

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



**MODELADO NUMÉRICO DE RESERVORIO GEOTÉRMICO
CON HYDROTHERM EN LA ZONA DE AHUACHAPÁN**

PRESENTADO POR:

RAÚL ALEJANDRO PÉREZ SEGOVIA

LUIS FELIPE VARGAS ZOMETA

PARA OPTAR A TÍTULO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2025

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

M.SC. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCIA

SECRETARIO:

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

DIRECTOR INTERNO:

ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE GRADUACIÓN PREVIO A LA OPCIÓN AL GRADO DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

TITULO:

**MODELADO NUMÉRICO DE RESERVORIO GEOTÉRMICO
CON HYDROTHERM EN LA ZONA DE AHUACHAPÁN**

PRESENTADO POR:

RAÚL ALEJANDRO PÉREZ SEGOVIA

LUIS FELIPE VARGAS ZOMETA

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

DOCENTE ASESOR:

PHD. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

SAN SALVADOR, FEBRERO DE 2025

TRABAJO DE GRADUACIÓN APROBADO POR:

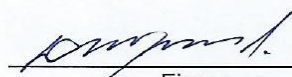
DOCENTE ASESOR:

PHD. CARLOS OSMÍN POCASANGRE JIMÉNEZ

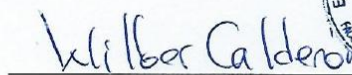
NOTA Y DEFENSA FINAL

En esta fecha, jueves 7 de noviembre de 2024, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 10:00 a.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Werner David Meléndez Valle
Director Interino


Firma

2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia
Secretario


Firma

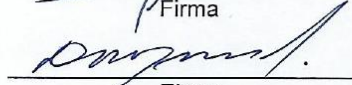


Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

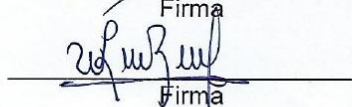
- DR. CARLOS OSMIN POCASANGRE JIMENEZ
(Docente Asesor)


Firma

- ING. WERNER DAVID MELÉNDEZ VALLE


Firma

- ING. WALTER LEOPOLDO ZELAYA CHICAS


Firma

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

MODELADO NUMÉRICO DE RESERVOIRIO GEOTÉRMICO CON HYDROTHERM EN LA ZONA DE AHUACHAPÁN

A cargo de los Bachilleres:

- PÉREZ SEGOVIA RAÚL ALEJANDRO
- VARGAS ZOMETA LUIS FELIPE

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final:

(Siete punto cero) 7.0

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

RAÚL ALEJANDRO PÉREZ SEGOVIA

A DIOS TODO PODEROSO: Por darme la vida, la fuerza interior para vencer obstáculos y poder alcanzar la meta.

A MIS PADRES: les agradezco profundamente su amor incondicional y su apoyo constante. Su fe en mí ha sido el motor que me permitió completar este camino.

A MI HERMANO: por sus palabras de aliento, y a mis abuelos, por su presencia y cariño, gracias por ser mi pilar en los momentos difíciles. Sin ustedes, este logro no habría sido posible.

AMIGOS Y COMPAÑEROS: por su compañía y apoyo en los momentos de estrés y alegría. Ustedes fueron mi red de contención y su amistad me ayudó a mantener el ánimo en los momentos más duros. Cada uno de ustedes contribuyó a que este proceso fuera más llevadero y significativo.

LUIS FELIPE VARGAS ZOMETA

A DIOS TODO PODEROSO: Porque me ha regalado vida, salud y ayuda en cada una de las facetas de mi vida y lograr alcanzar mis metas.

A MIS PADRES: Por darme la vida, amor y apoyo incondicional, apoyándome constantemente para poder alcanzar mis metas y mucho más, brindándome consejos e impulsarme más haya de mis metas.

A MI HERMANO: Por apoyarme en todo momento.

MIS AMIGOS Y FAMILIARES: Por brindarme de su ayuda, apoyo y fortaleza para poder alcanzar mis objetivos, dándome aliento a no rendirme.

A MIS MAESTROS: Por brindarnos de sus conocimientos y enseñarme con dedicación y esmero para formar lo que hoy soy.

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

PHD. CARLOS POCASANGRE: Gracias a su valiosa asesoría en el desarrollo de este proyecto de investigación y por compartir generosamente sus conocimientos durante nuestra etapa académica, pudimos contar con su experiencia, paciencia y apoyo incondicional, elementos fundamentales en la culminación de este importante trabajo. Su orientación no solo aportó claridad académica, sino que también nos brindó la motivación necesaria en los momentos de incertidumbre. Su confianza en nosotros fue el impulso que necesitábamos para perseverar y superar los obstáculos presentados.

Srta. REINA VIDES: Gracias por su apoyo incondicional, amistad, cariño, valiosos consejos y cuidado durante nuestra etapa académica y el proceso de investigación.

DOCENTES DE LA EIE: Por transmitirnos sus conocimientos y darnos una idea de cómo afrontar los problemas que se nos puedan presentar en el mundo laboral y personal.

Queremos expresar nuestro agradecimiento a todos los colegas y colaboradores que formaron parte de esta investigación. Su contribución en la recopilación de datos, revisión de nuestro trabajo y valiosos comentarios ha enriquecido este proyecto de formas inesperadas. Esta tesis es el fruto de un esfuerzo conjunto, y su colaboración fue fundamental para llevarla a cabo. Esperamos que este trabajo pueda servir de inspiración para las nuevas generaciones en el desarrollo de futuros proyectos.

CONTENIDO

CONTENIDO	8
CAPITULO I: ENERGÍA GEOTÉRMICA.	4
1.1 ¿Qué es la energía geotérmica?	4
1.2 Historia de la energía geotérmica:	4
1.3 Energía geotérmica en El Salvador	7
1.4 Clasificación de la energía geotérmica	8
1.5 Proceso de generación	15
1.6 Proceso de conversión de energía	17
CAPÍTULO 2. MODELADO NUMÉRICO Y COMPUTACIONAL.....	25
2.1 ¿Que es un modelo?	25
2.2 ¿Qué es un modelo Mental?.....	25
2.3. ¿Qué es un modelo Verbal?.....	25
2.4. ¿Qué es un modelo grafico?.....	26
2.5. ¿Qué es un modelo físico?	26
2.6. ¿Qué es un modelo numérico?	27
2.7 Método de elementos de frontera.....	28
2.8 Método de elementos infinitos	28
2.9 Método de diferencias finitas	29
2.10 Modelo analítico	33
CAPÍTULO 3. HYDROTHERM	35
3.1 Conociendo software HYDROTHERM	35
3.2 Ecuaciones y funciones del software.....	36
3.3 Propiedades, funciones y coeficientes de transporte.....	40

3.4 Variables de archivo de entrada	48
3.5 Condiciones del software	67
3.6 Condiciones iniciales.....	70
3.7 Números sin dimensiones.....	72
3.8 Instalación del software HYDROTHERM.....	74
CAPÍTULO 4. PRODUCCIÓN GEOTÉRMICA EN YACIMIENTO AHUACHAPÁN	94
4.1 Sus inicios.....	94
4.2 Características del sistema geotérmico	96
4.3 Ubicación de los pozos geotérmicos:	101
4.4 Ubicación y origen	103
4.5 Descripción del funcionamiento de la planta geotérmica de Ahuachapán.....	104
CAPÍTULO 5. MODELADO DEL RESERVORIO	108
5.1 Antecedentes	108
5.2 Modelo base	108
RESULTADOS	121
CONCLUSIÓN	126
GLOSARIO	127
BIBLIOGRAFÍA:	131

ILUSTRACIONES

Figura 1 Ubicación de Centrales Geotérmicas de El Salvador.....	2
Figura 2 Primera Máquina Generadora	5
Figura 3 Central Geotérmica Larderello 1	6
Figura 4 Mapa Geológico De El Salvador	7
Figura 5 Esquemático De La Estructura Interna Del Planeta.....	9
Figura 6 Esquemático de Funcionamiento Energía Geotérmica en Baja Entalpia.....	10
Figura 7 Ciclo de Generación en Alta Entalpia.....	11
Figura 8 Esquemático de Sistema Hidrotermal Convectivo	12
Figura 9 Proceso de Generación.....	15
Figura 10 Generador y Turbina Mitsubichi 30 MW	17
Figura 11 Transformador Elevador	18
Figura 12 Torre de Enfriamiento	19
Figura 13 Ciclo de Generación Eléctrica	20
Figura 14 Sistema de Calefacción Basado en Geotérmica.....	21
Figura 15 Climatización Aprovechando el Calor de la Tierra.....	22
Figura 16 Geotermia Utilizada para Agua Caliente	23
Figura 17 Secador de Alimento.....	24
Figura 18 Área Bajo la Curva.....	29
Figura 19 Representación de Nodos.....	30
Figura 20 Representación de un Vector de Desplazamiento	30
Figura 21 Vector de Desplazamiento en un Analisis Espacial	31
Figura 22 Comparación de Nodos.....	32
Figura 23 Instalación de Software WSL	74
Figura 24 Activación de Característica Subsistema Linux.....	75
Figura 25 Instalación de Característica WSL2	75
Figura 26 Paquete de Actualización Software WSL	76
Figura 27 Descarga de Herramienta Informática Python 3.12.....	77
Figura 28 Descarga Subsistema Linux	78
Figura 29 Instalación de Compilador Makefile	79
Figura 30 Instalación de Compilador Gfortran	80

Figura 31 Verificación de Version Gfortran	81
Figura 32 Instalación de Visual Studio Code	82
Figura 33 Instalación de Notepad++	83
Figura 34 Manuales e Instaladores de HYDROTHERM.....	84
Figura 35 Descarga de Paquetes de Instalación	85
Figura 36 Ficheros de Instalación de Software	89
Figura 37 Compilación para Generar Launcher del Software.....	90
Figura 38 Finalización de Lanzador de Software.....	90
Figura 39 Entrada de Archivos de Modelo.....	91
Figura 40 Archivos de Salida Modelo.....	91
Figura 41 Librerías Auxiliares para Respuesta Grafica.....	92
Figura 42 Ejecución de Código para Obtención de Respuesta Grafica	92
Figura 43 Respuesta Grafica Resultante de Modelo Ingresado	93
Figura 44 Modelo de Campo Geotérmico de Ahuachapán	94
Figura 45 Bosquejo de Pozo Geotérmico.....	95
Figura 46 Composición de Campo Geotérmico	97
Figura 47 Modelo Geológico del Campo Geotérmico de Ahuachapán.....	98
Figura 48 Distribución de Pozos Geotérmicos Central Geotérmica Ahuachapán.....	101
Figura 49 Planta Geotérmica de Ahuachapán	103
Figura 50 Tuberías de Transporte Vapor -Agua	105
Figura 51 Vista Lateral de Alavés de Turbina	106
Figura 52 Grafica Anual de Producción Eléctrica de la Central Geotérmica de Ahuachapán.	107
Figura 53 Modelo de Campo Geotérmico de Ahuachapán	109
Figura 54 Modelo Tridimensional.....	113
Figura 55 Representación Gráfica de Composición Modelo	114
Figura 56 Distribución de Zonas para Modelo Tridimensional.	116
Figura 57 Bosquejo de Modelo Numérico	117
Figura 58 Primera Lamina de Modelo Numérico	118
Figura 59 Novena Lamina de Modelo Numérico.....	118
Figura 60 Archivos de Salida de Modelo Numérico	120

Figura 61 Respuesta Grafica para 10000 Años	121
Figura 62 Respuesta Grafica para 20000 Años	122
Figura 63 Respuesta Grafica para 30000 Años	122
Figura 64 Respuesta Grafica para 40000 Años.	123
Figura 65 Respuesta Grafica para 10000 Años Lamina 10	123
Figura 66 Respuesta Grafica para 20000 Años Lamina 10	124
Figura 67 Respuesta Grafica para 30000 Años Lamina 10	124
Figura 68 Respuesta Grafica para 40000 Años Lamina 10	125

TABLAS DE CONTENIDO

Tabla 1 Definición de variables.....	37
Tabla 2 Definición de variables.....	38
Tabla 3 Definición de variables.....	38
Tabla 4 Definición de variables.....	40
Tabla 5 Ecuaciones de permeabilidad para profundidades	42
Tabla 6 Definición de variables.....	42
Tabla 7 Definición de variables.....	43
Tabla 8 Definición de variables.....	43
Tabla 9 Definición de variables.....	45
Tabla 10 Definición de variables.....	45
Tabla 11 Ecuaciones de medio poroso	46
Tabla 12 Definición de variables.....	46
Tabla 13 Definición de variables.....	47
Tabla 14 Definición de variables.....	48
Tabla 15 Variables Hydrotherm (dimensiones, paso de tiempo).....	49
Tabla 16 Variables Hydrotherm(iteraciones).....	50
Tabla 17 Variables Hydrotherm (métodos de solución)	51
Tabla 18 Variables Hydrotherm (ponderación, promedio y permeabilidad)	52
Tabla 19 Variables Hydrotherm (propiedades rocas)	53
Tabla 20 Variables Hydrotherm(Salidas).....	54
Tabla 21 Variables Hydrotherm.....	55
Tabla 22 Variables Hydrotherm.....	55
Tabla 23 Variables Hydrotherm.....	56
Tabla 24 Variables Hydrotherm (Intervalos de tiempo)	57
Tabla 25 Variables Hydrotherm.....	58
Tabla 26 Variables Hydrotherm.....	59
Tabla 27 Variables Hydrotherm.....	60
Tabla 28 Variables Hydrotherm.....	61
Tabla 29 Variables Hydrotherm.....	62
Tabla 30 Variables Hydrotherm.....	63

