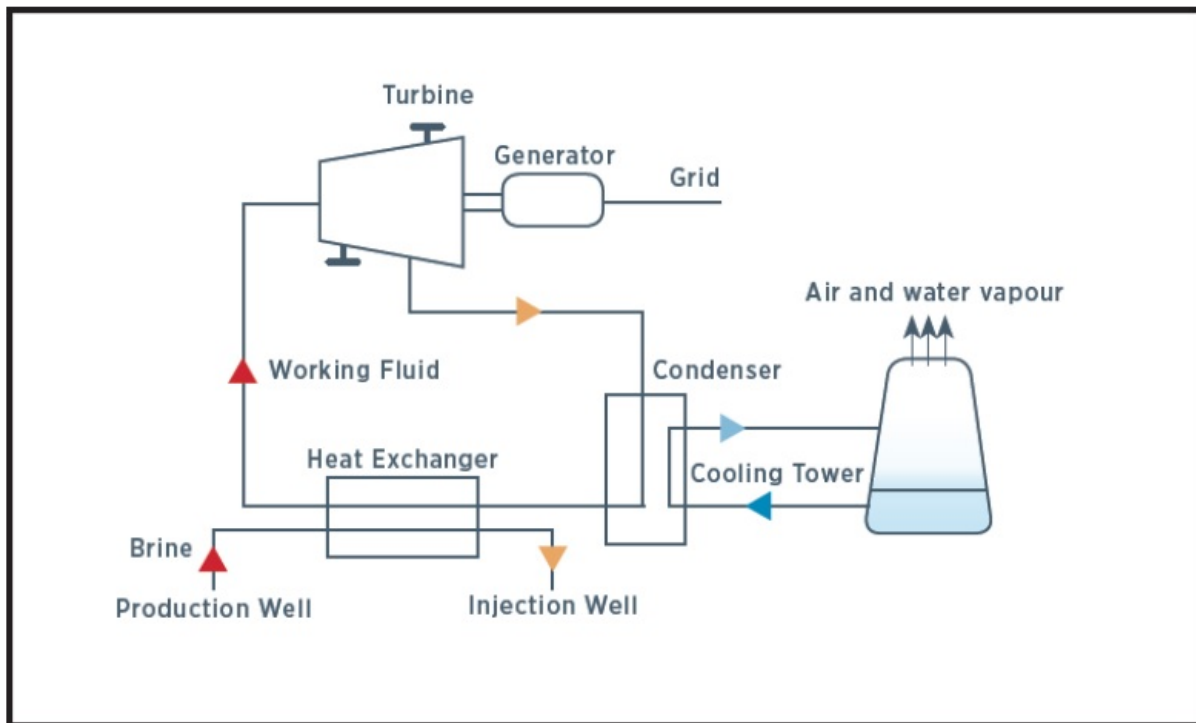


Figura 3-6: Esquema de una planta Geotérmica Binaria [10].

### 3.5.4. Planta Geotérmica Híbrida

Las plantas híbridas utilizan un ciclo combinado como se representa en la Figura 3-7 el cual es el Rankine para producir electricidad, el cual la pérdida de calor de la turbina es aprovechada por un ciclo binario. Con dos ciclos es posible alcanzar una alta eficiencia eléctrica. El tamaño típico de las plantas de ciclo combinado varía desde 2 MW hasta 10 MW. Las plantas de generación geotérmicas híbridas funcionan de la misma manera que una planta geotérmica pero combinan diferentes fuentes de calor en el proceso. Ese calor es adherido al ciclo geotérmico, incrementando la temperatura y la generación de energía.[10]

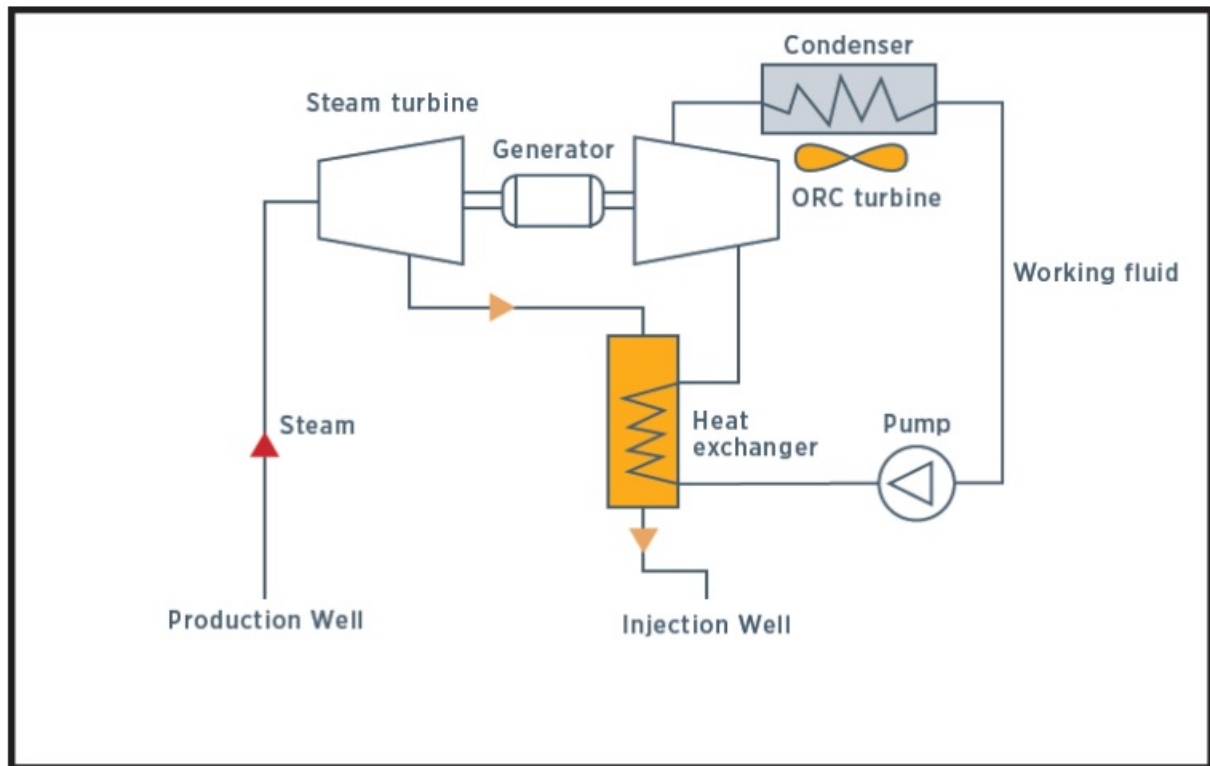
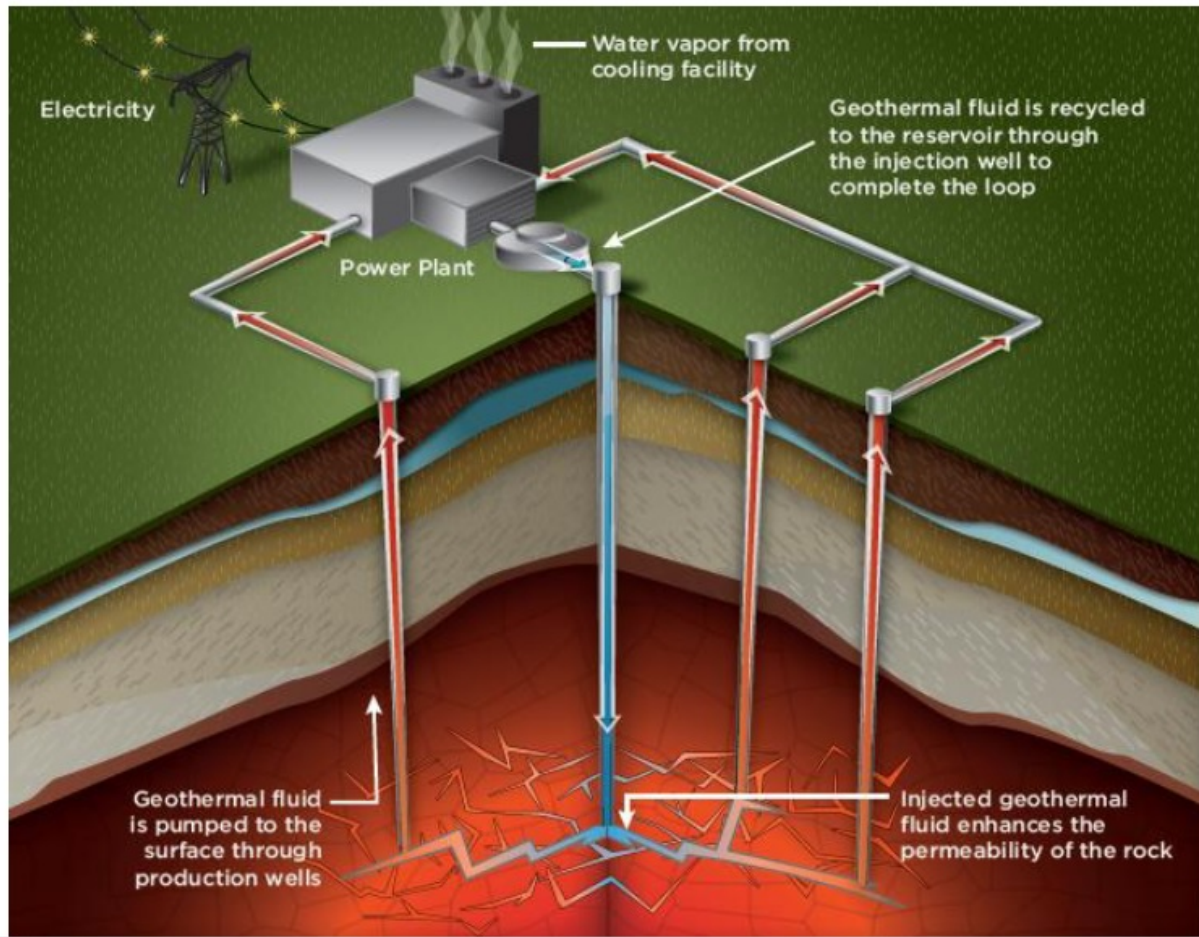


Figura 3-7: Esquema de una Planta Geotérmica Híbrida [10].

### 3.5.5. Planta Geotérmicas Estimuladas

Las plantas Sistema Geotérmico Mejorado (Enhanced Geothermal System - EGS) funcionan a profundidades entre 3.000 m a 5.000 m, primero que todo perforand y después inyectando agua en el pozo para aumentar el tamaño de las fisuras. El agua, que se introduce a presión, se calienta en su viaje hacia las profundidades hasta llegar a los 200 °C y a través de los pozos de producción se bombea hasta la superficie para generar electricidad por medio de los ciclos que ya se conocen habitualmente. La Figura 3-8 nos muestra un esquema de un EGS, el cual es definido por tres elementos clave: el calor, el agua con la que se debe contar para inyectar y la profundidad de permeabilidad. Se caracteriza por ser un reservorio artificial creado por el ser humano en lugares donde existen fuentes de calor cuyas rocas poseen insuficiente o poca permeabilidad o fluido saturado [10].