Tabla 31 Variables Hydrotherm.....	64
Tabla 32 Variables Hydrotherm.....	65
Tabla 33 Variables Hydrotherm.....	66
Tabla 34 Definición de variables.....	68
Tabla 35 Definición de variables.....	70
Tabla 36 Definición de variables.....	71
Tabla 37 Definición de variables.....	72
Tabla 38 Definición de variables.....	73
Tabla 39 Definición de variables.....	73
Tabla 40 Valores de producción de pozos geotérmicos.....	102
Tabla 42 Parámetros para simulación.....	112
Tabla 42 Parametros de Simulación	115

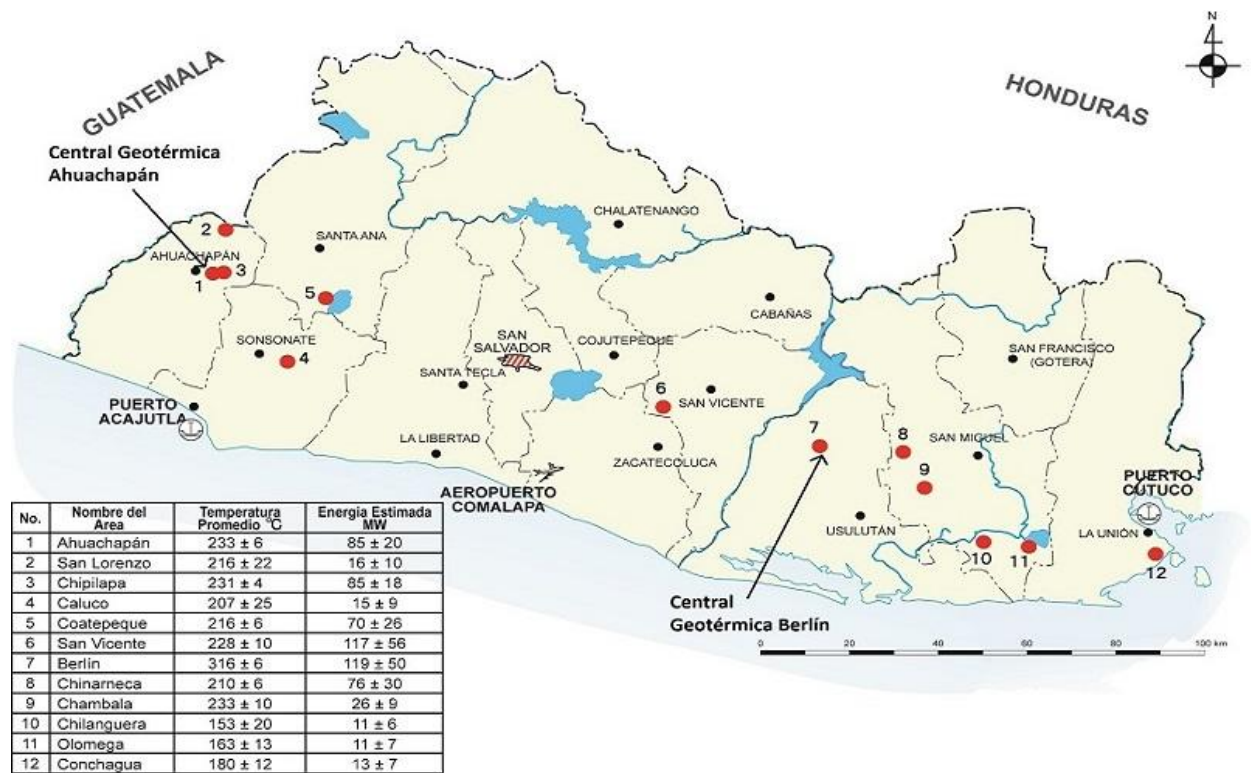
INTRODUCCIÓN

La generación de energía geotérmica consiste en aprovechar el calor interno del planeta, por medio de la desintegración de isótopos radioactivos y los movimientos diferenciales que constituyen las diferentes capas de la tierra, se transforma en energía eléctrica o en calor para uso humano, procesos industriales o agrícolas (Moreira et al., 1980). Este calor se transmite a través de las rocas las cuales están compuestas por uno o más minerales sólidos por medio de conducción o convección. La Tierra tiene una gran cantidad de energía geotérmica, pero solo una fracción puede ser aprovechada debido a que esta requiere de un medio de transporte, es por esto por lo que únicamente en áreas que contengan algún fluido se puede utilizar esta energía, como el agua (líquida o vapor) que llena las fracturas y poros de las formaciones rocosas que constituyen la litosfera (en los sistemas de roca seca se introduce el agua desde afuera y una vez dentro del sistema esta se calienta para más adelante ser extraída).

Según (LaGEO, 1999a), en El Salvador la producción de energía geotérmica se inició en 1975, con la operación de la primera unidad de 30 MW en Ahuachapán. Durante el periodo de 1956 –1968 se estaría realizando la creación de un mapa geotérmico del país en donde se estaría ubicando las principales fuentes de energía geotérmica. Actualmente dispone de una capacidad instalada de generación geotérmica de 161 MW. De los cuales 95 MW corresponden a la central geotérmica de Ahuachapán, los cuales son el resultado de la extracción de la zona productora geotérmica de la central, la cual con el paso del tiempo va sufriendo cambios notables que afectan la capacidad productiva, teniendo como principal objetivo el estudio de comportamiento del reservorio de esta zona y como va evolucionando a lo largo del tiempo por medio del software HYDROTHERM que está desarrollado con esta finalidad.

Figura 1

Ubicación de Centrales Geotérmicas de El Salvador.



Nota: Ubicación geográfica de pozos productores energía geotérmica con los valores de temperatura promedio y energía estimada.(Por La et al., 2009)

OBJETIVOS

Objetivo general:

-Diseñar un modelo numérico basado en Hydrotherm para mostrar una representación gráfica en 3D de los diversos parámetros de generación geotérmica en Ahuachapán.

Objetivos específicos:

1-Desarrollar un modelo en 3D que se asemeje a la producción energética que produce el reservorio geotérmico.

2-Analizar el comportamiento de los parámetros, teniendo en cuenta criterios preestablecidos de generación y sondeo así mismo el comportamiento subterráneo del agua.

3-Mostrar un bosquejo tridimensional de la generación geotérmica.

4-Estudio de tiempo en el cual se observará cómo va cambiando la formación rocosa y fuente de calor durante un periodo.

CAPITULO I: ENERGÍA GEOTÉRMICA.

1.1 ¿Qué es la energía geotérmica?

Es una energía renovable obtenida de los fenómenos naturales del planeta que producen calor en el interior de la tierra asociados a sistemas volcánicos activos, el cual se propaga a través de los cuerpos de roca o piedras calientes. Dentro de los eventos naturales relacionados con la geotermia se encuentran los volcanes, géiseres, fumarolas, aguas termales entre muchas otras.(LA GEO, 1999)

1.2 Historia de la energía geotérmica:

En el siglo XIX se iniciaron procesos para aprovechar la energía térmica del planeta como fuente de energía. los primeros intentos de producción eléctrica a base de energía térmica se dieron en Italia, Francesco Giacomo Larderel utilizó vapor de aguas geotérmicas cercanas al Montecerboli, dichas aguas se utilizaron para calentar calderas de las fábricas químicas las cuales producían ácido bórico, consiguiendo aumentar significativamente la producción y logrando asimismo un costo menor en consumo energético.(Dirección General de Industria, 2008; ENERGIA EVOLUCIONA, 2023)

Un siglo después alrededor del año 1904 se declara el nacimiento de las plantas de energía geotérmica. Con ello se inician los experimentos para probar la efectividad de producir energía eléctrica. Uno de los experimentos realizados en ese mismo año a cargo del empresario Piero Ginori Conti consistió en probar la productividad de energía eléctrica partiendo de energía geotérmica , durante el experimento se utilizó un pozo de vapor en donde la presión de vapor acciona un motor de émbolo el cual se encontraba acoplado a un dinamo de 10 kW de potencia.

Dicho dispositivo logró generar energía con la capacidad de alimentar 5 bombillas pequeñas, esto contribuyó a obtener más información sobre este proceso de generación así mismo las características y varianzas que pueden ocurrir durante este proceso.(Andres Portugal Bellido, 2023)

Figura 2

Primera Máquina Generadora

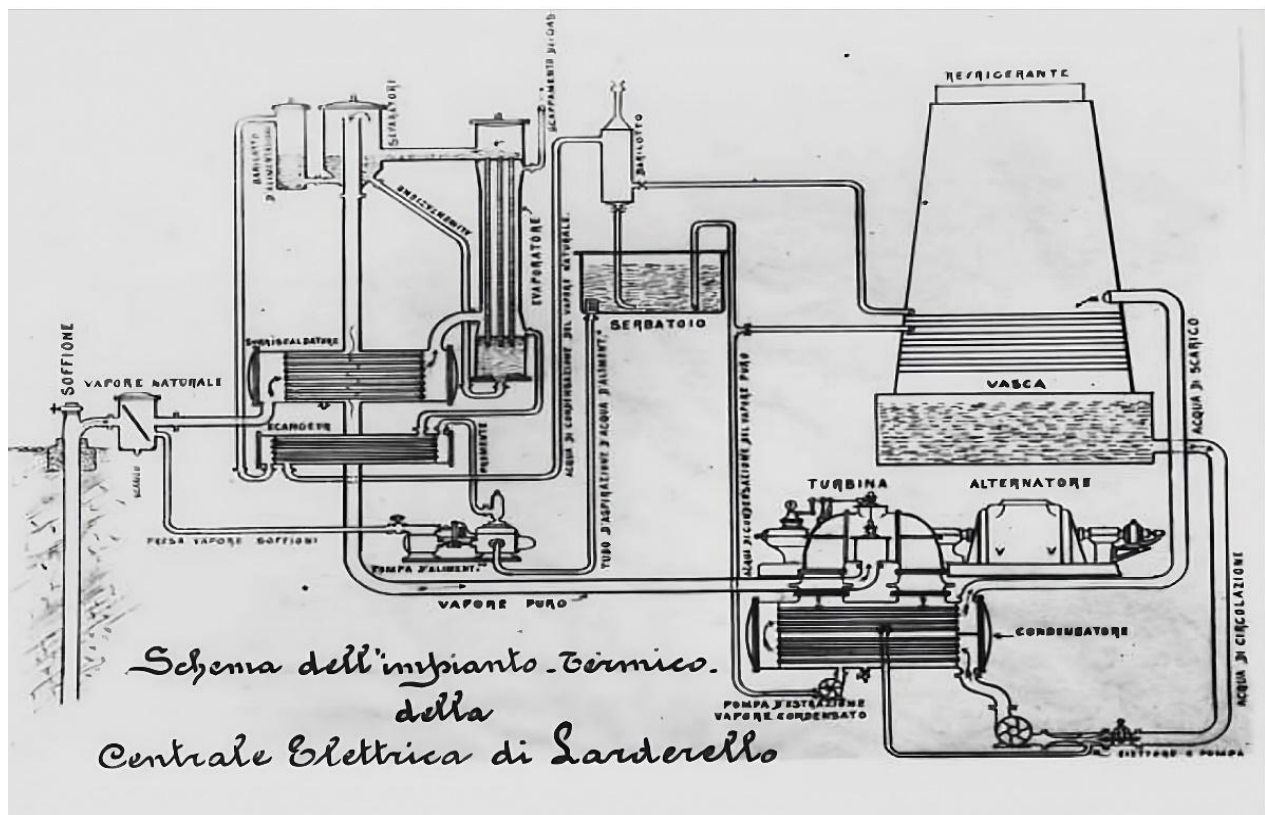


Nota: Máquina de vapor reciproca la cual utilizaba energia geotermica desarrollada por el príncipe Piero Ginori Conti ([Andres Portugal Bellido, 2023](#))

Seguidamente en el año de 1912 se inició la construcción de la que sería la primera central geotérmica denominada Larderello 1 la cual se terminó de construir un año después teniendo una capacidad de producción de 250 kW, que sería ocupada para alimentar el ferrocarril y el consumo eléctrico de los pueblos aledaños de la zona. ([Andres Portugal Bellido, 2023](#))

Figura 3

Central Geotérmica Larderello 1



Nota: Esquema de funcionamiento de la primera central geotérmica Larderello (Andres Portugal Bellido, 2023; ENEL, 1993; Moreira et al., 1980)