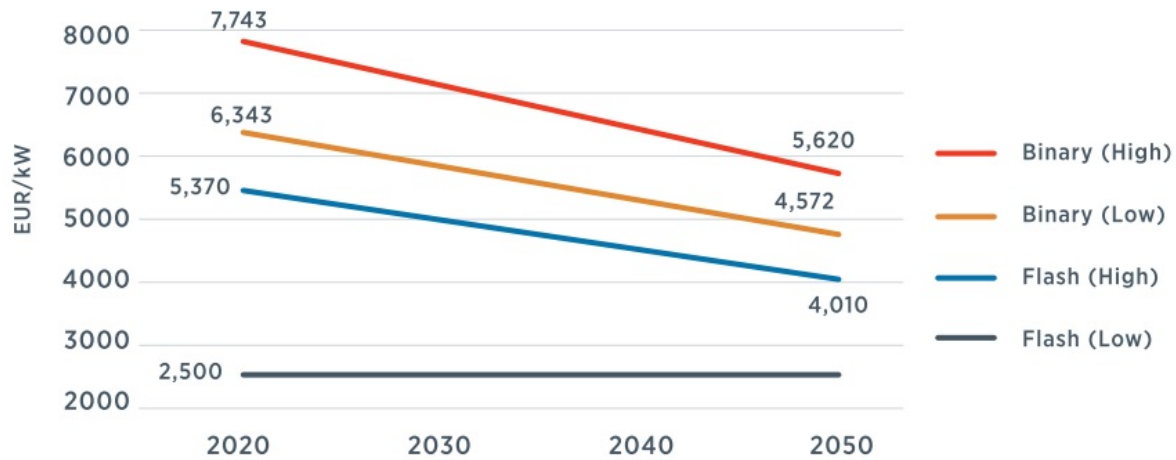


**Figura 3-8:** Esquema de una Planta Geotérmica Mejorada (EGS) [10].

### 3.6. Costo Nivelizado de la Energía en una Planta de Energía Geotérmica

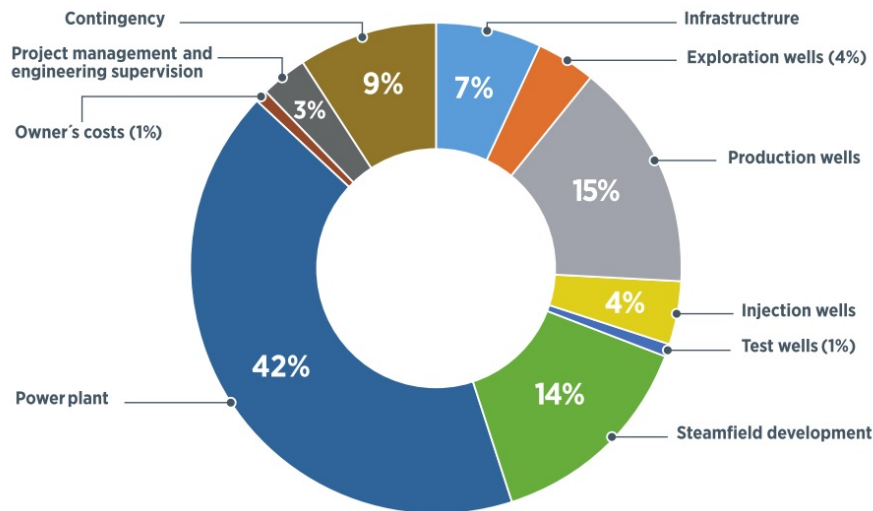
Los proyectos de energía geotérmica se caracterizan por sus fases, tiempo, capital y bajos costos en mantenibilidad. Los costos totales instalados de una planta de energía geotérmica oscilan entre entre USD 1870 por  $kW$  y USD 5050 por  $kW$  y puede variar, debido a está razón están divididos por fases, reconocimiento del recurso, estudio de prefactibilidad, factibilidad de explotación, diseño del Campo geotérmico, esquema de explotación, construcción de la planta, operación y mantenimiento cada una de estas presenta una incertidumbre alta media y baja. La Figura 3-13 representa una incertidumbre más alta es en las tres primeras fases debido a que durante el proyecto ésta es muy susceptible debido al gradiente geotérmico donde se encuentre el área de estudio.





**Figura 3-10:** Pronóstico de Gastos de Capital (CAPEX) para una Planta de Energía Geotérmica en la Unión Europea [11].

La Figura 3-11 presenta el costo estimado desglosado para el desarrollo de una planta de energía geotérmica flash de 110 MW, con costos totales de instalación de alrededor de USD 3 830 por kW.



**Figura 3-11:** Desglose del Costo Total de una Planta Geotérmica de 110 MW [11].

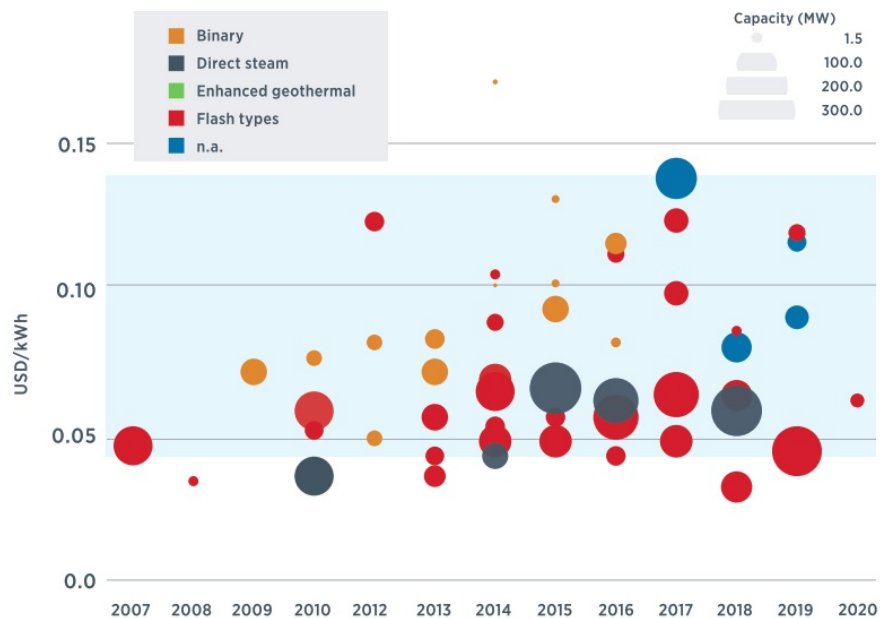
Los costos de la planta e infraestructura ascienden a 49% de los costos totales de instalación; perforación exploración, producción e inyección, los pozos representan alrededor del 24%;



### 3.6 Costo Nivelizado de la Energía en una Planta de Energía Geotérmica 35

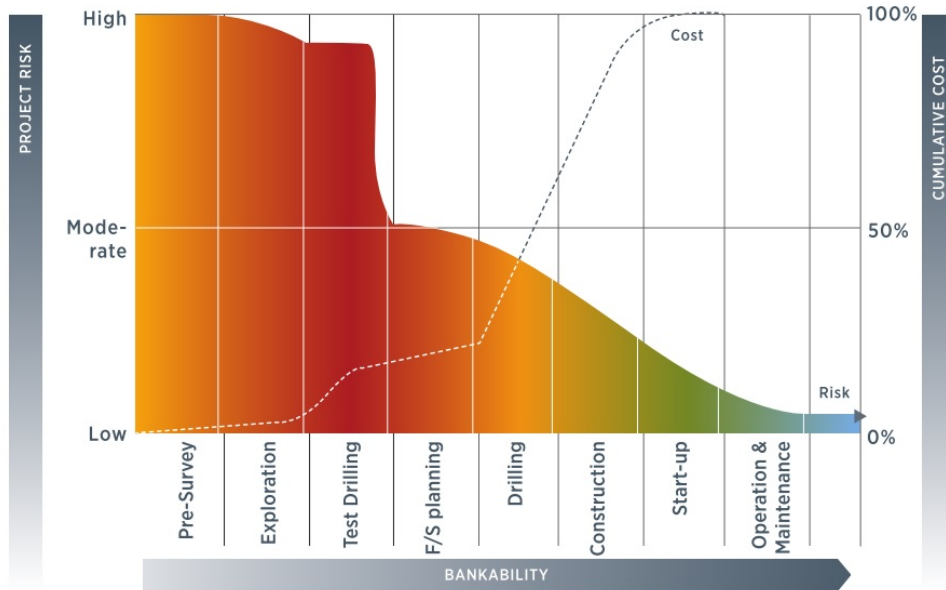
mientras que el desarrollo del campo de vapor representa 14%. El estudio evidencio que el 55% de los costos totales instalados corresponden a la planta de energía y otra infraestructura, mientras que la exploración, la perforación y el campo ascienden al 20% para plantas flash y 35% para plantas binarias. Las plantas pueden mejorarse explotando subproductos como calor, sílice o dióxido de carbono.

La Figura 3-12 muestra el Costo Nivelizado de Energía LCOE para proyectos geotérmicos de una duración de 25 años de vida económica, costos de operación y mantenimiento de USD 110 por  $kW$  año, factores de capacidad basados en planes de proyectos. El LCOE observado de energía geotérmica de las las plantas oscilaron entre USD 0,04 por  $kWh$  para el desarrollo de una segunda etapa de un campo a USD 0,14 por  $kWh$ .



**Figura 3-12:** LCOE a Nivel de Proyecto Geotérmico por Tecnología y por Año [11].

La Figura 3-13 da a conocer los perfiles típicos de incertidumbre y gasto para un proyecto geotermico. En las fases de prefactibilidad, exploración y perforación de prueba, cuenta con una mayor incertidumbre que esta directamente proporcional asociada con el riesgo de que el proyecto no sea exitoso con un porcentaje del 85% al 100% pero la inversión es muy baja oscilando entre un 5% a un 15% del total del costo del proyecto.



**Figura 3-13:** Perfiles Típicos de Incertidumbre y Gasto para un Proyecto Geotérmico [11].

Las fases de planeación, taladrado e instalación de la planta tiene un riesgo del 20 % al 40 % y una inversión del 60 % al 80 %.



# **4 Dimensionamiento del Modelo de la Planta GT para el Volcán Cerro Machín usando SAM**

## **4.1. System Advisor Model (SAM).**

El System Advisor Model (SAM) es un modelo de software tecnoeconómico que ha sido desarrollado para favorecer los proyectos de energías renovables ,es utilizado en todo el mundo para la planificación y evaluación de programas de investigación ,desarrollo de los costos y las estimaciones de rendimiento, así como para la investigación académica. que facilita la toma de decisiones para las personas que están involucrados en el mundo de las energías renovables, como lo son gerentes de proyectos e ingenieros ,analistas de políticas ambientales, desarrolladores tecnológicos, investigadores y científicos.

SAM ha sido desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory (NREL), en colaboración con Sandia National Laboratories, y en colaboración con U.S. Department of Energy (DOE) y el Solar Energy Technologies Program (SETP).

### **4.1.1. Modelos de Generación con Energías Renovables**

El software SAM puede modelar muchos tipos de sistemas de energía renovable como los fotovoltaicos,almacenamiento de baterías con iones de litio, ácido de plomo o flujo ,proceso industrial de calor a través de cilindro parabólico y sistemas lineales de Fresnel, energía eólica, desde turbinas individuales hasta grandes parques eólicos, generación de energía geotérmica y combustión de biomasa [33].