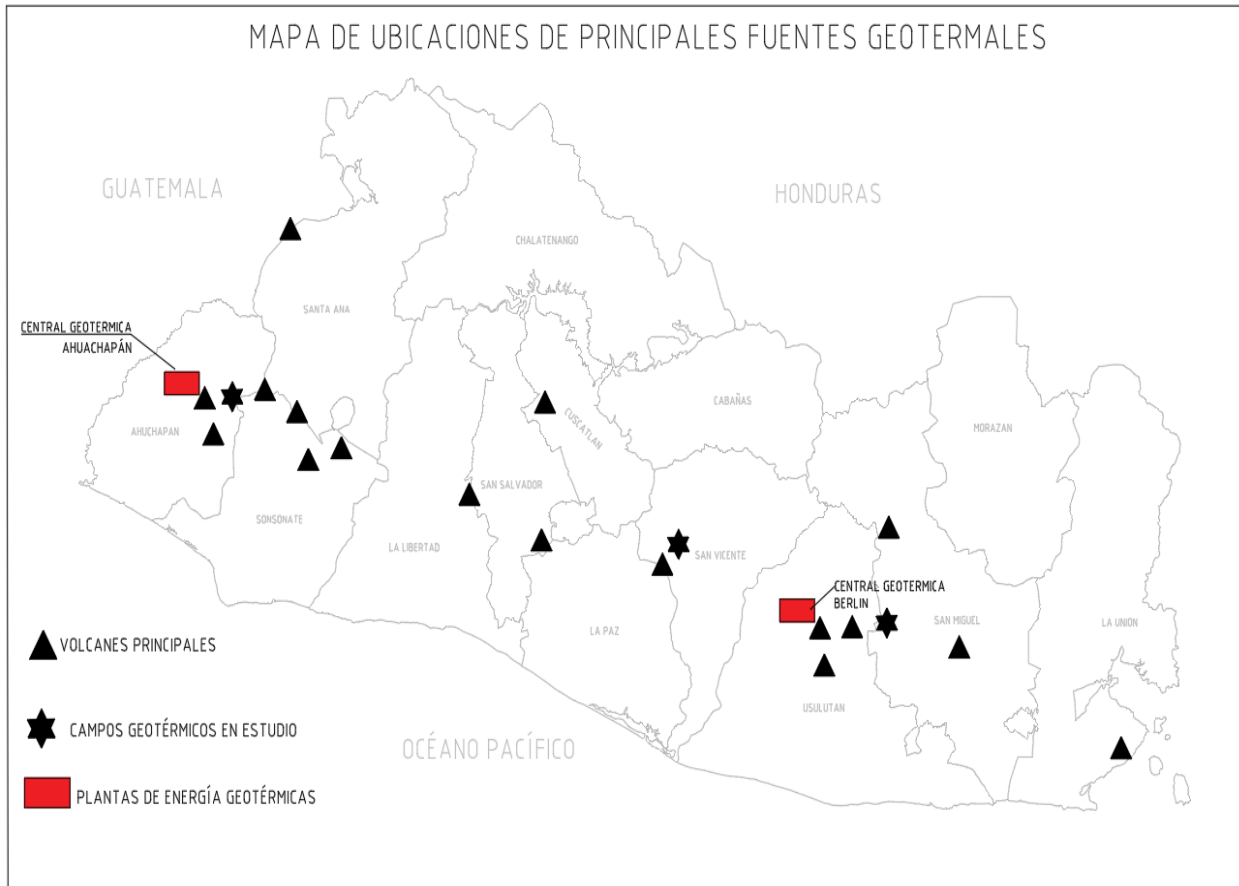
Este hecho marcaría el inicio de la producción de energía eléctrica a partir de la energía geotérmica. Uniendo a esta revolución de energías se integró Nueva Zelanda la cual comenzó a producir en el año de 1958, así mismo México inició su producción en 1959, Estados Unidos en el año de 1960 y unos años más tarde, alrededor del año 1973 se produjo una escasez de petróleo el cual obligó a otros países a optar por la generación de electricidad a base de energía geotérmica dentro de estos países se encuentran Japón, Islandia y El Salvador. En el año de 1975 se unió Indonesia, Kenia, Turquía y Filipinas, entre los años 1980 y 1995 se agregaron Nicaragua, Costa Rica, Guatemala. (Andres Portugal Bellido, 2023; ENEL, 1993; Moreira et al., 1980)

1.3 Energía geotérmica en El Salvador

En la década de 1956 a 1968 se mapea geológicamente El Salvador, logrando descubrir las posibles fuentes de producción a base de energía geotérmica.

Figura 4

Mapa Geológico De El Salvador



Nota: Ubicación geográfica de los volcanes y centrales geotérmicas de El Salvador. (LaGeo, 2005)

La producción inició en el año de 1975 con la puesta en marcha de la primera unidad generadora a base de energía geotérmica ubicada en el departamento de Ahuachapán teniendo una capacidad de generación de 30 MW la cual utilizaba vapor a una presión de 5.6 bar para producir. Un año años más tarde se estarán agregando otra unidad con las mismas características de funcionamiento y producción, el funcionamiento de la central permaneció durante mucho tiempo hasta que en el año

1980 se estaría incorporando una unidad de 35 MW con la novedad de que esta unidad podría trabajar con presión de 1.6 bar y 5.6 bar.

Tras transcurrir 12 años aproximadamente (1992) la central de energía Geotérmica ubicada en Berlín departamento de Usulután estaría iniciando operaciones con dos unidades a contrapresión de 5 MW cada unidad.

Después de dos años estarían entrando en operación otras dos unidades con la diferencia de que estas funcionan a condensación con una capacidad generadora de 28.1 MW cada una, en el año de 2007 se estarían agregando dos unidades más presentando un aumento considerable de generación debido a la unidad de 40 MW funcionando con condensación y otro aumento de 9.2 MW por parte de la otra unidad.

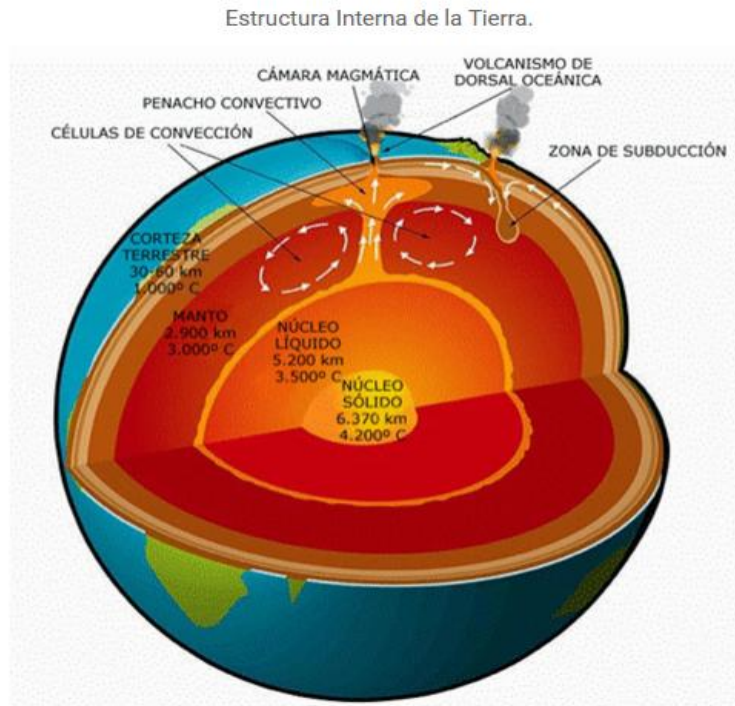
Actualmente solo se encuentran funcionando las últimas cuatro unidades logrando tener una potencia instalada de 110 MW. (LaGEO, 1999a, 1999b)

1.4 Clasificación de la energía geotérmica

Como anteriormente definimos, la energía geotérmica es una forma de extracción de energía amigable con el medio ambiente conocidas también como Energías Renovables, este tipo de energía se basa en la utilización del calor almacenado en el interior de la tierra el cual se transmite por medio de los cuerpos de rocas por conducción o convección genera vapor al haber una interacción entre venas de agua subterráneas y rocas, dando así origen a lo que conocemos como sistemas geotérmicos. (NATIONAL GEOGRAPHIC, 2023)

Figura 5

Esquemático De La Estructura Interna Del Planeta



Nota: Temperaturas internas del planeta con la cual se produce energía geotérmica ([NATIONAL GEOGRAPHIC, 2023](#))

Los sistemas geotérmicos existentes en el planeta los podemos dividir en base a temperatura (baja entalpía y alta entalpía) y en base al fluido que se inyecta para la extracción de calor de las rocas, teniendo en cuenta que la entalpía es la cantidad de energía que un sistema puede intercambiar con su entorno a través de calor. Dentro de estos sistemas geotérmicos los más reconocidos son: Sistemas hidrotermales convectivos, sistemas geotérmicos de roca seca caliente también conocidos como sistemas geotérmicos mejorados, sistemas geotérmicos geo presurizados, sistemas geotérmicos marinos, sistemas geotérmicos magmáticos y sistemas geotérmicos supercríticos.

1.4.1 Energía geotérmica de baja entalpía

Es energía térmica que se encuentra en el interior de la tierra a una profundidad estimada de 20 a 200 metros teniendo una temperatura relativamente baja menor a 30 °C, este tipo de energía puede ser utilizado por medio de sistemas de captación de calor de rocas, suelos o aguas subterráneas para fines de climatización, calefacción de edificios, invernaderos o la elaboración de agua caliente para

uso sanitario. entre otros. Con la única desventaja que por su baja energía calorífica no es posible emplearla para la generación de energía. En la siguiente imagen podemos apreciar una de las aplicaciones de la geotermia de baja entalpia. (Dirección General de Industria, 2008; GEOTERMIA VERTICAL, 2023)

Figura 6

Esquemático de Funcionamiento Energía Geotérmica en Baja Entalpia



Nota: La energía geotérmica de baja entalpia aplicada a climatización de un hogar, siendo factible debido a que temperatura del subsuelo es constante . (GEOTERMIA VERTICAL, 2023)

1.4.2 Energía geotérmica de alta entalpía

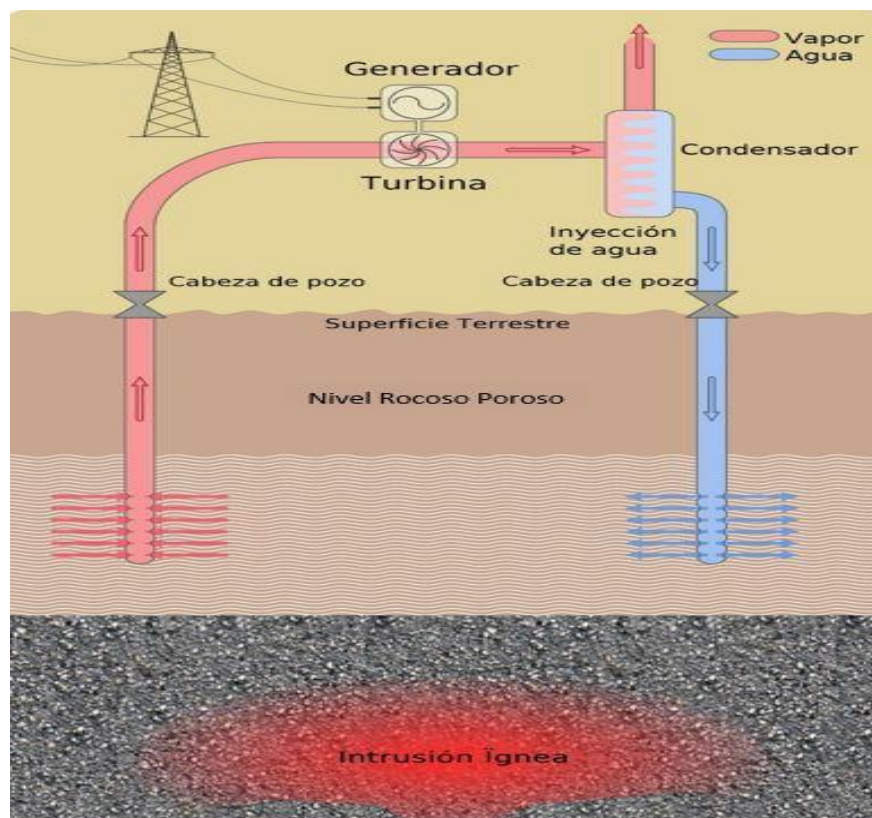
La energía geotérmica de alta entalpia es aquella energía que proviene del calor almacenado en el interior de la tierra teniendo una de temperatura superior a 150 °C, se genera a partir del calor proveniente del núcleo de la tierra normalmente presentada en áreas con actividad volcánica o geotérmica, se considera una fuente de energía renovable y limpia ya que no produce emisiones significativas de emisiones de gases de efecto invernadero con una disponibilidad constante, convirtiéndose en una fuente de energía confiable, este tipo de energía se utiliza principalmente para la generación de electricidad a través de centrales geotérmicas además se puede utilizar en

procesos industriales para proveer calor en procesos de secado o climatización. (apparenovables, 2023).

Para su obtención se perforan pozos profundos en la tierra logrando extraer vapor o agua caliente ubicada en el subsuelo, luego de ello este vapor es utilizado para propulsar turbinas o generar electricidad. A pesar de ser una energía amigable con el medio ambiente este puede tener impacto si no se realiza de manera responsable y cumpliendo con las regulaciones ambientales.

Figura 7

Ciclo de Generación en Alta Entalpia



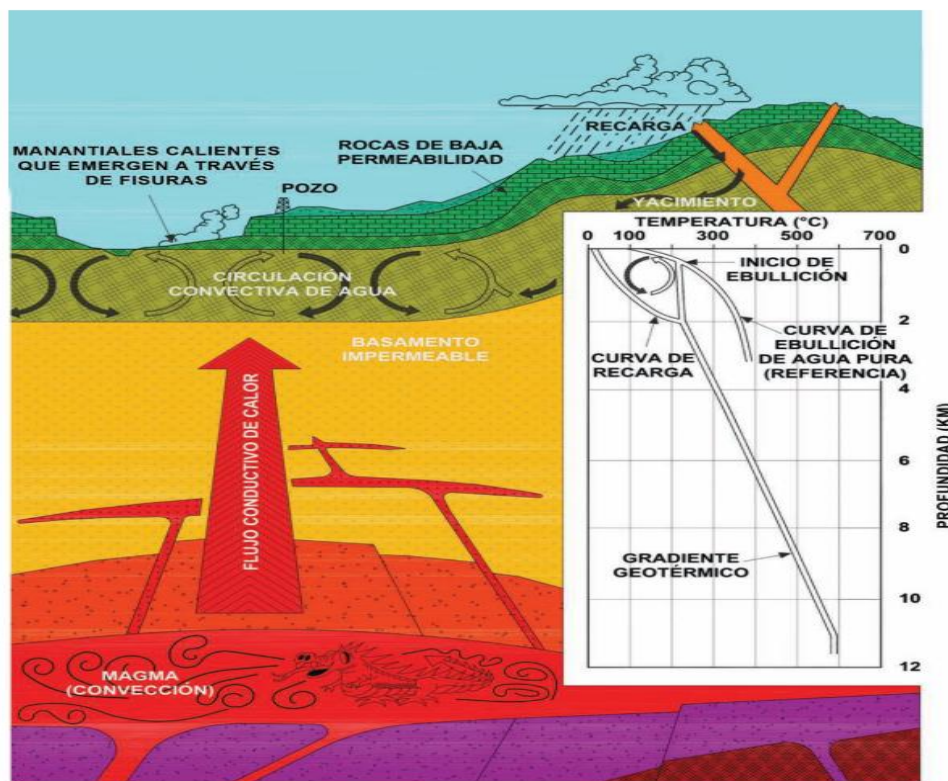
Nota: Se observa el ciclo de generación de energía el cual inicia extrayendo agua de acuíferos sobrecalentados los cuales son enviados luego de procesarlos a las turbinas para generar electricidad y posteriormente el agua o vapor que se enfrían y son separados en el proceso se reinyectan nuevamente al acuífero para que vuelvan a calentarse convirtiéndose en un ciclo cerrado para la generación. (apparenovables, 2023; Ministerio de Defensa, 2024)

1.4.3 Sistemas hidrotermales convectivos

Este tipo de sistemas está formado por una fuente de calor la cual calienta el fluido cercano, generalmente estas fuentes de calor son rocas calientes o magna las cuales se encuentran en el subsuelo de la corteza terrestre. Los fluidos se impregnan en la corteza terrestre a través de los poros y fracturas hasta alcanzar los yacimientos donde se almacenan durante mucho tiempo, estos se manifiestan en la superficie terrestre por medio de geiseres, manantiales, lagunas de lodo hirviendo entre otras formas. Esto es posible debido a la diferencia de densidad que existe entre las capas de tierra y el agua caliente provocando que esta ascienda hacia la superficie. (Edgar Santoyo & Rosa Maria, 2010)

Figura 8

Esquemático de Sistema Hidrotermal Convectivo



Nota: Este tipo de sistemas se genera a partir de la transferencia de fluidos comúnmente agua que se ve desplazada por las diferencias de temperaturas y densidades. (Edgar Santoyo & Rosa Maria, 2010)

1.4.4 Sistemas geotérmicos de roca seca caliente

Este tipo de sistemas también es conocido como sistemas geotérmicos mejorados en el cual se aprovecha el calor natural de la tierra para generar electricidad o proporcionar calefacción. Se usan técnicas avanzadas para aumentar la eficiencia y producción de la energía, como la inyección de fluidos mejorando la circulación de calor o la fracturación hidráulica para aumentar la permeabilidad de las rocas. Logrando así ser un sistema con alto potencial térmico, se caracterizan principalmente por la disponibilidad de calor y la ausencia de fluidos por las características geológicas propias del sistema, conformado muchas veces por rocas cristalinas y no permeables, este tipo de sistemas se basa en la creación de un yacimiento artificial fracturado, mediante técnicas de fracturación hidráulica y haciendo uso de la inyección de agua a temperatura ambiente de un pozo inyector para estos fines. Esta agua es calentada por conducción al momento de entrar en contacto con la roca caliente para luego extraer la presión y temperatura cuando cumplan con los estándares requeridos para generación. (Universidad de la Laguna, 2022)

1.4.5 Sistemas geotérmicos geo presurizados

Este sistema almacena y aprovecha la energía térmica almacenada en rocas o fluidos subterráneos a altas presiones alrededor de los 700 bares, se caracteriza por la existencia de reservorios de agua caliente o vapor a profundidades significativas bajo la superficie terrestre generando presiones mayores que la atmosférica. Esta presión ayuda a impulsar el flujo de fluidos geotérmicos hacia la superficie, lo que facilita su aprovechamiento para la generación de energía eléctrica o térmica. (Edgar Santoyo & Rosa Maria, 2010; Universidad de la Laguna, 2022)

1.4.6 Sistemas geotérmicos marinos

Estos sistemas se concentran en la explotación de la energía geotérmica que se encuentra debajo del lecho marino. Esto implica la extracción de calor proveniente del magma o de otras fuentes geotérmicas subyacentes en zonas submarinas, como las dorsales oceánicas, para generar electricidad o para usos térmicos directos. Este tipo de sistemas presenta desafíos técnicos únicos debido al entorno marino, pero también ofrece oportunidades para el aprovechamiento sostenible de energía renovable. (Edgar Santoyo & Rosa Maria, 2010)

1.4.7 SISTEMAS GEOTÉRMICOS MAGMÁTICOS

Los sistemas geotérmicos magmáticos aprovechan el calor generado por el magma o la actividad volcánica, donde el calor del magma cercano calienta el agua subterránea, formando reservorios de vapor o líquidos calientes. Este calor puede ser aprovechado directamente para la generación de electricidad mediante turbinas o para usos térmicos directos, como calefacción o procesos industriales. Los sistemas geotérmicos magmáticos representan una forma poderosa y natural de energía renovable, pero su explotación puede presentar desafíos técnicos y riesgos asociados con la actividad volcánica.(Edgar Santoyo & Rosa Maria, 2010)

1.4.8 SISTEMAS GEOTÉRMICOS SUPERCRÍTICOS

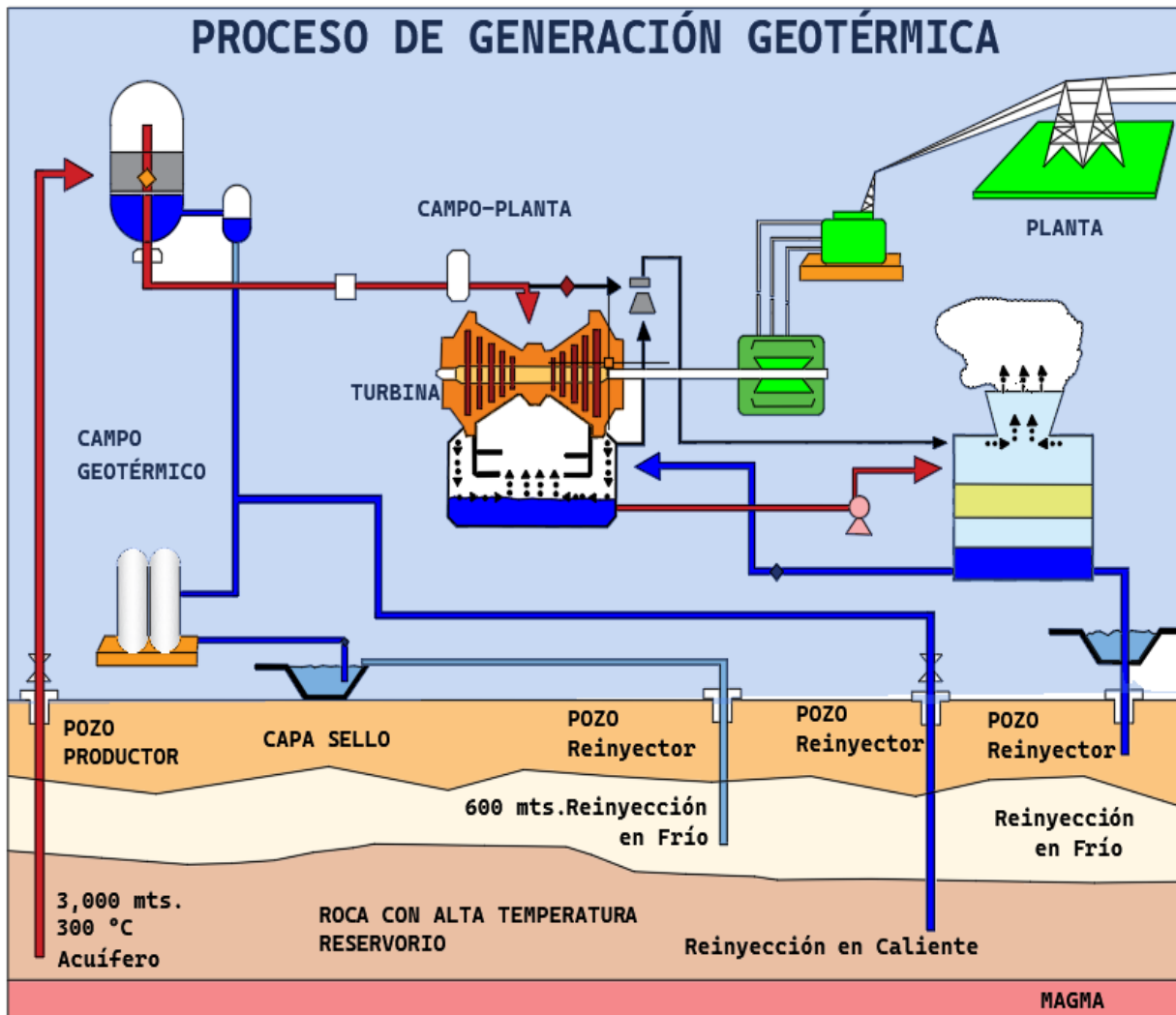
Estos sistemas superan la presión y temperatura del fluido geotérmico exceden del punto crítico del agua, es decir, superan los 374 grados Celsius y los 22,1 Mpa. En estas condiciones, el agua no se encuentra en estado líquido ni gaseoso, sino en estado intermedio conocido como supercrítico, que exhibe propiedades únicas y altamente eficientes para la transmisión de calor. Los sistemas geotérmicos supercríticos tienen el potencial de producir electricidad de manera más eficiente que los sistemas convencionales de baja y media temperatura, lo que los convierte en una opción prometedora para la generación de energía geotérmica en el futuro. Pueden alcanzar eficiencias cercanas al 50%, lo que los convierte en una opción muy eficiente para la generación de electricidad.(Edgar Santoyo & Rosa Maria, 2010)

1.5 Proceso de generación

Se describe el proceso de generación eléctrica basado en la extracción y procesamiento de energía geotérmica paso a paso. (LaGEO, 1999b)

Figura 9

Proceso de Generación



Nota: Ciclo de producción de energía eléctrica a partir de la extracción de energía geotérmica (LaGEO, 1999b)

Paso 1. Identificar los sitios posibles con potencial geotérmico, realizando análisis de temperatura y de flujo de calor en el área seleccionada, evaluando si existe una estabilidad geotérmica y disponibilidad de recursos hídricos para su uso.

Paso 2. Realizar estudios geológicos, geofísicos y geoquímicos minuciosamente sobre la región, seguidamente se procede a perforar pozos de exploración para medir la presión y temperatura subterránea, tomando y analizando muestras de fluidos geotérmicos para determinar su composición y viabilidad. En donde el estudio geológico es identificar la ubicación y tamaño de las áreas de interés para obtener los métodos de investigación más apropiados. El estudio geofísico consiste en obtener los parámetros físicos de las formaciones naturales como la densidad, conductividad, etc. El estudio geoquímico se encargará posibles respuestas del sistema como por ejemplo las temperaturas esperadas, tipo de fluidos, fuentes, edad de las formaciones y de los fluidos que transitan.

Paso 3. Es la perforación de pozos de producción en la cual se inician perforando pozos profundos hasta alcanzar el reservorio geotérmico luego se procede a instalar revestimiento para garantizar la integridad estructural y evitar la contaminación de las demás capas geológicas.

Paso 4. Consistirá en la extracción de agua caliente o vapor del reservorio geotérmico por medio de los pozos de producción controlando la presión y la temperatura para optimizar la eficiencia de la extracción.

Paso 5. Se realiza el traslado del vapor de agua caliente hacia la planta geotérmica en la cual pasará por el separador de humedad para ser enviado a la turbina la cual está acoplada a un generador para producir electricidad. Siendo el ciclo de energías de energía geotérmica a energía mecánica y luego a energía eléctrica.

Paso 6. Consistirá en la transmisión de energía la cual se realiza a través de líneas de transmisión conectadas a la red, para ello se necesitará de un transformador elevador el cual nos permitirá elevar el voltaje de 13,800 V a 11,5000 V para poder conectarlos a la red.

Cabe aclarar que es necesario tener un monitoreo continuo de la producción geotérmica, verificando los parámetros de presión, temperatura, flujo, entre otros. Así como proporcionar mantenimientos preventivos y correctivos de los equipos utilizados durante el proceso, cumpliendo con regulares ambientales y de seguridad orientadas al funcionamiento de una planta geotérmica.

1.6 Proceso de conversión de energía

Para que se realice la conversión de energía geotérmica a energía eléctrica es necesario una serie de procesos en los cuales se realiza la intervención equipos como lo son generadores, turbinas, eyectores entre otros, cumpliendo cada un rol importante durante el proceso de generación geotérmica como a continuación describiremos:

Generadores y turbinas

La turbina es un dispositivo que se encarga de transformar la energía geotérmica proveniente del calor en energía mecánica. Está compuesta por una serie de paletas rotativas que son impulsadas por el vapor de agua caliente proveniente de un pozo geotérmico. El generador es el encargado de transformar la energía mecánica generada por la turbina y transformarla en energía eléctrica.