El modelo Geotermal se utiliza para calcular los costos totales de instalación y operación para su aplicación en el modelo financiero. Los datos de costos deben ser realistas, como se explica en el manual para la economía evaluación de eficiencia energética y tecnologías de energía renovable[33]. El proceso de Simulación para este modelo se presenta en la Figura 4-2:

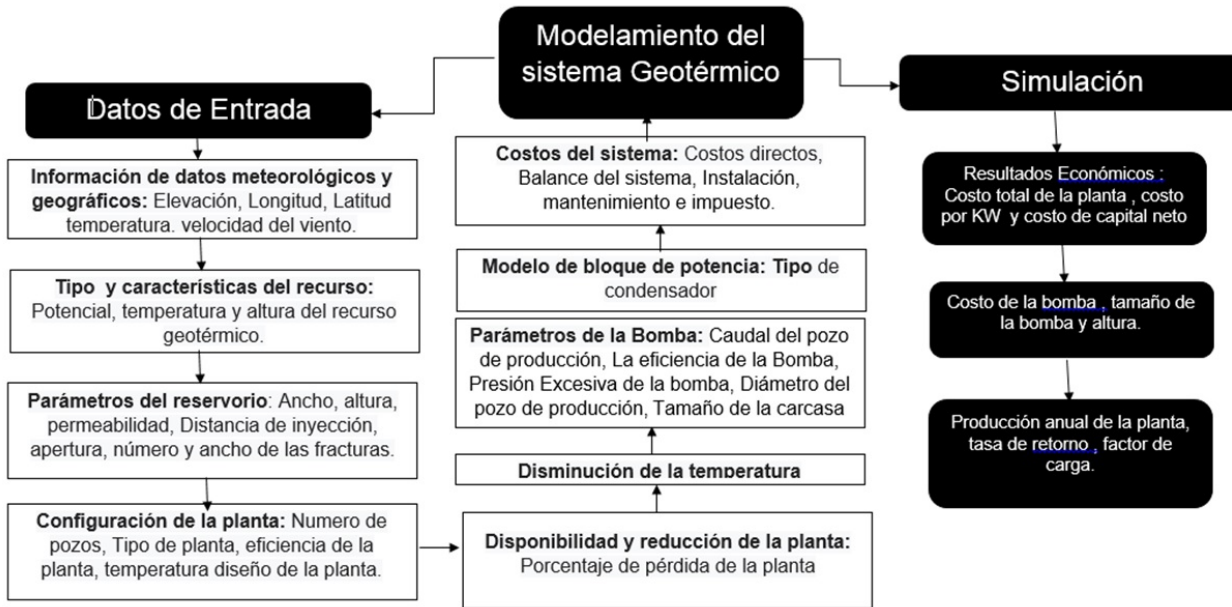


Figura 4-1: Modelamiento del Sistema Geotérmico para la Generación de Electricidad.

#### 4.1.2. Modelos Financieros para los Sistemas de Generación con Energías Renovables

Los modelos financieros de SAM pueden representar proyectos residenciales y comerciales, que compran y venden electricidad a precios minoristas y proyectos tipo Acuerdo de Compra de Energía (PPA), para cumplir con los requisitos de la tasa interna de rendimiento[34]

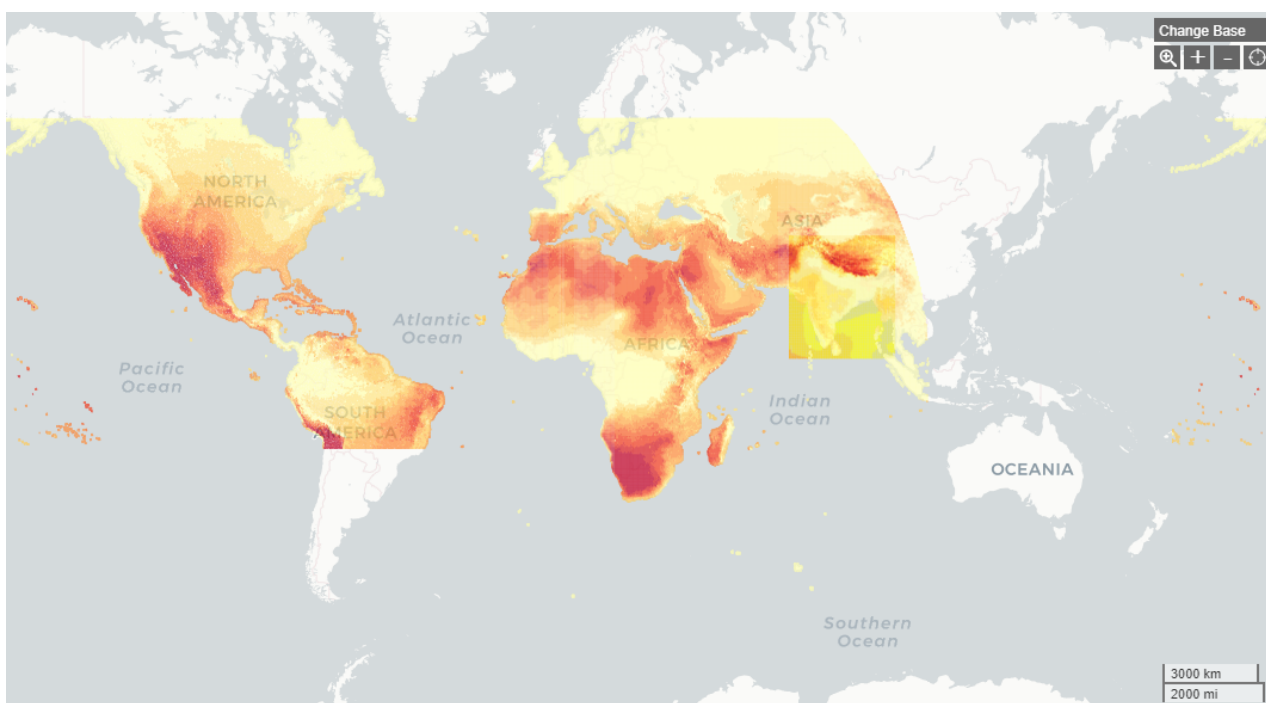
El acuerdo de compra de energía (PPA) proyecta donde el sistema está conectado a la red en un punto de interconexión, y el proyecto genera ingresos a través de la venta de energía; puede ser propiedad y ser operado por un solo propietario o por una sociedad que implique un acuerdo de inversión o arrendamiento.

### 4.2. Configuración del Modelo de Simulación GT en SAM

#### 4.2.1. Condiciones Ambientales

Las condiciones ambientales le permite elegir un archivo meteorológico para especificar las condiciones en las que se encuentra el campo geotermico a simular. Para obtener el nivel de radiación solar en  $kWh/m^2$  para el volcán Cerro Machín, se utiliza el visor web [12] de la Base de Datos Nacional de Radiación Solar (NSRDB) especificando sus coordenadas exactas.

A continuación, se proporciona un resumen de estos conjuntos de datos internacionales en la Tabla 4-1.



**Figura 4-2:** Mapa de radiación solar de la Base de Datos de NREL [12].

<b>Región</b>	México/América Central
<b>Conjunto de Datos</b>	Modelo Solar Físico (PSM) V. 3.0
<b>Resolución Temporal</b>	1/2 horas
<b>Resolución Espacial</b>	4 x 4 km
<b>Años Cubiertos</b>	1998-2017

**Tabla 4-1:** Modelo de Recursos de Datos Solares de NSRDB [15].

Para este caso, las coordenadas geográficas del Machin son  $4^{\circ} 29' 30''$  y  $75^{\circ} 23' 30''$  W.

En la tabla 4-2 se muestran los parámetros meteorológicos satelitales para la ubicación del proyecto.

Tipo de radiación / otro factor	Valor
Horizontal Global	4.63 kWh/m <sup>2</sup> /day
haz directo normal	3,1 kWh/m <sup>2</sup> /day
Horizontal difuso	2,86 kWh/m <sup>2</sup> /day
Albedo anual	0,136
Promedio de temperatura	16.2 °C
Elevación	2514 metros sobre nivel del mar

**Tabla 4-2:** Parámetros solares y meteorológicos en Machín [15].

### 4.2.2. Recurso Geotérmico

Para el desarrollo de la simulación (SAM) tiene en cuenta los tres tipos recursos geotermicos que se pueden encontrar en un proceso de exploracion.

- Recurso hidrotermal las rocas tienen suficiente permeabilidad, calor y agua para ser útiles de inmediato.
- Recurso Sistema Geotérmico Mejorado (EGS) hay calor, pero falta agua o permeabilidad, o ambos faltan y deben agregarse durante el desarrollo y la operación del proyecto.

En esta simulación se va utilizar el recurso hidrotermal debido a que las rocas tienen suficiente permeabilidad, calor y agua para ser útiles de inmediato y según el estudio de Geoquímica de fuentes minerales y termales del complejo volcánico Cerro Bravo y Cerro Machín, Colombia [35].

El potencial total de recursos es una estimación del tamaño total de la energía disponible en el depósito termal subterráneo. SAM utiliza el valor para calcular la cantidad de veces durante la vida del proyecto que se requeriría una nueva perforación para renovar el recurso en función de la reducción de la temperatura del yacimiento a lo largo del tiempo. A medida que el sistema funciona y extrae calor del depósito, la temperatura del depósito disminuye. El potencial total del recursos está destinado a medir cuántas veces se puede renovar el depósito. El un depósito de 175 MW dividido por una capacidad de planta de 30 MW podría soportar hasta siete renovaciones ( $210/30 = 7$ ) [22].

El volcán Cerro Machín cuenta con 7 pozos cada uno tiene una capacidad de 25MW para un potencial total de recursos de 175MW [34].

La temperatura del depósito a la profundidad dada que se encuentra el recurso depende del gradiente geotermico, cuánto mayor es la temperatura del recurso, menor es el costo de la energía generada por la planta.

Para la simulación que se va a realizar y las investigaciones que se han llevado a cabo, utilizando el mapa de gradientes geotérmicos de Colombia tomado de la página del servicio geológico colombiano [36], se afirma que se tiene un gradiente geotérmico de  $30\text{ C/Km}$  con profundidades de 1000m a 2000m y en el mapa de inventario nacional de manifestaciones hidrotermales se verifica que es un yacimiento de media temperatura debido a que los recursos geotérmicos están comprendidos entre  $90^{\circ}\text{C}$  y  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La investigación de la geóloga Angie Carolina Cerpa Londoño [7], especifica que la temperatura en la superficie del sistema varía entre  $74^{\circ}\text{C}$  y  $90^{\circ}\text{C}$ , de los 7 pozos que se analizaron. Los geotermómetros y diagramas analizados arrojaron un rango de temperatura en profundidad del reservorio  $200^{\circ}\text{C}$  y  $260^{\circ}\text{C}$ .