Figura 10

Generador y Turbina Mitsubishi 30 MW



Nota: Turbina de 30 MW. marca Mitsubishi de 5 etapas de tipo impulso, la cual opera a una velocidad de 3600 RPM la cual pertenece a la central Geotérmica de Ahuachapán. (Central Geotérmica Ahuachapán, 2000; LaGEO, 1999b, 1999a)

Transformador

Se encarga de elevar la tensión de la electricidad generada por los generadores para que pueda ser transmitida de manera eficiente a lo largo de las líneas de transmisión de la red. Permitiendo reducir las pérdidas de energía durante el transporte garantizando un suministro constante y estable en la red.

Figura 11

Transformador Elevador



Nota: Transformador elevador de tensión instalado en subestación de la Central Geotermica de Ahuachapán.(LaGEO, 1999a)

Sistema de extracción

Está diseñado para capturar y descargar los gases generados durante el proceso de generación liberándolos a la atmosfera.

Condensador

Es el encargado de convertir el vapor de agua que proviene del flujo en agua líquida, esto se logra enfriando el vapor a través de un intercambiador de calor.

Torre de enfriamiento

Se utiliza para disipar el exceso de calor generado durante el proceso de generación de energía geotérmica en donde una bomba envía el agua hacia la parte superior de la torre de enfriamiento donde se distribuye uniformemente en una serie de láminas o rejillas que permite que el agua entre en contacto con el aire permitiendo que el fluido se enfríe y el calor es enviado a la atmósfera.

Figura 12

Torre de Enfriamiento



Nota: Las torres de enfriamiento se utilizan para reducir temperatura del agua proveniente del vapor exhausto de las turbinas.(LaGEO, 1999b)

1.7 Uso de la geotermia

La energía geotérmica es aquella que proviene del calor natural que irradia en centro de la tierra esta energía se transmite a través de los sistemas geológicos del planeta, siendo esto una energía amigable para el medio ambiente y su impacto es poco durante su proceso de extracción, este tipo de energía tiene muchos usos además de la generación eléctrica que es su principal uso, así mismo se puede ocupar en procesos industriales, sistemas de calefacción y muchos más.

1.7.1 aplicación en generación eléctrica

La primera aplicación de energía eléctrica, esta generación depende de la temperatura del yacimiento geotérmico, pudiendo ser de vapor seco, vapor de destello, ciclos binarios los cuales sirven para generar y son los tipos de vapor que utilizan las centrales geotérmicas para su generación, en cual a través de un proceso de generación en el cual las turbinas impulsadas por vapor que se extrae del subsuelo mueve el rotor del generador produciendo una interacción de flujo magnético entre el rotor y el estator se genera la electricidad, así mismo este proceso se explica más a fondo en este informe.

Figura 13

Ciclo de Generación Eléctrica



Nota: Esquemático de la generación geotérmica (LaGEO, 1999b)

1.7.2 Sistemas de calefacción

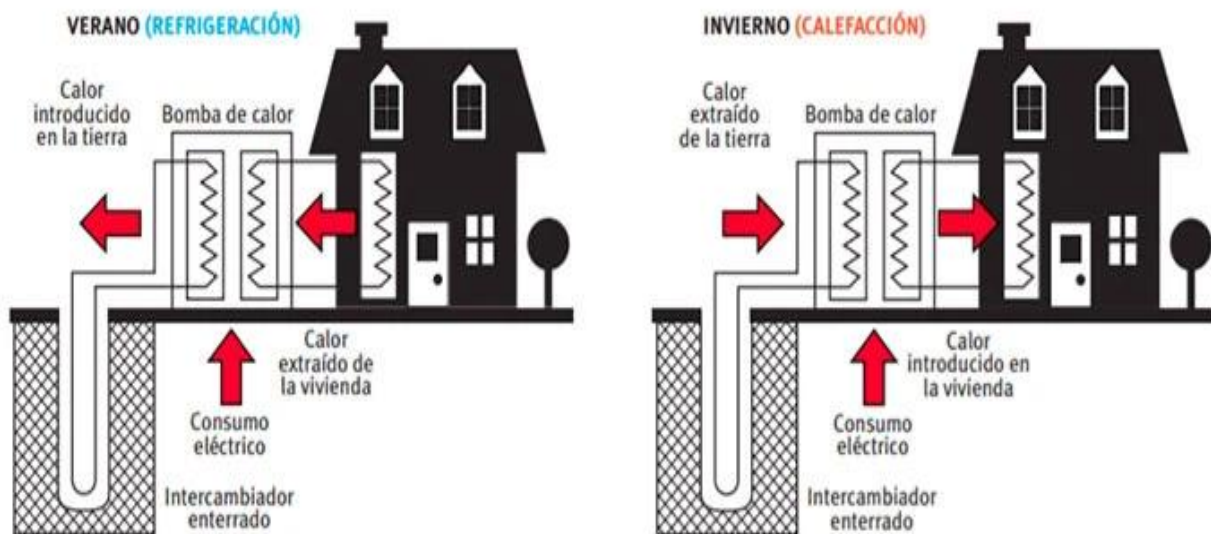
Consiste en provechar el calor y estabilidad térmica que la tierra mantiene, utilizando equipos de extracción geotérmica podemos obtener esta energía la cual podemos utilizar para calefacción de viviendas edificios entre muchos usos más.

Principio de funcionamiento

El proceso inicia con el aprovechamiento del calor residual que se encuentra en el subsuelo el cual es nutrido por la lluvia, calor proveniente del sol, calor entero del planeta que se mantiene constante a una temperatura de 10 a 15 °C, este calor se acumula en los conductos subterráneos del sistema. Para su extracción se utilizan equipos especiales como lo son las bombas de calor geotérmico, funcionara adsorbiendo o expulsando el calor del subsuelo o hacia el subsuelo, durante la temporada de invierno el calor residual de la tierra se absorbe por medio de los conductos de agua los cuales concentran el calor y lo usan para calefacción a través de la bomba de calor de agua o de aire. Así mismo se puede utilizar directamente en agua caliente con fines sanitarios. Este tipo de utilización se remonta desde la antigüedad, cuando los romanos ocupaban los manantiales de agua caliente para construir balnearios de vapor así como también se ocupaba en la cocina. En la actualidad se ocupan los yacimientos de geotérmicos en la cual aprovechan el calor del subsuelo para transformar en lo temperaturas adecuadas para calentar edificios, hogares, así mismo para cumplir los estándares el consumidor desee.

Figura 14

Sistema de Calefacción Basado en Geotérmica



Nota: Ilustración de uso de climatización haciendo uso del calor interno del planeta. (GeotermiaOnline, 2023)

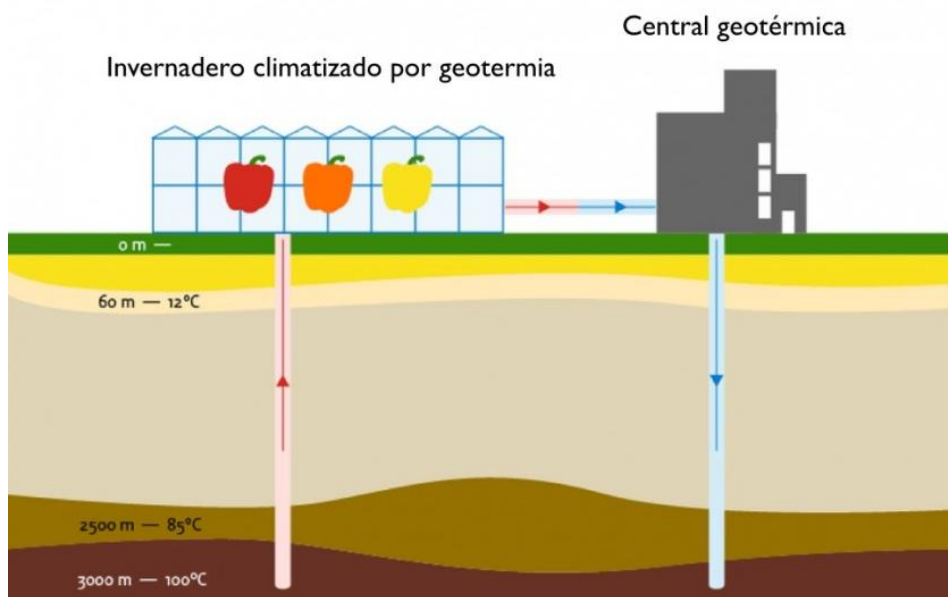
1.7.3 Agricultura e invernaderos

En la producción de productos agrícolas se necesita de un medio capaz de controlar el crecimiento de diversos organismos que impiden el correcto crecimiento de los productos, estos organismos como lo son los hongos son controlados por medio de la calefacción la cual se obtiene del calor de la tierra luego de aplicar un proceso de extracción, así mismo se utiliza para controlar la humedad de los cultivos específicamente cuando se tiene producción de cereales y granos básicos mejorando la calidad de los productos y teniendo costo más bajos sin necesidad de recurrir a combustibles fósiles para cumplir la misma tarea.

El sistema geotérmico aplicado a las galeras de producción consiste en la instalación de una serie de tuberías enterradas en el suelo encargándose de captar el calor del subsuelo, luego este calor se transfiere por medio del fluido que contienen las tuberías hasta el invernadero en donde se reparte para mantener una temperatura adecuada para el cultivo existente. Así como nos proporciona calor para ambientar la temperatura podemos utilizar la geotermia para refrigerar durante los meses de calor, debido a que la temperatura del suelo suele estar más fresca que la existente en medio exterior. (GeotermiaOnline, 2023)

Figura 15

Climatización Aprovechando el Calor de la Tierra



Nota: El calor extraído de las profundidades se aprovecha directamente para la ambientación de los cultivos minimizando los costos. (GeotermiaOnline, 2023)

1.7.4 Generación de agua caliente

Se utiliza en gran medida en zonas con alta actividad geotérmica donde acceder al calor interno es más fácil y se puede aprovechar de una manera más eficiente, para su obtención se utilizan bombas de calor las cuales lo extraen por medio de tuberías que se encuentran enterradas, en su interior contienen agua que circula dentro del sistema y por medio de conducción se transfiere el calor hacia el agua calentándola hasta obtener la temperatura deseada. Se utiliza para generar agua caliente sanitaria y calefacción en viviendas, edificios, hoteles e industria. (PANSOGAL, 2023)

Figura 16

Geotermia Utilizada para Agua Caliente



Nota: Esquemático de distribución de conductos para climatización de hogares, utilizando el calor existente en el suelo.(PANSOGAL, 2023)

1.7.5 Secado de alimentos

Para el secado de alimentos se ocupa el calor del interior del planeta para acelerar el proceso de secado de alimentos consistiendo en calentar el aire que circula alrededor eliminando la humedad de los alimentos, este tipo de practica se hace en regiones con fuentes de calor accesibles en la cual por medio de sistemas de ventilación envían el aire caliente hacia las bandejas en la cual se

colocan los alimentos siendo un proceso amigable para el medio ambiente y a su vez es un proceso de producción eficiente y rentable prolongando la vida útil de los alimentos .

La energía geotérmica es reconocida a nivel mundial como fuente de generación de electricidad amigable con el medio ambiente debido a que no produce gases tóxicos ni causantes de efecto invernadero, el uso de áreas de suelo no es extenso y con un manejo adecuado sus implicaciones ambientales son mínimas y fáciles de prevenir o mitigar.

Figura 17

Secador de Alimento



Nota: Deshidratador de alimentos haciendo uso del calor de interno del planeta. ([Gaceta UNAM, 2023](#))

En nuestro país nos ha partido la diversificar los procesos de producción energética, contribuyendo a la reducción de utilización de recursos fósiles y gas natural, permitiendo una mayor sustentabilidad energética así como una disminución ellos costos de energía para el usuario final. Así como tiene beneficios también existen impactos negativos como lo son la alteración de los ecosistemas en donde se crean las plantas geotérmicas así mismo podrían llegar a generar sismos por procesos de extracción del recurso. Actualmente la matriz de generación energética del mundo depende de la cantidad de recursos geotérmicos disponibles en cada país.

CAPÍTULO 2. MODELADO NUMÉRICO Y COMPUTACIONAL

2.1 ¿Que es un modelo?

Es un esquema de la representación simplificada de un sistema que busca explicar sus características y su comportamiento de la manera más comprensible. Siendo una herramienta que nos ayuda a comprender, entender y estimar posibles resultados a futuro. Este tipo de esquemas se pueden dividir en diversos tipos de modelado en función de la necesidad, fenómeno a estudiar y caso a estudiar, entre ellos tenemos, modelo metal, modelo verbal, modelo gráfico, modelos físicos, modelo matemático, modelo analítico. Modelo numérico y modelo computacional. (Fao.org, 2023)

2.2 ¿Qué es un modelo Mental?

Un modelo mental es una referencia de como percibimos el mundo y como este funciona, haciéndonos reflexionar analizar y crear modelos en nuestras mentes a partir de experiencias o situaciones vividas. todos los elementos con los que entramos en interacción diariamente forman parte de un esquema el cual inconscientemente nuestro ser crea modelo para facilitarnos nuestro estilo de vida. para que esto suceda nada más necesitamos solamente el conocimiento que cada una de las personas posee. siendo así el modelo mental las acciones que realizamos las cuales sirven para tener un desarrollo al ir perfeccionando estas acciones.