En el año 2018 se realizó una evaluación del potencial geotérmico del volcán Nevado del Ruiz basado en mediciones de conductividad térmica de roca y modelado numérico de transferencia de calor [37], donde determina que se presenta un potencial eléctrico aproximado de  $50\text{ MW}$  suponiendo un factor de utilización de 0.4 y un ancho de depósito de 5 km. La distancia medida desde el volcán Nevado del Ruiz y Cerro Machín es de 40 km tiene características similares debido a que hacen parte del mismo complejo volcánico.

### 4.2.3. Selección de la Planta Geotérmica

La configuración de la planta describe la tecnología de conversión, o en otras palabras, cómo SAM la modela.

Se pueden seleccionar dos opciones, la primera es especificar la salida de la planta o segunda opción establecer el número de pozos con los que se cuentan. El potencial geotérmico que tiene el volcán Cerro Machín llega a contar con 7 depósitos termales subterráneos confinados en un área de 20 hectáreas, cada uno de estos depósitos tiene aproximadamente un potencial de  $25\text{ MW}$ , por lo que es considerado un reservorio de media entalpía, el total estimado de recurso energético geotérmico es de  $175\text{ MW}$ , al realizarse solamente una perforación por pozo.

La generación de electricidad a partir de la energía geotérmica se puede realizar utilizando varios tipos de centrales eléctricas, las cuales se nombraron en el Capítulo 3. La planta tipo Binaria, la tipo Flash, la de Vapor Seco y la Híbrida; esto dependiendo del tipo de recurso que se obtiene en la fase de exploración. Para el modelamiento que se va a llevar a cabo se va a trabajar con una central binaria debido a que se tiene un recurso geotérmico que está entre los  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  y los  $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ , utilizándose un fluido de trabajo secundario, usualmente de tipo orgánico n-pentano con un punto de ebullición bajo y con una presión de vapor alta y el tamaño de las plantas binarias varía entre  $1\text{ MW}$  a  $50\text{ MW}$ .

#### 4.2.4. Parámetros de la Bomba

Los parámetros de bombeo del pozo de producción y la temperatura del recurso determinan cuánta energía está disponible para la planta para la conversión en electricidad. Cuanto mayor es el caudal, más vapor o agua caliente se mueve a través del sistema, lo que hace que la energía térmica esté disponible para la conversión, lo que, a su vez, significa que se deben perforar menos pozos y, por lo tanto, un menor gasto de capital.

Las bombas se utilizan con recursos geotérmicos para aumentar el flujo y, al hacerlo, reducir la cantidad de pozos requeridos para soportar un nivel específico de ventas de energía, o aumentar las ventas de energía de un número fijo de pozos. Hay costos asociados con este bombeo que disminuyen, y en algunos casos niegan, la beneficios de aumentar el flujo. Estos costos incluyen los costos de capital y mantenimiento de las bombas, así como la energía necesaria para operar las bombas. SAM asume que la energía necesaria para operar las bombas geotérmicas es generada por planta de energía. Las ventas de energía para un proyecto son la diferencia entre la producción neta de la planta de energía y este bombeo geotérmico.

La Figura 4-3 ilustra el impacto del bombeo en las ventas de energía. Esto traza la fracción de la producción de la planta requerida para el bombeo de pozos de producción en función de la profundidad de ajuste de la bomba para tres temperaturas diferentes.

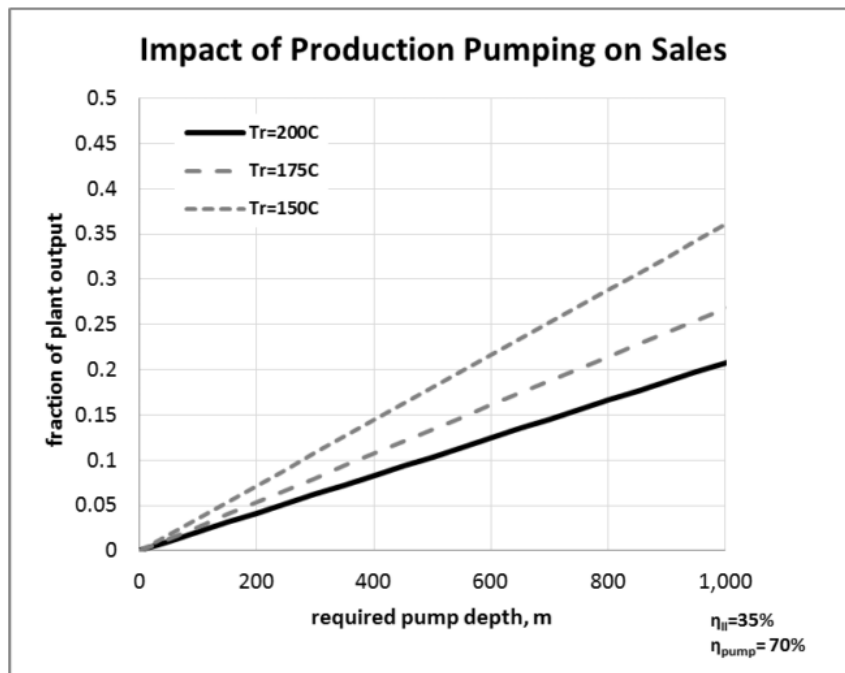
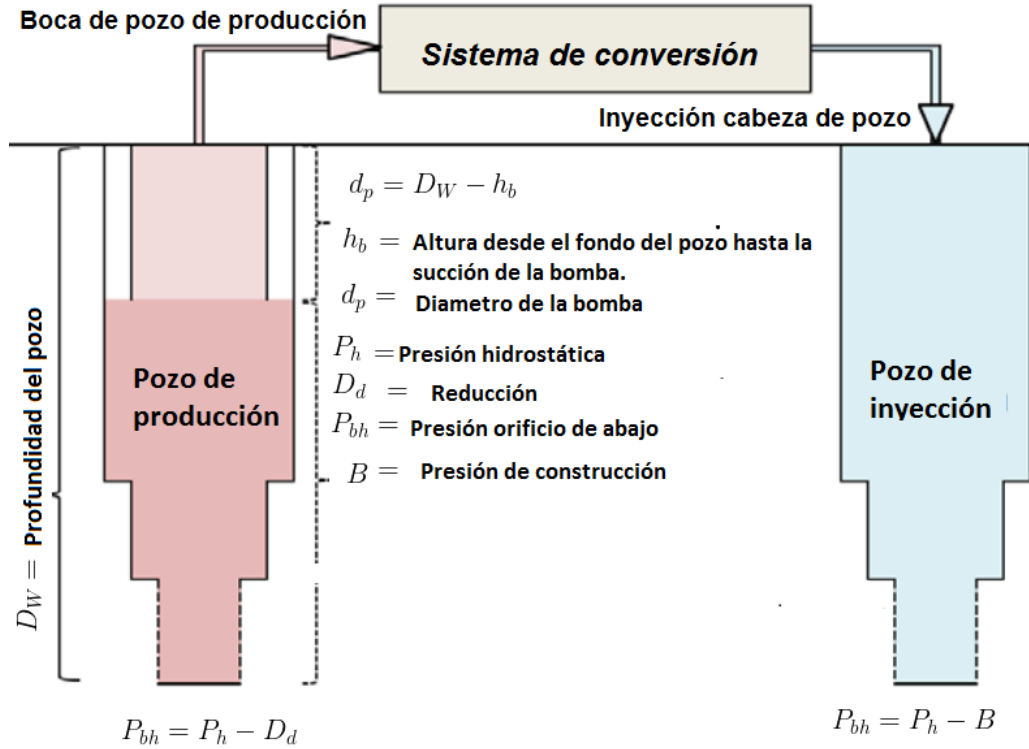


Figura 4-3: Impacto del Bombeo de Producción en las Ventas de Energía, [13].

La Figura 4-4 a continuación muestra los parámetros clave que utiliza el modelo para de-

terminar la profundidad de ajuste para el bomba de producción y el cabezal de la bomba de inyección.



**Figura 4-4:** Parámetros para Determinar la Profundidad de Fraguado del Bombeo de Producción y el Cabezal de la Bomba de Inyección, Adaptada de [13].

El cálculo de la potencia de bombeo se basa en su estimación de la presión en el depósito. Esta la presión del yacimiento esencialmente empuja el fluido hacia arriba del pozo de producción y empuja contra cualquier fluido que esté siendo inyectado. Al determinar la potencia de bombeo, esta presión del yacimiento está representada por la presión hidrostática, o la presión de una columna de agua que tiene una altura equivalente a la profundidad del recurso, a estar en equilibrio térmico con la tierra desde la superficie hasta el fondo del pozo de producción.

$$P_r(h) = P_o + \frac{1}{C_p} \left[ e^{\rho_o g C_p (h - \frac{C_T}{2} \sigma_T h^2)} - 1 \right] \quad (4-1)$$

Donde:

$P_o$ : Presión de superficie.

$\rho_o$ : Densidad de superficie

$C_p$  = Gradiente de presión.

$C_T$  = Coeficiente de gradiente de temperatura.

$h$  = Profundidad del yacimiento.

$\sigma_T = h$  = Gradiente de temperatura terrestre.

Reservorio hidrotermal típico. Valores constantes

$$C_p = 4,64 * 10^{-7} Kpa^{-1} C_T = 9 * 10^{-4} C \quad (4-2)$$

Para un recurso dado, aumentar el flujo de producción de un pozo requiere aumentar la profundidad a la que la bomba está puesta. Esa profundidad de fraguado corresponde a la ubicación en el pozo donde un mínimo permitido se produce presión; esta es la presión de succión mínima para la bomba de producción.

$$P_m = P_s + P_{ncg} + NPSH \quad (4-3)$$

$P_m$  = Presión mínima.

$P_s$  = Presión de saturación.

NPSH = Altura de succión neta de la bomba.

$P_{ncg}$  = Presión necesaria para mantener en solución los gases no condensables.

Este término representa la presión necesaria por encima de la saturación para evitar la cavitación de la bomba. La presión mínima es también la presión en la boca del pozo de producción, con el exceso definido presión que evita que el fluido parpadee entre el cabezal del pozo y la planta de energía binaria.

La potencia de bombeo de producción geotérmica por pozo, se basa en la profundidad de bomba requerida que es determinado el caudal de pozo especificado. Como se indicó anteriormente, el modelo asume que la bomba suministra el fluido a la superficie boca de pozo a una presión equivalente a la presión de succión de la bomba. Con este Suponiendo que el cabezal de la bomba es:

$$h_p = d_p + \Delta P_f \quad (4-4)$$

$h_p$  = cabezal de la bomba.

$d_p$  = Diametro de la bomba.

$\Delta P_f$  = Pérdida por fricción en la carcasa de la bomba



### 4.2.5. Bloque de Potencia

Permite especificar los parámetros necesarios para convertir la energía térmica del recurso geotérmico en energía eléctrica utilizando una planta de ciclo Rankine de vapor convencional. El ciclo de energía utiliza sistema híbrido con enfriamiento húmedo y seco. El modelo computacional para la planta geotérmica ejecuta una simulación con un rango de tiempo de varios años de vida de la planta para así dar cuenta de la disminución de los recursos geotérmicos de manera mensual. El análisis con bloques de energía mensual da como resultado 360 conjuntos de cálculos (*12 meses/años 30 años=360 meses*).