Cuando alcanzamos un nivel de perfeccionismo procedemos a crear sistemas con procesos, componente registros los cuales nos sirven para aumentar la eficiencia del proceso a realizar ,un manera de aplicar el método metal seria el modelo 80/20 en donde al buscar solución a un problema ,el 80% trata de la solución y recomendaciones para la solución mientras que el otro 20% tratara dela creatividad, pensamiento alternativo y visualización de las posibles soluciones que podrían surgen durante la solución, teniendo en cuenta que cada persona es un mundo diferente así mismo sus pensamientos son distintos como la manera de percibir. (The Decision Lab, 2023)

El filósofo Kurl Lewis dijo: El aprendizaje es más efectivo cuando se trata de un proceso activo en lugar de un proceso pasivo.

2.3. ¿Qué es un modelo Verbal?

Se define como el proceso de crear, comprender y expresar un sistema, investigando y recopilando información para próximamente aplicarle un proceso de paso a paso para describir el sistema que sirven para satisfacer los objetivos, alcances de un problema. El lenguaje es usado con la finalidad

de describir las respuestas de un sistema frente a diversos fenómenos o variables, estímulos. (Peter Woolf et al., 2023)

2.4. ¿Qué es un modelo gráfico?

Es una representación probabilística en la cual se expresa la estructura de dependencia que existe entre las variables. normalmente se utilizan para hacer probabilidades, tendencia, estadísticas. permitiendo resolver problemas o situaciones, con el único impedimento que no es posible graficar más de 3 variables (dimensiones).

Al realizarse una representación de una situación surgen muchas respuestas así como la solución de una única solución o múltiples de ella ayudándonos a comprender la simpleza del problema que estas tratando. El proceso se desarrolla partiendo de dibujar un sistema de coordenadas cartesianas en donde cada variable este relaciona con los ejes, seguidamente se establece una escala de referencia para los ejes, luego se procede a establecer en el plano cartesiano las restricciones del problema así mismo se agregan las intersecciones de las regiones que nos determinaran el espacio solución para poder determinar los puntos extremos y vértices del polígono, por último se evalúa la función en todos los vértices de los cuales serán solución aquellos que aumenten o disminuyan el valor resultante siendo estos los valores óptimos de solución del problema. (PHP Simplex, 2006)

2.5. ¿Qué es un modelo físico?

Es la creación de un modelo matemático de un sistema físico, constituido por objetos físicos reales replicando su comportamiento y propiedades físicas y mecánicas a una escala inferior al modelo original. Permite analizar su funcionamiento y poder optar por una mejora del sistema evaluado. Este tipo de modelo sirve para evaluar las reacciones de un sistema a emplearse según condiciones del lugar a ubicarlo, en el caso de las construcciones se utilizan para ver las reacciones de la estructura o construcción con respecto al lugar donde se colocará, replicando las características y estudiando su respuesta a ellas. (cidecame, 2023)

2.6. ¿Qué es un modelo numérico?

Un modelo numérico es una representación matemática que trata de explicar un sistema o fenómeno real por medio de ecuaciones, algoritmos y cálculos numéricos. Estas representaciones tienen como objetivo describir y predecir el comportamiento de sistemas complejos, cómo lo son fenómenos naturales, economía, tendencias entre muchas cosas más, siendo una herramienta ampliamente utilizable en diversas áreas de la ciencia y la ingeniería permitiendo simular los fenómenos y situaciones hipotéticas.

Siendo una herramienta utilizada para simular y se ocupa tanto en la ciencia como en tecnologías para predecir algunas de las utilidades que presenta un modelado numérico son: La facilidad de comprensión de sistemas complejos permitiendo analizar sistemas que son difíciles de aplicarles análisis directamente por métodos experimentales. Reduce el costo monetario así como el tiempo empleado en la realización de experimentos, pruebas físicas y obtención de resultados. Permite predecir el comportamiento de un sistema o proceso así como evaluar los efectos, impacto y cambios que este tendrá en un futuro, permitiendo tener una idea de los posibles riesgos y consecuencias en acciones y eventos según criterios aplicados. Facilita el desarrollo de nuevas investigaciones y las teorías que surgen a partir de ella, permitiendo obtener nuevos métodos y tecnologías en áreas como ingeniería, física, ciencia entre otras ramas. De este modo contribuye a la creación de soluciones óptimas en diseño, distribución y planificación de procesos, evaluando funcionamiento, rendimiento y sus respuestas en diversos escenarios. Así el modelado numérico vendría siendo una herramienta versátil que nos ayuda a comprender mejor los fenómenos, procesos, situaciones y escenarios posibles contribuyendo a facilitar el análisis para obtener una idea de que decisiones tomar y cuáles serían los resultados esperados. Entre los métodos numéricos que más se destacan se encuentran: método de elementos finitos, método de elementos infinitos y el método de elemento de frontera.(Universidad Industrial, 2010)

2.7 Método de elementos de frontera

El método de frontera conocido por sus siglas BEM (Boundary Element Method) también conocido por método de elementos de contorno es un método numérico computacional cuya finalidad es resolver ecuaciones derivadas parciales que se modifican a ecuaciones integrales, la cual se considera como una solución exacta de la ecuación diferencial. Discretizando únicamente la frontera del dominio de interés en lugar de todo el dominio.

El método emplea las condiciones de contorno que se acercan a las proporcionadas para ajustar el valor de contorno dentro de la ecuación integral. Discretizando el dominio de la frontera y convirtiéndola en varios elementos en los cuales el potencial y su derivada podrían variar. Una manera de modelar las condiciones de frontera es de forma geométrica en la cual se representa en forma de líneas, curvas, elipses, parábolas entre otras formas. (Br. Nelson E. Colmenares Leal, 2017)

2.8 Método de elementos infinitos

Es un método que consiste en obtener soluciones numéricas de ecuaciones de diferencias ordinales así como derivadas parciales por medio de elementos infinitos presentes en el modelado del dominio no acotado, el elemento infinito constituye una manera fácil de extender los dominios del método de elementos finitos al solucionar problemas con dominios no acotados, logrando obtener interpolaciones con un mayor orden. El primer científico que presentó una solución de un medio no acotado fue el científico Lord Kelvin en la cual evaluó una carga puntual en un espacio elástico, dando inicio al surgimiento de diversas soluciones para cargas puntuales, solución de Boussinesq para carga puntual en espacio elástico, solución de Stokes aplicada a una esfera en movimiento lento uniforme en fluido no viscoso no acotado.

El matemático físico Lewis Fry Richardson propuso una solución numérica a los problemas de idealización de dominio no acotado de un medio infinito tomando como caso de estudio una presa y su construcción aplicándole un análisis de diferencias finitas. La esencia del método de elementos infinitos es la expansión del dominio o de elemento finito el cual no está acotado, siendo necesario la utilización de fórmulas adecuadas que estén definidas en el infinito y tomando valores finitos de manera adecuada, así mismo es necesario un método de integración para el dominio no acotado. (José Ramón Sánchez Abardia, 2017)

2.9 Método de diferencias finitas

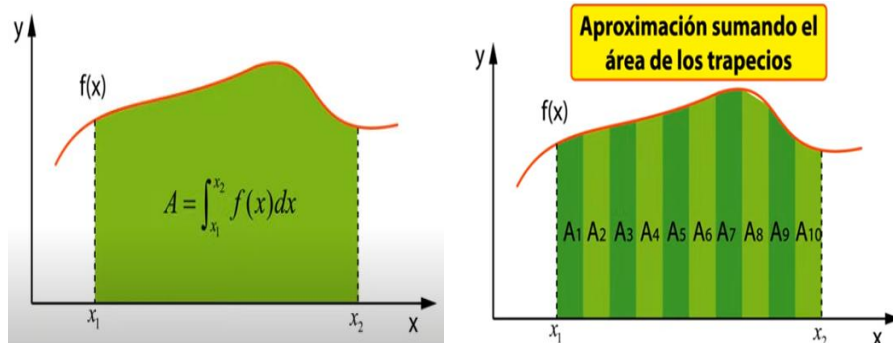
Es un método numérico computarizado que permite predecir cual será la reacción de una estructura ante las fuerzas, vibración, calor, el flujo de fluidos y otros efectos físicos del mundo real. Mediante la simulación de métodos finitos se comprueba si una estructura se romperá, desgastará o funcionará como se espera. Es denominado análisis, pero en el proceso de desarrollo de productos, es usado para predecir el funcionamiento de estructura. (Autodesk, 2023; Ingeniosos, 2024)

Los análisis de métodos finitos operan mediante la descomposición del conjunto de elementos finitos formando una partición del dominio denominado discretización del cuerpo en un gran numero (miles y cientos de miles) de elementos finitos, con forma de pequeños cubos. Cada elemento se diferencia por una serie de puntos representativos(nodos), teniendo presente que dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito, Así mismo se considera al conjunto o agrupación de nodos con característica adyacente se denominaran malla.

Este método es una similitud con el cálculo del área bajo una curva, en donde si no se sabe calcular la integral se puede hacer uso de trapecios para aproximarnos a la solución, entre más trapecios se usen más proximidad se tendrá a la solución, la discretización de la maya sigue el mismo principio debido a esto entre más pequeño sean los elementos mayor precisión se tendrán en los resultados, aunque, esto implique un mayor retraso en la simulación para obtener los resultados.

Figura 18

Área Bajo la Curva

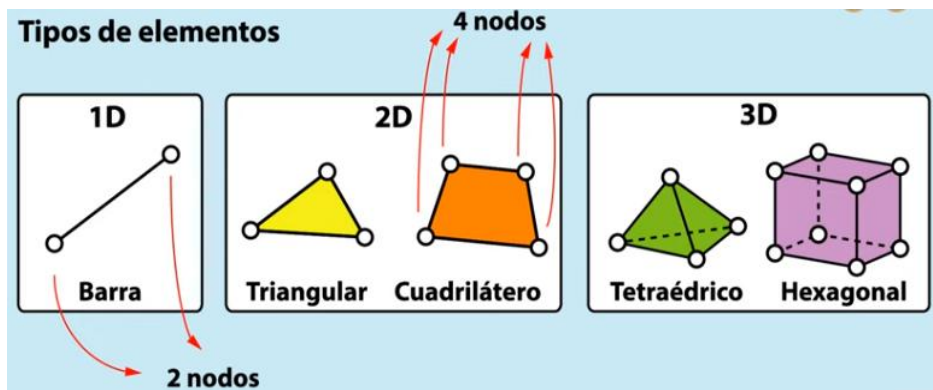


Nota: Cálculo del área debajo de la curva basada en trapecios para aproximación de solución. (Ingeniosos, 2024)

Los elementos pueden ser estructuras geométricas ya sea de primera, segunda o tercera dimensión y contener diferente número de nodos.

Figura 19

Representación de Nodos



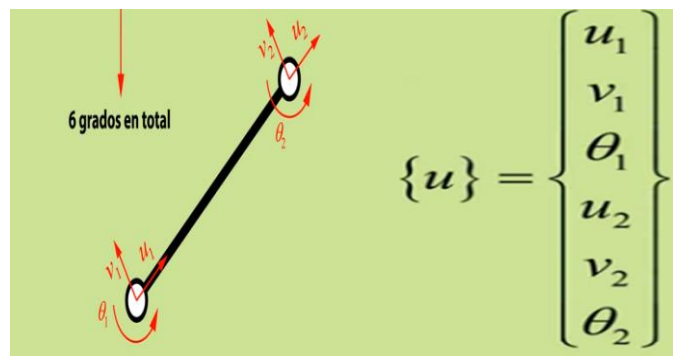
Nota: Diferentes tipos de elementos y nodos los cuales se utilizaron basado en el análisis que se desea realizar (Ingeniosos, 2024)

El uso de cada tipo de elemento corresponde al caso específico del análisis, ya sea, un análisis de tipo plano o espacial en el que se está considerando la simplificación de condiciones como condiciones de tensión o deformación plana. Como se había mencionado antes cada elemento contiene una cantidad de nodos. Estos trabajando en función con el tipo de análisis a utilizar obtendrán un numero de grados de libertad.

Por ejemplo: En un análisis de tipo estático en el plano, se tienen un total de 6 grados de libertad, tres por cada nodo, dos en el eje X (U_1, U_2), dos en el eje Y (V_1, V_2) y dos en sentido de la rotación (θ_1, θ_2) El total de grados de libertad se describen en un vector de desplazamientos nodales.

Figura 20

Representación de un Vector de Desplazamiento

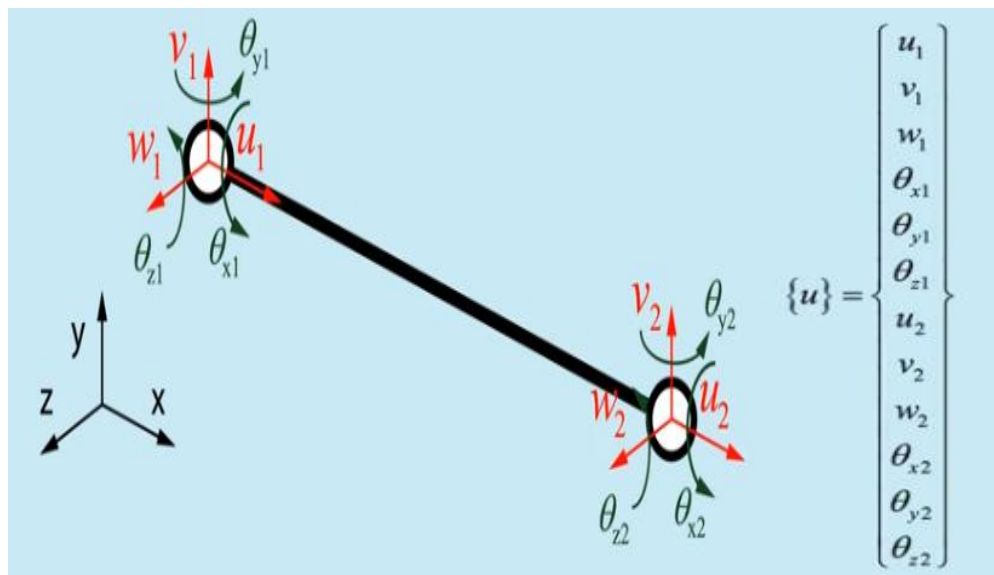


Nota: Elemento tipo barra para análisis estático, configurado con 2 elementos (Ingeniosos, 2024)

En un análisis del tipo espacial se complica más debido a que es mayor el número de grados de libertad, como se muestra en la imagen se contiene un total de 12 grados de libertad, 6 en cada nodo, 2 en el eje X (U_1, U_2), 2 en el eje Y (V_1, V_2), 2 en el eje Z y 3 en el sentido de la rotación ($\theta_{x1}, \theta_{x2}, \theta_{y1}, \theta_{y2}, \theta_{z1}, \theta_{z2}$).

Figura 21

Vector de Desplazamiento en un Analisis Espacial

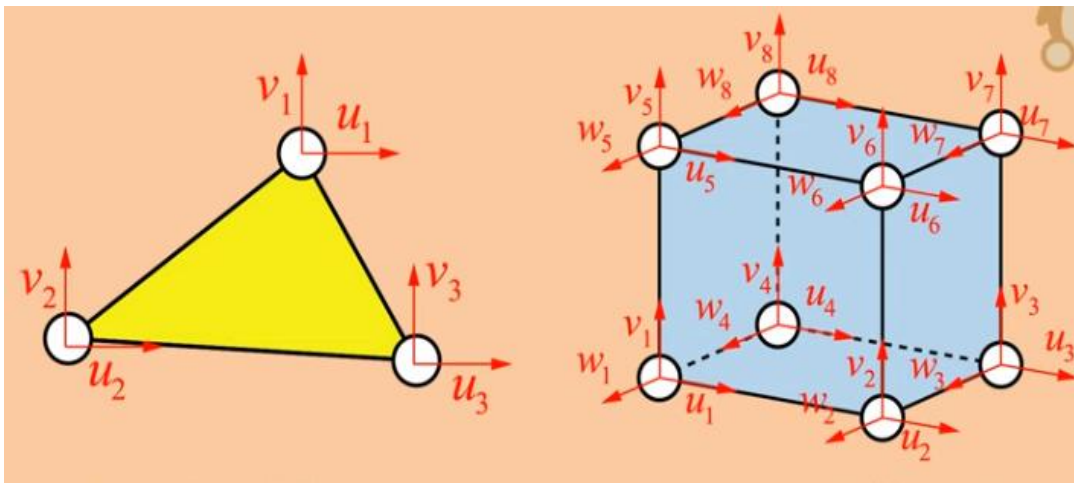


Nota: Elemento tipo barra para análisis espacial con 12 ° de libertad (Ingeniosos, 2024)

El grado de libertad es muy importante debido a que indica la dimensión del cálculo, en la siguiente imagen se muestra una estructura geométrica triangular con un análisis del tipo plano que contiene 6 grados de libertad, mientras que a su lado se muestra una estructura sólida con un análisis del tipo espacial conteniendo 24 grados de libertad. Debido a que los cálculos en tres dimensiones obtienen un mayor número de grados de libertad necesitan apoyo de software más potentes que permitan realizar la suma de cada uno de los elementos para resolverse.

Figura 22

Comparación de Nodos



Nota: Elementos triangular para análisis plano con 6 grados de libertad y elementó solido cuadrado con 24 grados de libertad (Ingeniosos, 2024)

Para obtener todos los desplazamientos y giros en cada uno de los elementos de las mallas, hacemos uso de la matriz de rigidez, $\{F\}=[K]*\{U\}$, donde:

- $\{F\}$: vector de fuerza y momentos nodales
- $[k]$: Matriz de rigidez
- $\{u\}$: vector de giros y desplazamientos nodales.

Esta matriz de coeficientes es obtenida a partir de las ecuaciones de equilibrio que gobiernan el comportamiento del elemento, por lo general son matrices cuadradas con un tamaño definido por los grados de libertad de cada elemento. Define la relación entre los desplazamientos y giros con las fuerzas aplicadas, su función es transformar un sistema de ecuaciones diferenciales en un sistema matricial lineal que sean más sencillas a la hora de resolver para un ordenador.

Debido a que son un gran numero (miles y cientos de miles) de elementos que no trabajan de manera aislada sino más bien trabajan conjuntamente en la malla, se procede a ensamblar la matriz de rigidez global que relaciona todos los desplazamientos con todas las fuerzas aplicadas. La matriz ya ensamblada procede a resolver los desplazamientos de todos y cada uno de los nodos, en cualquier estructura, para que esto sea posible es necesario definir las fuerzas aplicadas y condiciones del contorno que son desplazamientos que, si conocemos, cómo aristas, puntos que no

se desplazan o elementos empotrados que no pueden girar, con la recopilación de todo esto la simulación puede realizarse.

2.10 Modelo analítico

Es el estudio de un problema abordando desde una representación matemática o estadística. estudiando los datos (variables) para predecir proyecciones de tendencias, relaciones, comportamientos para comprender y predecir su funcionamiento.

El modelo analítico se clasifica en simples o complejos, dependiendo del número de variables que se necesiten para asimilar el modelo a la realidad así como de la precisión de ellas. su ejecución consiste en evaluar la información extraída de una base de datos buscando una relación que entrelace los datos, tendencias y patrones, los cuales servirán para tener una idea del rumbo que tomara el modelo de la misma manera es necesario aplicar análisis de predicción el cual ayudara a tener una idea de las decisiones que se pueden tomar. Siendo así el modelo una herramienta con la cual podemos explotar y comprender la complejidad de los fenómenos partiendo de un enfoque estructurado y racional, con la finalidad de obtener información útil la cual servirá en la mejora y eficacia del sistema estudiado.(Cristina Ortega, 2005)

Este tipo de modelos es ocupado en marketing, donde se necesita realizar una tendencia de ventas realizadas durante un periodo de tiempo, analizando la varianza, tendencias de las ventas para determinar factores claves que afectan en el aumento o disminución de ventas, identificando patrones y verificando la rentabilidad de los productos y servicios que se brindan ayudando en la toma de decisiones estratégicas que brinden una tendencia positiva de venta.

2.11 Modelado computacional

Se caracteriza por utilizar un equipo informático con las suficientes capacidades para simular y estudiar sistemas complejos siendo estos sistemas basados en matemática, física o de carácter informático, los cuales pueden ser representados por variables siendo estos caracteres computacionales. La realización de la simulación se inicia calibrando las variables, de manera individual o en conjunto, seguidamente se analizará los resultados obtenidos(CIENCIAUANL, 2022; National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, 2022)

Este tipo de modelos tiene la ventaja de poder realizar diversos experimentos simulados por computadora sin requerir gastos monetarios, ayudando a realizar varios experimentos en menor tiempo y con mayor probabilidad de resolver el problema en estudio. Permite realizar estudio y analizar sistemas biológicos en diferentes niveles, crear modelo del desarrollo de una enfermedad en donde se incluyen procesos moleculares, las interacciones que existen entre las células y como afecta al cuerpo humano.

Dentro de las aplicaciones del modelo computacional lo podemos ocupar para el estudio de modelos complejos como por ejemplo en predecir condiciones climáticas, simuladores de navegación aérea, simulador de catástrofes, modelos de red neuronales.

Modelo computacional aplicado al mejoramiento de calidad de vida e investigaciones, contribuye en gran parte al sector salud permitiendo dar seguimiento a enfermedades infecciosas poblacionales permitiéndoles ir un paso delante de una manera más efectiva y prevenir que la propagación se reduzca. De igual manera este tipo de modelo recopila analiza y muestra información que se utiliza para proporcionar una orientación a los médicos de que camino seguir para lograr un buen tratamiento de la enfermedad según el historial clínico de cada paciente. Mientras que en los laboratorios utilizan el modelo para desarrollar medicamentos que contengan un mínimo de efectos secundarios para ser más seguro para los pacientes. (CIENCIAUANL, 2022; National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, 2022)

CAPITULO 3. HYDROTHERM

3.1 Conociendo software HYDROTHERM

Hydrotherm es un software creado por USGS diseñado para simular un flujo de agua subterránea ,cuenta con dos versiones , las primeras versiones 1 y 2 están orientadas para sistema operativo Windows teniendo la capacidad de realizar simulaciones en dos dimensiones proporcionando una interfaz gráfica que nos permite ingresar datos y mostrar los resultados siendo así amigable y entendible para el usuario, con la única limitación que no posee la capacidad de trabajar sistemas en tres dimensiones, solo sistemas bidimensionales de coordenadas cartesianas o de coordenada cilíndricas con eje de simetría ,así mismo la cantidad de flujo de agua se ve limitada por el mismo simulador .La versión 3 se trata de un entorno orientado al sistema operativo Linux en el cual tiene la desventaja de no se posee una interfaz gráfica para interactuar, presentando así un inconveniente a la hora de ingresar nuestros datos e interpretarlos, por otra parte esta versión si nos permite trabajar en 3 dimensiones así mismo el flujo de agua a simular es ilimitado permitiendo trabajar con fuentes acuíferas poco profundas y no confinadas. Para realizar una simulación con región tridimensional es necesario una entrada de datos a base de texto y visualización de salida posterior a la simulación, el usuario debe de utilizar otras herramientas de software para la visualización de resultados en tres dimensiones.(USGS, 2012)

La Herramienta nos permite simular transporte de energía térmica en sistemas de flujo de agua subterránea hidrotermales bifásicas y tridimensionales ,soporta temperatura de fluido de hasta 2000 grados Celsius y presiones de hasta 1×10^9 pascales o 104 atmósferas, ya sea en condiciones de flujo de agua subterránea confinada y no confinada, Pará el flujo no confinado nos incluye flujo de agua de zona no saturada con presión atmosférica uniforme en la fase de aire y suelo ,con la única condición que simula el flujo de agua subterránea de un solo componente fluido ,esto se debe en particular por el tipo el código de programación del software Hydrotherm siendo así óptimo para simular flujo de agua líquida y vapor de agua en medios porosos con transporte de energía térmica asociado en sistemas de flujo tridimensional de dos fases en condiciones confinadas y no confinadas. Los sistemas de agua subterránea salinas, con una salinidad mayor que la del agua del mar no se pueden representar, mientras que los efectos de la salinidad sobre la densidad del fluido pueden ser menores en comparación con los efectos térmicos en sistemas bifásicos de la temperatura, otra de las influencias de los solutos puede ser no triviales. (USGS, 2012)

3.2 Ecuaciones y funciones del software

Para entender el funcionamiento de la herramienta debemos tener en cuenta las diversas ecuaciones en las que se basaron, además de ello conocer las múltiples funciones que nos permite utilizar y sus limitaciones. (USGS, 2012)

3.2.1 Ecuación del flujo de agua subterránea

El agua subterránea es una parte de agua que existe debajo de la superficie terrestre la cual puede recolectarse por medio de perforaciones, túneles así mismo se pueden obtener de las que fluye por medio de los manantiales. Para el planteamiento de la ecuación diferencial del flujo de agua se basarán en los siguientes planteamientos:

-El Agua puede existir en fase líquida y gaseosa, esto se describe mediante la ley de Darcy en la cual para un sistema de dos fases los efectos de presión capilar están representados por funciones de agua líquida que coexisten con vapor de agua los efectos de presión capilar están representados por funciones no histéricas de saturación de fase líquida en zonas de agua líquida coexistiendo con el aire.

-Las permeabilidades relativas son funciones no histéricas del medio poroso es decir son comprensibles a excepción de zona parcialmente saturada de agua líquida y el vapor de agua son comprimidas.

-La densidad del agua se define en función de espacio y tiempo a través de la dependencia de la temperatura y la presión proporcional del medio poroso es comprensible excepto en la zona parcialmente saturada el agua líquida y vapor de agua.

-La viscosidad del agua es función del espacio y el tiempo a través de la dependencia de la temperatura y la presión.

-La porosidad y la permeabilidad pueden ser funciones de la ubicación espacial.

-El sistema de coordenadas es diestro con el eje z apuntando verticalmente hacia arriba.

- El sistema de coordenadas se elige para que esté alineado con las direcciones principales del tensor de permeabilidad de modo que este tensor sea diagonal para medios anisotrópicos.

- No se incluyen los flujos de masa dispersiva del fluido a granel debido a fluctuaciones de velocidad espacial. Así mismo No se incluyen los flujos de agua líquida y vapor de agua (vapor) impulsados por gradientes térmicos. (USGS, 2012)

Teniendo en cuenta lo anterior mencionado, una de las limitaciones de fluidos no confinados es que el software Hydrotherm no permite simular líquidos hirviendo en nivel freático. Para ello se elige una variable dependiente del flujo de fluido debido a que no existe función, aunque existen para campos de densidad con dependía de temperatura, teniendo que expresar las presiones como absolutas. La Ecuación de flujo de componente de agua se basa en el principio de conservación de agua dentro de un elemento de volumen y de la ley de Darcy de fluidos multifásicos en medios porosos.