Dado que es poco probable que existan datos meteorológicos para cada uno de los años del período de análisis, el modelo computacional usa el mismo archivo meteorológico para todos los años de vida útil del proyecto. El único valor que cambia anualmente en el modelo de rendimiento es el rango de temperatura del recurso geotérmico a medida que éste se degrada con el paso del tiempo [34].

### 4.2.6. Despacho de energía

Los proyectos de generación de energía venden toda la electricidad que genera el sistema a un precio negociado a través de un contrato de compra de energía (PPA). Para estos proyectos, SAM le permite definir factores de tiempo de entrega (TOD), o multiplicadores, para ajustar el precio de la energía en cualquier hora del año.

Hay dos formas de definir los factores TOD: Factores por horario y por paso de tiempo, para esta simulación se va a seleccionar el factor por horario.

Para cada uno de los nueve períodos de la lista, para calcular el precio del PPA en un período determinado, SAM multiplica el precio del PPA del año 1 por el multiplicador que especifique. Por ejemplo, si el período 1 es el pico de verano, definido desde el mediodía hasta las 7 p.m. de junio a septiembre con un multiplicador de 2,38, y el precio del PPA anual es de 6 centavos / kWh, el precio que el proyecto recibiría por cada unidad de electricidad que genera durante esas horas pico de verano sería de 6 centavos / kWh  $\times 2,38 = 14,28$  centavos / kWh.

La Figura a 4-5 se visualiza el despacho diario que está configurado con el horario del día y los meses del año donde, se genera mayor carga a partir de la 6:00 am hasta las 11:00 pm, y tiene en cuenta los meses críticos de verano que son enero febrero, marzo, julio, agosto y septiembre en el país.

	12am	1am	2am	3am	4am	5am	6am	7am	8am	9am	10am	11am	12pm	1pm	2pm	3pm	4pm	5pm	6pm	7pm	8pm	9pm	10pm	11pm
Jan	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6
Feb	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6
Mar	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6
Apr	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5
May	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5
Jun	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5
Jul	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6
Aug	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6
Sep	2	2	2	2	2	2	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	6	6	6	6	6
Oct	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5
Nov	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5
Dec	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	5	5	5	5	5

Figura 4-5: Manual de Despacho Diario de Energía [13].

### 4.2.7. Costos del Sistema de Generación de Energía Geotérmica

Las principales categorías de costos incluidas en este modelo se explican brevemente a continuación, de acuerdo con [38].

#### Costos de exploración y confirmación

El costo de exploración ( $C_{expl}$ ) y los pozos de confirmación ( $C_{Conf}$ ) se expresan en función del costo de un pozo de producción.

$$C_{expl} = C_{conf} \times CM \times \#_{wells} \tag{4-5}$$

Un factor conocido como multiplicador de costos ( $CM$ ) afecta el costo del pozo de producción para estimar el costo por pozo. Luego, este valor se multiplica por la cantidad de pozos ( $\#_{wells}$ ) que define el usuario y así estimar los costos de perforación.

#### Perforación y costos asociados

Este tipo de costo considera los pozos de producción que deben perforarse y en los que se incurrirá en la producción de energía. El número de pozos de producción se calcula restando estos del total de pozos de producción necesarios.

El número de pozos de inyección es típicamente una función del número de pozos de producción, como lo presenta la Ecuación (4-6).

$$C_{drill} = C_{expl} \times \#_{prodwells} \times ROI \quad (4-6)$$

Debe especificarse la relación entre pozos de inyección y pozos de producción ( $\#_{prodwells}$ ), es decir, NO por el número de pozos de producción que deben perforarse, sino que se verá afectado por los Pozos Totales de Producción requeridos para calcular el Número de Pozos de Inyección a perforar, o lo que es lo mismo, el  $ROI = \frac{\#_{wells_{prod}}}{\#_{wells_{inj}}}$ .

Este está definido como la Relación de Inyección (Ratio Of Injection), y no debe confundirse con el conocido Retorno de la Inversión (Return of Investment).

### Costos de producción e inyección

Estos costos se especifican en función de la profundidad del pozo donde se encuentra disponible el recurso. El costo de perforación por pozo se puede calcular usando una función que relaciona la profundidad del pozo con el costo y también se conoce como la curva de costo elegida (Bajo, Medio y Alto) elaborada por los datos de perforación de Sandia National Laboratories [34].

El costo por pozo para pozos de producción e inyección también se conoce como costo por pozo. Además, se pueden especificar los costos de no perforación. Estos se sumarán al costo de perforación para calcular el costo total de los pozos de producción e inyección.

### Costos de equipo de superficie, instalación y estimulación

Este tipo de costos se asume en función del número total de pozos de producción e inyección. El costo por pozo debe multiplicarse por la cantidad de pozos para calcular los costos totales de no perforación.

### Costos de capital de la planta

Esto se puede expresar en base por kW, es decir, se puede definir en dólares por kW y luego multiplicar este valor por el tamaño de la unidad de la planta, esto también se conoce como el costo de la planta de energía.

$$W = (E_Q - E_{rein}) - I = E_{Q,av} - I \quad (4-7)$$

Donde:  $W$  es la potencia de salida,  $E_Q$  es el flujo de exergía asociado a la fuente de GT,  $I$  son las pérdidas de exergía asociadas a la planta de energía de GT y  $E_{rein}$  es la exergía residual de la GT fluido que se reinyecta al pozo, como se explica en [39].

Por lo tanto, el costo de la planta se puede escribir de esta manera:

$$C_{plant} = \frac{\$USD}{kW} \times W \quad (4-8)$$

### Costo de la bomba

Puede definirse en función de la profundidad y el tamaño de la bomba. El costo de la bomba se especifica por caballo de fuerza para determinar el costo por bomba.

$$C_{Pump} \times \#_{prodwells} = \left( \frac{\$USD}{HP} \times HP \right)_{pump} + (C_{inst} + C_{cas}) \times D_{pump} \quad (4-9)$$

Donde:

$C_{Pump}$ : Costo de la bomba

$D_{pump}$ : Diámetro de la bomba

$HP$ : Potencia de la bomba

$C_{inst}$ : Costo de instalación

$C_{cas}$ : Costo de instalación carcasa

$\#_{prodwells}$ : Número de pozos de producción.

El costo total de estos artículos incluye los costos de instalación y revestimiento y estos se especifican por metro y luego se multiplican por la profundidad de bombeo. Finalmente, el costo total instalado por bomba es la suma del costo de la bomba y el costo de instalación y carcasa. Esto se multiplica por el número total de pozos de producción necesarios para calcular el costo total de la bomba.

### Costos totales instalados

El costo total de instalación es la suma de todos los costos de capital directos e indirectos. Este valor es útil para calcular el costo de capital neto del proyecto, que es el costo total de instalación menos los incentivos en efectivo y más los costos de financiamiento adicionales. Dos categorías principales se incluyen en este tipo de costos:

### Costos Indirectos de Capital

Los costos indirectos de capital se dividen en cinco tipos diferentes:

Costos de ingeniería ( $C_{eng}$ ), de adquisiciones ( $C_{proc}$ ), de proyecto de construcción ( $C_{const}$ ), del terreno ( $C_{land}$ ) y los costos varios ( $C_{misc}$ ), incluido un impuesto a las ventas ( $S_{Tax}$ ). Esto se representa en la Ecuación (4-10):

$$C_{ind} = [C_{eng} + C_{proc} + C_{const} + C_{land} + C_{misc}] \times S_{Tax} \quad (4-10)$$

### Recapitalización

El costo de recapitalización ( $C_{recap}$ ) se puede agregar cada vez que el recurso tenga que volver a perforarse para alcanzar una nueva sección del recurso geotérmico a fin de aumentar la temperatura del pozo de producción.

### Costo de la Electricidad

Se denota como  $C_{in}$ . Este es la suma de todos los de costos definidos anteriormente, más el costo de perforación ( $C_{dril}$ ) tal como se muestra en la Ecuación (4-11):

$$C_{in} = C_{expl} + C_{dril} + C_{prod} + C_{plant} + C_{Pump} + C_{ind} + C_{recap} \quad (4-11)$$

## 5 Resultados de Simulación de la Planta GT para el Volcán Cerro Machín

La simulación de la planta GT para el volcán Cerro Machín realizada en SAM se ha dividido en dos partes, a saber: Los resultados técnicos y los económicos. Con ello se espera obtener un concepto de prefactibilidad para un proyecto de estas características. Los datos de entrada principales para ejecutar la simulación GEGS correctamente se reanudan en Tabla 5-1:

<b>Caracterización del recurso</b>	
Potencial total del recurso	175 MW
Temperatura del recurso	190 °C
Profundidad del recurso	1500 m
<b>Configuración de la planta</b>	
Numero de pozos	7
Salida Neta de la planta	33.426 MW
Tipo de planta	Binaria
Eficiencia de la planta	60 %
<b>Modelo Power Block hora</b>	
Eficiencia de conversión de ciclo nominal	0.17
Temperatura de entrada de diseño	190 °C
Temperatura de salida de diseño	90 °C
Presión de funcionamiento de la caldera	2 bar
<b>Sistema de refrigeración</b>	
Tipo de condensador	Hibrido
Temperatura ambiente en el diseño	15 °C
Niveles de carga parcial del sistema de refrigeración	8

**Tabla 5-1:** Datos de simulación de la Planta Geotérmica del volcán Cerro Machín.

## 5.1. Resultados Técnicos

### 5.1.1. Producción Mensual de Energía

La Figura 5-1 representa la producción mensual de electricidad de la planta durante 300 meses, teniendo picos entre 22  $GW/h$  mes y 16  $GW/h$  mes, llegando a abastecer 121000 hogares mensualmente, teniendo un promedio de consumo mensual de 150  $KW/h$ .

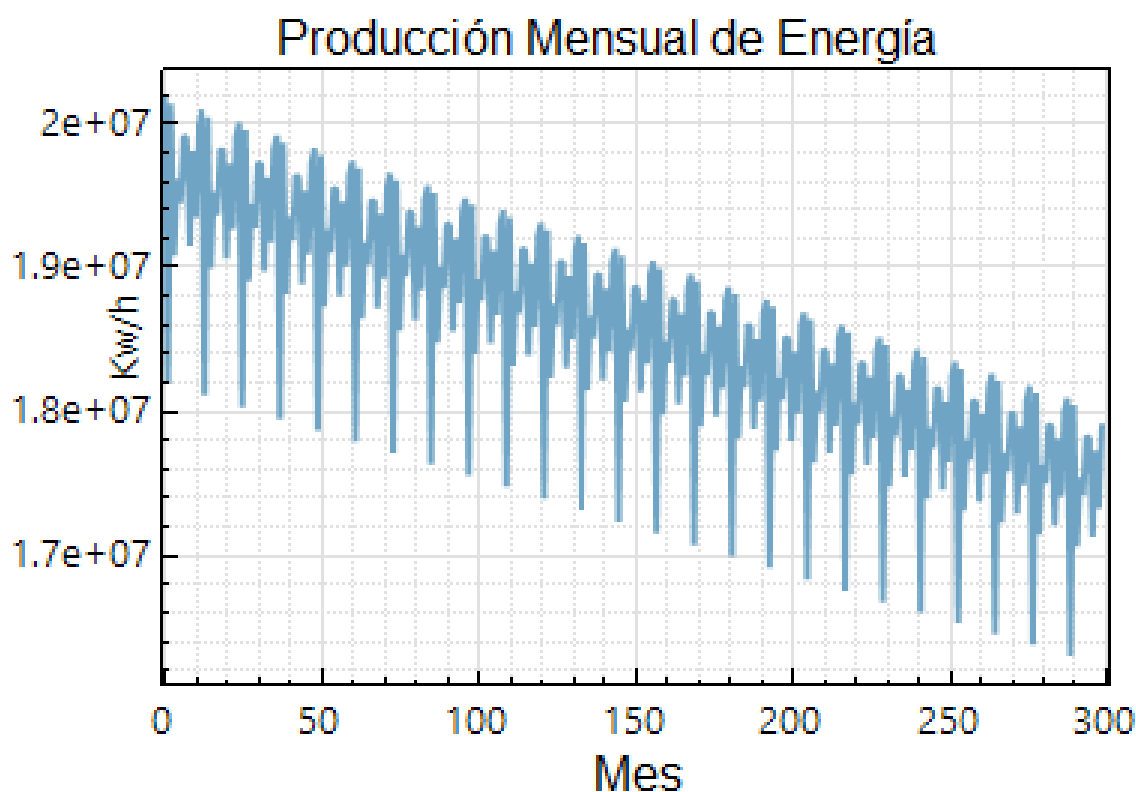
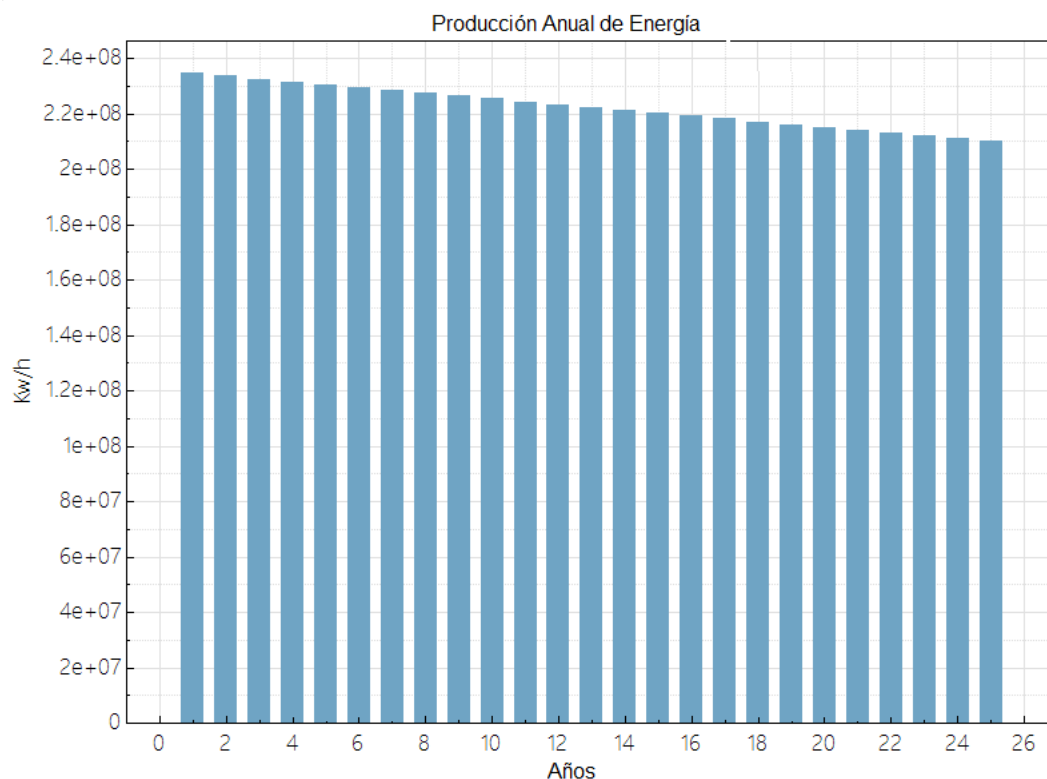


Figura 5-1: Producción mensual de energía eléctrica en  $kW/h$

### 5.1.2. Producción Anual de Energía

La Figura 5-2 muestra la producción anual de energía eléctrica de la planta geotérmica, el primer año la generación es de 234  $GW/h$  y se presenta una disminución anual del 2,5% hasta los 25 años con una generación de 210  $GW/h$ . Teniendo una planta con una capacidad instalada de 40 MW.

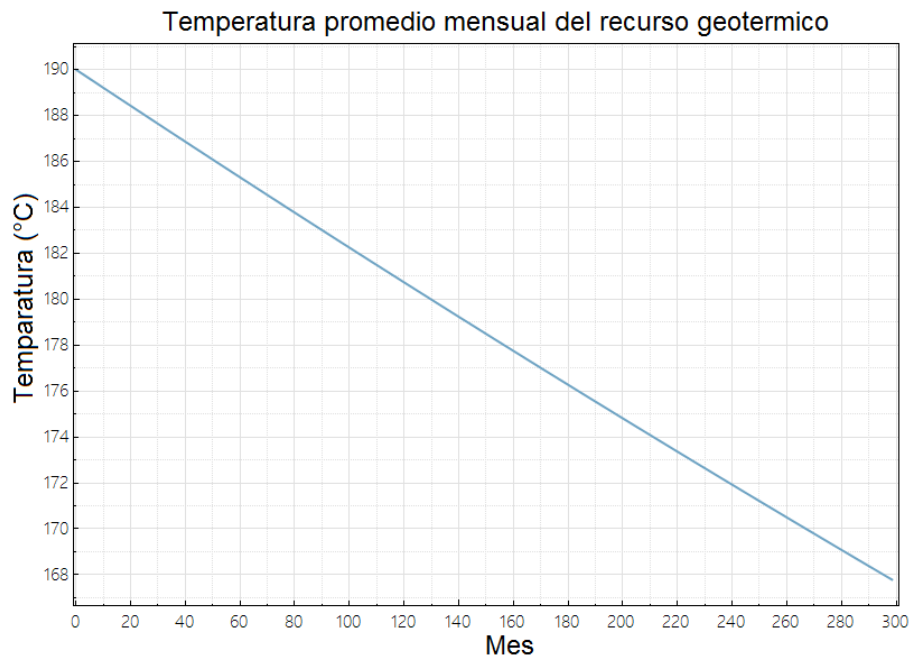


**Figura 5-2:** Producción Anual de Energía Eléctrica en *kWh*

### 5.1.3. Temperatura promedio mensual del recurso geotermico

En la Figura 5-3 muestra la temperatura promedio del fluido de trabajo mensualmente , durante los 25 años , el primer mes presenta una temperatura promedio de 190 °C , generándose una disminución del 0.04 % mensual hasta llegar en el ultimo mes a una temperatura de 168 °C.; se puede visualizar que después de un largo tiempo transcurrido se sigue obteniendo vapor sobrecalentado antes de realizar una próxima perforación.





**Figura 5-3:** Temperatura Promedio Mensual del Recurso Geotérmico.

#### **5.1.4. Promedio anual diario de energía producida por la planta**

La Figura 5-4 representa el promedio anual diario de energía producida por la planta. Donde la entrega máxima es 26250 Kwh a las 12: 00 horas y la entrega mínima es de 24750 Kwh a las 23: 00 horas.

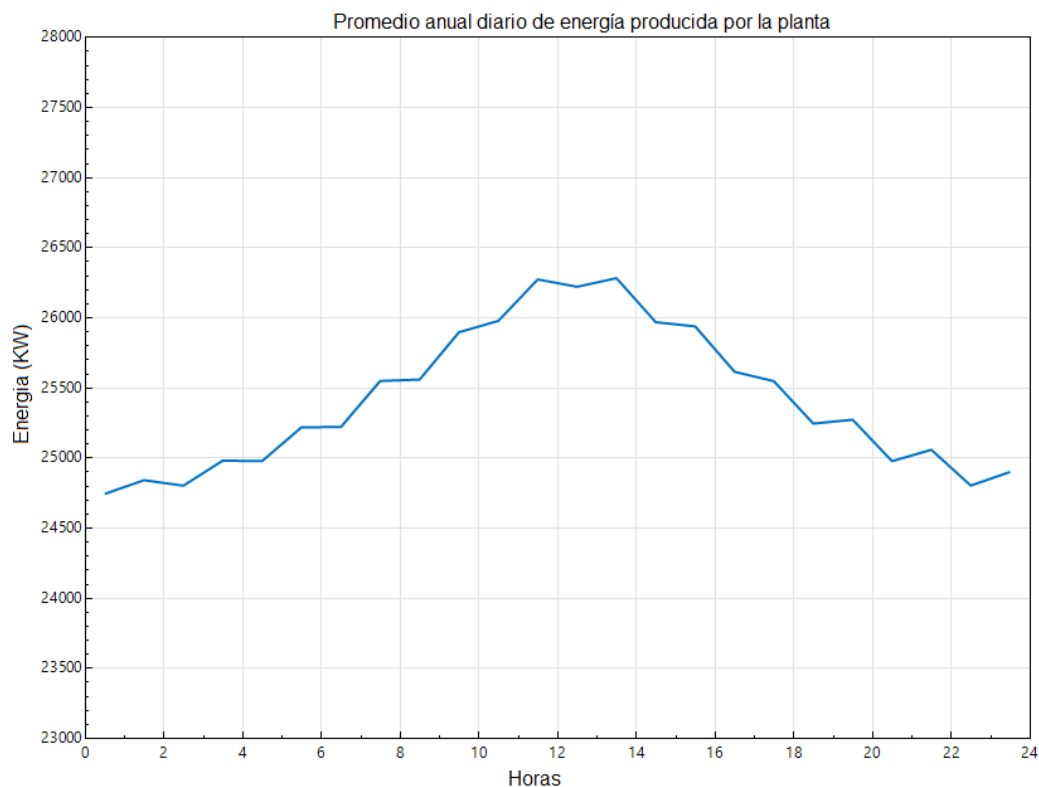
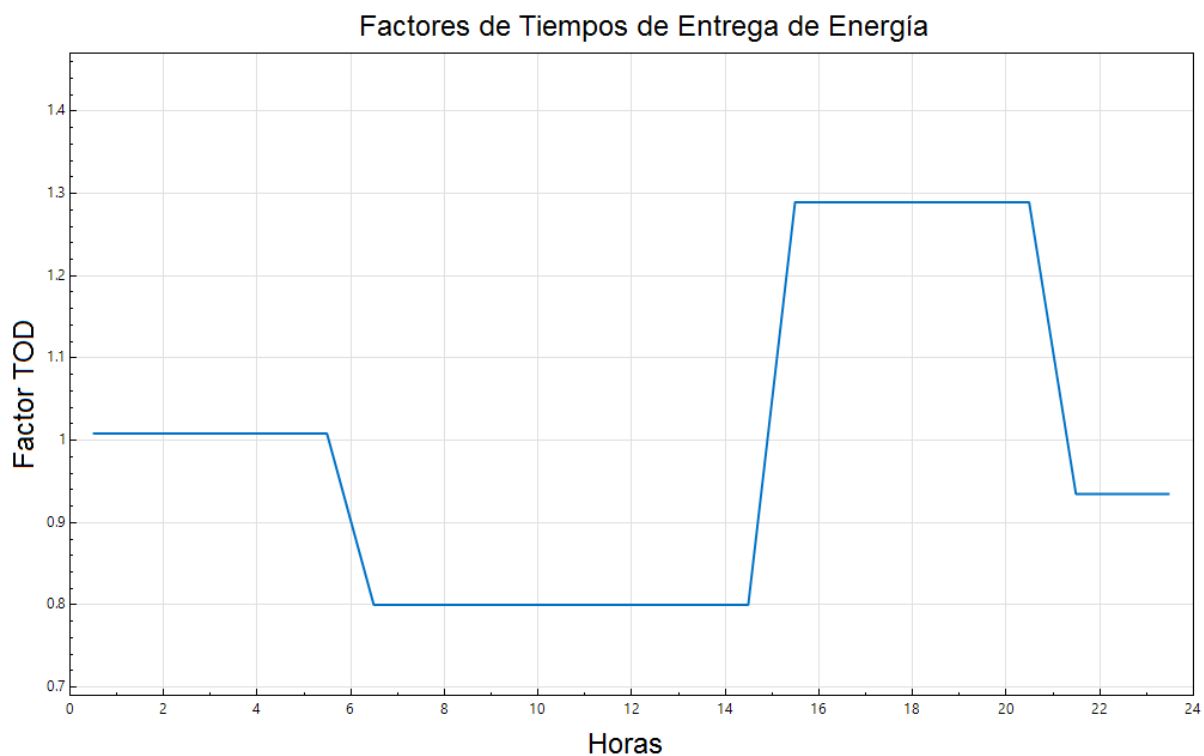


Figura 5-4: Promedio anual diario de energía producida por la planta

### 5.1.5. Factores de Tiempos de Entrega.

La figura 5-5 representa el tiempo para entregar energía a diferentes factores de precio a lo largo del día. En esta figura se presenta el promedio anual diario de energía producida por la planta geotérmica que se entrega a la red nacional. El factor TOD más alto (de casi 1,3 veces) se produce en el transcurso de las 15:00 h. a las 21:00 h. debido a la mayor demanda de usuarios de energía se presenta. En este caso, el TOD se configura de acuerdo con el perfil de generación de energía para esta simulación se utilizó el factor TOD por horario.



**Figura 5-5:** Factores de Tiempos de Entrega de Energía.

## 5.2. Resultados Económicos

### 5.2.1. Costo de la Planta GT

Los resultados de los costos de la planta de GEGS se resume en la Tabla **5-2**

Costo de capital de la planta	
Producción bruta de la planta	41,559.898 kW
Costo de referencia	1,300.00 \$/kW
Costo de la planta de energía	\$ 54,027,868 USD

**Tabla 5-2:** Costos de la Planta GT del volcán Cerro Machín.

### 5.2.2. Resultados económicos de la planta geotermica

Los resultados económicos se muestran en la Tabla 5-3 después de ejecutar el proyecto SAM para GEGS de Machin, son el Valor Actual Neto, (PPA) Escalada de Precios, Tasa Interna de Retorno (TIR) y Costos de Capital Neto.

Métrico	Valor
Energía anual (año 1)	234,957,168 kWh
Factor de capacidad (año 1)	89.4 %
Escalada de precios de PPA	1 %/year
Costo Nivelado de Energía (nominal)	8.76 /kWh
Costo Nivelado de Energía (real)	6.99 /kWh
Tasa interna de rendimiento (TIR)	15 %
Costo de capital neto	\$ 123,049,496 USD

**Tabla 5-3:** Resultados económicos de la Planta GT del volcán Cerro Machín.

### 5.2.3. Costo del Sistema de Bombeo de la Planta GT

La bomba es un componente muy importante en un GEGS. El software utiliza la potencia nominal de la planta, el número de pozos de producción y su costo por *HP*, para la estimación de Bomba en *HP* y su costo en dólares *USD/HP*. Esto se resume en la Tabla 5-4.

<b>Entradas de costos de bomba</b>	
Costo de instalación y carcasa	50.00 \$/ft
Profundidad de la bomba	1,336.896 ft
Costo de bombeo	12,479.20 \$/HP
Tamaño de la bomba	893.61 HP
# de bombas requeridas	7
Costo de la bomba	\$ 439,889 USD
Costo total de la bomba	\$ 3,079,225 USD

**Tabla 5-4:** Costo del Sistema de Bombeo de la Planta GT del Volcán Cerro Machín.

### 5.2.4. Rentabilidad de la Planta GT

La Figura 5-6 y la Figura 5-7 representa el flujo de caja que tiene la planta GT y el efectivo disponible para el servicio de la deuda respectivamente por la generación de electricidad durante los 25 años antes de realizar la segunda perforación. Este es un escenario totalmente atractivo para cualquier inversionista, sean entidades financiera o gubernamentales

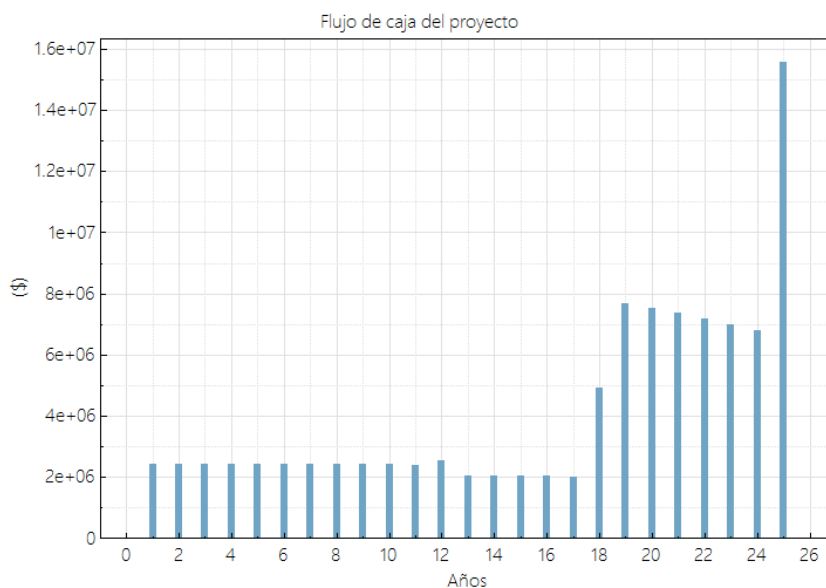
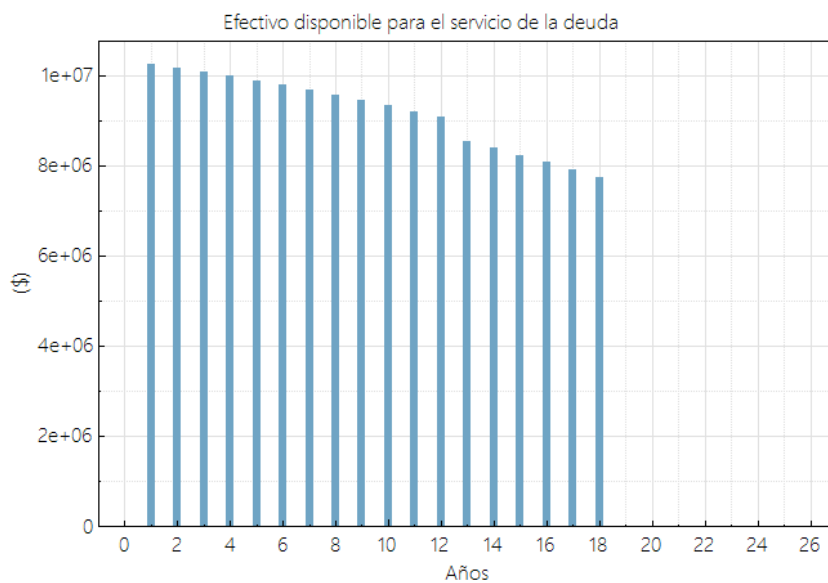


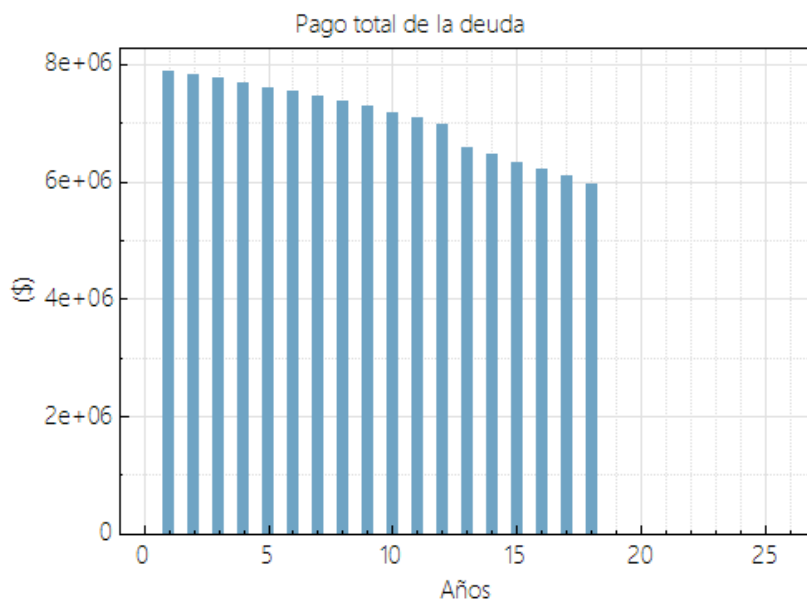
Figura 5-6: Flujo de caja del proyecto.

Durante los primeros 17 años este ingreso es constante debido que se esta pagando la inversión de las fases de generación del proyecto geotérmico, haciendo que después de este periodo los ingreso aumenten en un 200 % cada año.

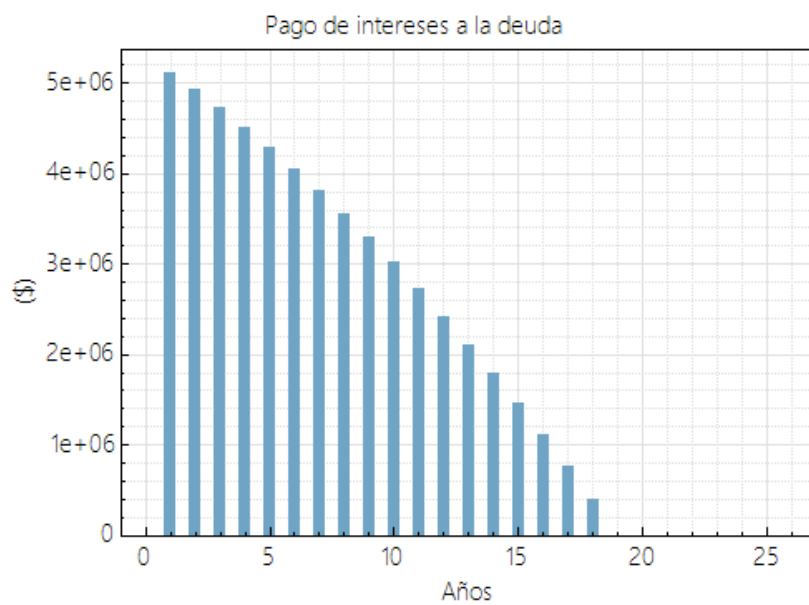


**Figura 5-7:** Efectivo disponible para el servicio de la deuda.

La Figura 5-8 y la Figura 5-9 representan el pago total de la deuda y el pago de intereses de la deuda respectivamente indicando que en el año 18 finalizan los dos y observamos una reducción de los intereses anual del 5.5 %



**Figura 5-8:** Pago total de la deuda.



**Figura 5-9:** Pago de intereses de la deuda.

# 6 Conclusiones y recomendaciones

## 6.1. Conclusiones

La simulación realizada en el software SAM sobre el potencial geotérmico del volcán Cerro Machín y los resultados obtenidos que se muestran en la Figura 5-2 producción anual de energía en  $kWh$  se obtiene una generación anual promedio durante los 25 años de 222'000.000  $kWh$  año, es una muy buena producción para campos geotérmicos de media entalpía y una capacidad instalada de 40  $MW$ . Esto se debe a que se tiene una temperatura promedio de 179°C, generando una disminución de 0.04 % mensual haciendo que el fluido no cambie de fase y su poder calorífico se mantenga como se muestra en la la Figura 5-3 de la temperatura promedio mensual del recurso geotérmico, llegando abastecer 121000 hogares mensualmente debido a que se presenta una producción mensual promedio de 18 500 000  $kWh$  con un consumo de según EPM de cuatro personas por hogar de 152  $kWh/mes$ .

El costo total del proyecto tiene un valor de USD \$123'049.496, una tasa interna de rendimiento (IRR) del 15 % y un factor de capacidad del 89.4 % haciendo un paralelo con el proyecto de central geotérmica en Copahue de 30  $MW$  en el país de Argentina se afirma que esta en unos rangos económicos viables para estudios posteriores.

Haciendo una comparación con otros tipos de energía, el proyecto de central hidroeléctrica del Guavio es la primera central en funcionamiento más grande de Colombia con una capacidad instalada de 1250  $MW$ , una generación 6603  $GWh$  año y un costo de 5 billones de pesos sin evaluar las consecuencias que dejan este tipo de proyectos en el medio ambiente desvían el cauce de los ríos e inundan lugares haciendo que se altere la fauna y la flora de una región. Genera desplazamientos de poblaciones que colindan con la central hidroeléctrica.

La Figura 5-6 y la Figura 5-7 representan el flujo de caja que tiene la planta GT y el efectivo disponible para el pago de la deuda, denotando que en el año 18 se realizará el pago total de la deuda y las ganancias del proyecto se incrementen en un 200 % cada año antes de realizar la segunda perforación. Esto da conocer que la planta va generar ingresos representativos después de su segunda perforación.



## 6.2. Productos Derivados de esta Tesis

- Artículo de investigación fue presentado, aprobado en el evento VIII Simposio Brasileño de Sistemas Eléctricos modalidad Virtual, celebrado del 25 al 28 de agosto de 2020.

Titulo : Techno-Economic Simulation of a Geothermal Energy Generation System at the Machin Volcano in Colombia.

Autores :

Ingeniero Mecánico: Hernando Enrique Rodriguez Pantano.

Geóloga, Especialista en Sistemas de Información Geográfica (SIG): Valentina Betancur.

Ingeniero Electricista, Magíster y PhD en Energía: Carlos Mario Rocha-Osorio.

Ingeniero Electricista, magíster en Automatización y PhD en Energía: Juan Sebastian Solís-Chaves.

- Manual de SAM System Advisor Model Energía Geotérmica (en progreso)

Versión No 1

Idioma : Español

Autores :

Ingeniero Mecánico: Hernando Enrique Rodriguez Pantano.

Ingeniero Electricista, magíster en Automatización y PhD en Energía: Juan Sebastian Solís-Chaves.

# Bibliografía

- [1] A. Ritcher, “The top 10 geothermal countries 2018 – based on installed generation capacity (mwe).” url<https://bit.ly/2Keee0T>, 1 2019.
- [2] J. C. Farfan, “La geotermia en el Perú: avances y perspectivas,” Tech. Rep. 1, ingemmet, <https://bit.ly/3gxxg60P>, 4 2012.
- [3] D. MH and F. M., “Geotermia.” url<https://bit.ly/3a3H67f>, 1 2020.
- [4] F. L. Camera, *Estadísticas de la capacidad renovable*, vol. 1 of 1. 1: International Renewable Energy Agency, 1 ed., 3 2020.
- [5] E. Andina., “La geotermia en el mundo.” url<https://bit.ly/3oHfdpg>, 1 2020.
- [6] P. Bona and M. Coviello, *Valoración y gobernanza de los proyectos geotérmicos en América del Sur*, vol. 1 of 1. 1: Naciones Unidas, 1 ed., 3 2016.
- [7] A. C. C. Londoño, “Caracterización del potencial geotérmico a partir de análisis geoquímicos de fuentes termales, en el volcán cerro machín, Colombia.” 1 2018.
- [8] Y. Casallas, J. Rueda-Gutiérrez, and G. Rodríguez, “New areas of geothermic interest in the central cordillera of the Colombian Andes: Santa Rosa and Cerro Machín,”
- [9] C. Mooney, *Geothermal Power*. Compact Research: Energy and the Environment, ReferencePoint Press, 2012.
- [10] M. Gonzalez, *Energía geotérmica*, vol. 1 of 1. 1: Gobierno Nacional de Argentina, 1 ed., 1 2019.
- [11] I. R. E. A. IRENA, *geothermal Power*, vol. 1 of 1. 1: IRENA, 1 ed., 9 2017.
- [12] NREL, “National solar radiation database.” url<https://nsrdb.nrel.gov/index.php>, 11 2019.
- [13] Gregory L. Mines, *GETEM User Manual*. The INL is a U.S. Department of Energy National Laboratory operated by Battelle Energy Alliance, INL/EXT-16-38751, 1 ed., 1 2016.
- [14] G. L. Trillo and V. R. Angulo, *Guía de la Energía Geotérmica*, vol. 1. Energy management agency, 1 ed., 7 2012.
- [15] R. Perez, P. Ineichen, K. Moore, M. Kmiecik, C. Chain, R. George, and F. Vignola,

- “A new operational model for satellite-derived irradiances: description and validation,” *Solar Energy*, vol. 73, no. 5, pp. 307 – 317, 2002.
- [16] R. dinero, “Los 2.153 multimillonarios que tienen 60 % de la riqueza del mundo,” Tech. Rep. 1, DINERO, <https://bit.ly/2VYJZxF>, 1 2020.
- [17] M. Gehringer and V. Loksha, *Manual de Geotermia: Cómo Planificar y Financiar la Generación de Electricidad*. ESMAP, 1 ed., 6 2012.
- [18] I. Stober and K. B. (auth.), *Geothermal Energy: From Theoretical Models to Exploration and Development*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1 ed., 2013.
- [19] J. L. Q. León, “Revista mexicana de geoenergía,” *De la celebración del centenario de la industria geotermoeléctrica al desarrollo de la energía geotérmica en Italia en el siglo XXI l*, vol. 19, pp. 63–68, 7 2006.
- [20] A. Mamani and M. Guillen, “Pichacani puno, para la generación de energía eléctrica,” Master’s thesis, Universidad Nacional de altiplano, <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/11839>, 8 2019.
- [21] D. R. Boden, *Geologic Fundamentals of Geothermal Energy*. CRC Press, 2016.
- [22] A. Cerpa, “Caracterización del potencial geotérmico a partir de análisis geoquímicos de fuentes termales, en el volcán cerro machín, colombia,” Master’s thesis, Universidad EIA, <https://repository.eia.edu.co/handle/11190/2250>, feb 2018.
- [23] A. Gemelli, A. Mancini, C. Diamantini, and S. Longhi, *GIS to Support Cost-effective Decisions on Renewable Sources: Applications for low temperature geothermal energy*. SpringerBriefs in Applied Sciences and Technology, Springer-Verlag London, 1 ed., 2013.
- [24] M. A. Palacio, “Boletín de geología,” *Sistemas geotérmicos mejorados: revisión y análisis de casos de estudio*, vol. 42, pp. 101–118, 2 2020.
- [25] A. Mamani and M. Guillen, “Pichacani puno, para la generación de energía eléctrica,” Master’s thesis, Universidad Nacional de altiplano, <http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/11839>, 8 2019.
- [26] A. Ritcher, “The top 10 geothermal countries 2019 – based on installed generation capacity (mwe).” [urlhttps://bit.ly/39X7kbb](https://bit.ly/39X7kbb), 1 2019.
- [27] G. A. Marin and A. A. Sanchez, “Estado actual de la producción de energía geotérmica en colombia,” Master’s thesis, Universidad Nacional Abierta y a Distancia, <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/13221>, 8 2017.
- [28] R. DiPippo, *Geothermal Power Generation. Developments and Innovation*. Woodhead Publishing Series in Energy, Woodhead Publishing, 1 ed., 2016.
- [29] A. Manzella, A. Allansdottir, and A. Pellizzone, *Geothermal Energy and Society*. Lecture Notes in Energy 67, Springer International Publishing, 1st ed. ed., 2019.

- 
- [30] N. Unidas, *Energía y desarrollo sustentable en América Latina y el Caribe*, vol. 1 of 1. Naciones Unidas, olade ed., 2003.
- [31] U. Eicker, *Energy Efficient Buildings with Solar and Geothermal Resources*. Wiley, 1 ed., 2014.
- [32] M. Gonzalez, *State of the Art of Electric Power Generation Technology from Geothermal*. Treasury of Argentina, 2019.
- [33] W. Short, D. J. Packey, and T. Holt, *A Manual for the Economic Evaluation of Energy Efficiency and Renewable Energy Technologies*. National Renewable Energy Laboratory - NREL, U.S. Department Of Energy, 1 ed., 03 1995.
- [34] NREL - National Renewable Energy Laboratory, *Manual Release SAM Version 2018.11*. Alliance for Sustainable Energy, LLC, U.S. Department Of Energy, 1 ed., 11 2018.
- [35] C. A. Valero and A. A. Corrales., “Geoquímica de fuentes minerales y termales del complejo volcánico cerro bravo y cerro machín.” *Boletín Geológico*, vol. 41, no. 1, pp. 76–120, 2018.
- [36] G. N. Colombiano, “Servicio geológico colombiano.” url<https://www.sgc.gov.co/>, 11 2020.
- [37] M. I. Véleza, D. Blessentb, S. Córdoba, J. López-Sánchezb, R. Jasmin, and E. Parra., “Geothermal potential assessment of the nevado del ruiz volcano based on rock termal conductivity measurements and numerical modeling of heat transfer.” *Journal of South American Earth Sciences*, vol. 1, no. 1, pp. 1–33, 2018.
- [38] D. J. Entingh, E. Easwaran, and L. McLarty, “Small geothermal electric systems for remote powering,” *U.S. Department of Energy Office of Scientific and Technical Information*, vol. 1, 8 1994.
- [39] A. Franco and M. Vaccaro, “A combined energetic and economic approach for the sustainable design of geothermal plants,” *Energy Conversion and Management*, vol. 87, pp. 735 – 745, 2014.