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w s_w + \rho_s s_s)] - \nabla \cdot \frac{K k_{rw} \rho_w}{U_w} [\nabla p + \rho_w g \hat{e}_z] - -\nabla \cdot \frac{K k_{rs} \rho_s}{U_s} [\nabla p_g + \rho_s g \hat{e}_z] - q_{sf} = 0 \quad \text{Ecu. 1}$$

Tabla 1

Definición de variables

ϕ	Porosidad
ρ	Densidad del fluido (kg/m ³)
S_p	Saturación de agua en fase; p=w
w	Agua o vapor de agua
K	Tensor de permeabilidad del medio poroso
p	Presión de fluido en fase líquida
∇	Gradiente espacial
t	Tiempo
g	Constante gravitacional
\hat{e}_z	Vector unitario en coordenada z
p_g	Presión de fluido en fase gaseosa
U	Viscosidad
q_{sf}	Intensidad de caudal de una fuente de masa de fluido
k_r	Permeabilidad relativa

Los subíndices de fase w y s se refiere a agua fase liquida y vapor en fase gaseosa o vapor. Cuando la zona es de un solo componente la presión de fase gaseosa será igual a la presión de fluido liquida debido a que se supone que la presión capilar es cero. En una zona no saturada la formulación de ecuación de flujo se descarta debido a que el componente de aire está a presión atmosférica con densidad insignificante por lo que no fluye. Cualquier punto de la región de simulación puede estar en zona de uno o dos componentes por lo que la ecuación de restricción de saturación quedaría de la siguiente forma:

$$S_w + S_g = 1 \quad \text{Ecu. 2}$$

Tabla 2

Definición de variables

S_w	Saturación de fase liquida
S_g	Saturación de fase gaseosa

La velocidad de poro para un componente de agua en fase se obtiene mediante la ecuación de Darcy de la siguiente forma:

$$Vp = \frac{Kk_{rp}}{\phi S_p u_p} [\nabla p + \rho_p g \hat{e}_z] \quad \text{Ecu. 3}$$

Tabla 3

Definición de variables

Vp	Vector de velocidad intersticial del agua de fase
w	Agua
s	Vapor

El nivel freático es la superficie de presión atmosférica, lo podemos configurar resolviendo la ecuación en base a presión.

3.2.2 Ecuación del transporte de energía térmica

La Energía térmica es aquella energía calorífica interna que contiene un sistema termodinámico en equilibrio siendo esto un cuerpo, conjunto de partículas, entre otros este tipo de energía se transporta por mecanismos como lo es la conducción, convección y radiación. Partiendo de ello el desarrollo de la ecuación parcial de transporte nos dirigiremos por los siguientes supuestos:

-El mecanismo de transporte de calor comprenderá únicamente la conducción y la advección térmica-Se despreciará el calor por dispersión y por radiación

-Deberá de estar en equilibrio térmico la matriz porosa y las fases fluidas, Despreciando el calentamiento por disipación viscosa y el calor convectivo por aire en fase gaseosa.

-La conducción térmica se debe producir por medio de la fase líquida gaseosa y sólida en paralelo.

-El transporte de calor conductivo a través de aire en la fase gaseosa se aproxima a una relación térmica efectiva, condición especificada en fase sólida y líquida.

-La entalpía de la matriz porosa será en función solo de la temperatura

Estos son los supuestos que más se destacan dentro de la ecuación de transporte de energía, existen muchos más los cuales puede consultar en el manual de usuario de Hydrotherm. Para la ecuación de transporte térmico se basará en la conservación de la entalpía de la fase fluida y sólida del medio poroso del elemento de volumen de la regional, entalpía será la propiedad derivada de la mezcla de energía interna como energía de flujo. quedando de la siguiente manera nuestra ecuación:

Ecu. 4

$$\frac{\partial}{\partial t} [\phi(\rho_w h_w s_w + \rho_s h_s s_s)] - (1 - \phi)\rho_r h_r - \nabla k_a I \nabla T + \nabla \phi (S_w \rho_w h_w v_w + S_s \rho_s h_s v_s) - q_{sf} = 0$$

Tabla 4

Definición de variables

h	Entalpia especifica de la fase fluida
h_r	Entalpia especifica de la fase solida de matriz porosa
ρ_r	Densidad de la fase solida de la matriz porosa
k_a	Conductividad térmica efectiva del medio poroso en masa
I	Matriz identidad de 3 grado
T	Temperatura
q_{sf}	Caudal de intensidad de una fuente de entalpia

Los subíndices w y s hacen referencia a agua y vapor, la ecuación anterior relaciona la tasa de cambio de entalpia del fluido y el medio poroso respecto al flujo neto de entalpia conductiva, el flujo neto de entalpia advectiva y la fuente de calor.

3.3 Propiedades, funciones y coeficientes de transporte

-Densidad de fluido

Se aplica una función de estado para el líquido (agua) con la cual determinamos la densidad del fluido en función de entalpia y presión, Esta opción está incorporada en el software en forma de tabulaciones, dentro de las tabulaciones se encuentran valores derivados de las derivadas parciales de densidad en función de presión y entalpia, así mismo los valores que corresponden a zonas bifásicas de un componente como el agua se extrapolan utilizando las saturaciones y partiendo de valores de agua líquida saturada como lo es el vapor saturado.

-Viscosidad del fluido

Esta función parte de la ecuación de estado de agua en forma tabular, nos sirve para determinar la viscosidad del fluido en función de entalpia y presión así mismo las derivadas de la viscosidad respecto a presión y entalpia, los valores de zonas bifásicos y de componente agua se interpolan a partir de valores de agua líquida saturada y vapor saturado.

-Temperatura en función de presión y entalpía

Manteniendo la ecuación de estado para agua pura en forma tabular para calcular la temperatura en función de entalpía, presión y derivadas parciales de temperatura con respecto a la presión y la entalpía.

-Entalpía y densidad en función de presión y temperatura

Para determinar la entalpía, densidad de agua, presión y vapor en función de la temperatura se utilizaron las tablas de vapor de Oficina Nacional de Estándares, basados en ecuaciones de estados para agua pura, este tipo de funciones nos servirán para la entrada de datos alternativos de temperatura en lugar de entalpía.

-Diagrama presión entalpía y zona saturada

En este tipo de zonas no saturadas de ambiente seco o área con niveles freáticos profundos , la presión capilar tiende a ser muy alta en cambio la presión de fase líquida puede tener valor negativo grande, la presión en fase líquida hidrodinámica tiene características de energía potencial que puede oscilar entre valores positivo y negativos .en cambio en la región de flujo saturado la presión hidrodinámica siempre es positiva cuando se usa una escala absoluta o una escala relativa a la atmosférica

-Permeabilidad

Para la permeabilidad la distribución espacial se puede especificar de varias maneras dependiendo de la naturaleza y extensión de la región que se modela. La distribución más simple son las que se dan en zonas uniformes de permeabilidad correspondiente a diferentes tipos de sedimentos y rocas. Además, podemos hacer uso de la variación de la permeabilidad con la profundidad debajo de la superficie terrestre del terreno descrita por una función la cual puede ser escrita por una función que corresponde al tipo de roca. Dentro del entorno del software tenemos disponibles permeabilidad lineal, logarítmica y exponencial, así mismo podemos plantear la permeabilidad en función de temperatura o en función de tiempo para establecer la distribución de permeabilidad.

Si la variación de la permeabilidad respecto a la profundidad tendremos:

Tabla 5

Ecuaciones de permeabilidad para profundidades

Relación	Ecuación
Lineal	$K_i = a_0 + a_1 z_d$
Logarítmica	$\log_{10}(K_i) = a_0 + a_1 \log_{10}(z_d)$
Logarítmica lineal	$\log_{10}(K_i) = a_0 + a_1 z_d$
tiempo lineal	$K_i(t) = b_0^{(n)} + b_1^{(n)} t \text{ para } t_{n-1} \leq t \leq t_n$

Tabla 6

Definición de variables

K_i	Permeabilidad en la dirección de coordenadas i (m ²)
a_1	Coefficiente empírico; $i=0.1$ [m ² , m, adimensional]
z_d	Profundidad debajo de la superficie del terreno (m).
$b_i^{(n)}$	Coefficiente empírico ($i=0.1$) para un intervalo de tiempo t_{n-1} a t_n [m ² , m ² /s]

La relación tiempo- permeabilidad de forma lineal representa la disminución de la permeabilidad debido a la mineralización, así la función del tiempo variará dependiendo del tipo de medio poroso. Estas funciones definen la permeabilidad para la coordenada “X”, mientras que las coordenadas “Y” y “Z” se obtienen como múltiplos de las constantes de la coordenada X.

-Permeabilidad relativa

Se proporciona un conjunto de tres funciones para poder representar la permeabilidad relativa del agua líquida y vapor de agua respecto a la saturación de la fase líquida, dicho conjunto está conformado por funciones lineales, funciones Corey y funciones de flujo de fractura de permeabilidad siendo estos de la siguiente manera:

Grupo uno funciones lineales de permeabilidad relativa

$$K_{rw} = S_e \quad \text{Ecu.5}$$

$$K_{rs} = 1 - S_e \quad \text{Ecu. 6}$$

Tabla 7

Definición de variables

K_{rw}	Permeabilidad relativa del agua líquida
K_{rs}	Permeabilidad relativa de vapor agua
S_e	Saturación escalada de fase líquida

Nota. Estas variables son adimensionales.

La saturación escalada se define como:

$$S_e = \frac{S_w - S_{wr}}{S_{wr} - S_{sr}} \quad \text{Ecu.7}$$

donde:

Tabla 8

Definición de variables

S_{wr}	Saturación residual líquida
S_{sr}	Saturación residual de vapor de agua

Grupo dos funciones Corey para permeabilidad relativa

$$K_{rw}=S_e^4 \quad \text{Ecu.8}$$

$$K_{rs}=1 - S_e^4 \quad \text{Ecu.9}$$

Grupo tres contiene funciones de flujo de fractura

$$K_{rw}=S_e^4 \quad K_{rs}=1-S_e^4 \quad \text{Ecu.10}$$

Tanto el primer el primer grupo como el segundo están disponibles para sistemas de flujo no confinado. Teniendo en cuenta que la permeabilidad relativa de vapor de agua no se puede aplicar a zonas de composición aire agua, así mismo la saturación residual de vapor de agua debe de definirse con valor cero.

-Saturación de agua

Zona parcial de aire agua, se necesita de una relación de la saturación con la presión capilar, esta presión capilar será la diferencia entre la presión gaseosa formada por aire y la fase líquida formado por el agua, las funciones asociadas de linealidad y permeabilidad de corey se incorporan como extensión de flujo no confinado, la presión del punto de burbuja es esencialmente de valor mínimo de la presión capilar durante el drenaje existente en fase gaseosa continua. La saturación de agua residual será aquella saturación en la cual la fase líquida es discontinua y el flujo del líquido cesa.

Para una función lineal de saturación de agua tendremos:

$$\frac{1-S_w}{1-S_{wr}} = \frac{P_c - P_{cb}}{P_{cr} - P_{cb}} \text{ for } P_{cb} \leq P_c \leq P_{cr} \quad \text{Ecu.11}$$

$$S_w = 1 \quad \text{para } P_c < P_{cb}, S_w = S_{wr} \quad \text{para } P_c > P_{cr}$$

Tabla 9

Definición de variables

P_{cb}	Presión capilar en punto de fase líquida
P_{cr}	Presión capilar en saturación de agua residual.

-Función de porosidad media porosa

El medio poroso es compresible y la porosidad es función de la presión pudiéndose expresar como función lineal en zonas de un solo componente líquido o vapor de esta manera tendremos:

$$\phi = \phi^0(1 + \alpha_b (p - p^0)) \quad \text{Ecu.12}$$

Tabla 10

Definición de variables

ϕ^0	Porosidad inicial del fluido
p^0	Distribución inicial del fluido
α_b	Compresibilidad vertical aparente del medio poroso

Esta ecuación se puede aplicar a flujo saturado no confinado como no confinado, con la condición de que en zona de saturación parcial se asumirá el medio poroso como incompresible por lo que la porosidad será constante.

-Propiedades del medio poroso

Estas propiedades pueden variar con la temperatura incluyendo variables como permeabilidad, porosidad, conductividad térmica efectiva, capacidad calorífica, densidad y compresibilidad aparente. Podemos utilizar funciones para describir las variaciones de las propiedades.

La función de temperatura la podemos dividir en:

Tabla 11

Ecuaciones de medio poroso

Relación	Ecuación
constante	$U_{pm} = U_{pm}^{(k)}$ para $T_{t-1} \leq T \leq T_k$
Lineal	$U_{pm} = C_0 + C_1 T$
Logarítmica	$\log_{10}(U_{pm}) = C_0 + C_1 T$

donde:

Tabla 12

Definición de variables

U_{pm}	Propiedad del medio poroso
$U_{pm}^{(k)}$	Valor de propiedad del medio poroso durante intervalos de temperatura K
T_k	Valores de temperatura en extremos de intervalos de temperatura
C_1	Coefficiente empíricos $i=0.1$

-Término fuente

El flujo de simulación de agua subterránea de una región modelo se puede hacer con límites abiertos incluyendo los límites del pozo. Se puede reemplazar las condiciones de frontera de flujo especializado por términos de fuente equivalentes en las ecuaciones diferenciales. Este cambio se realiza normalmente en el paso de discretización por lo que es necesario tener fuentes tanto lineales como puntuales disponibles en el simulador.

-Modelado de pozo

Los pozos se idealizan como fuentes lineales en regiones tridimensionales debido a que el radio del pozo es muy pequeño en comparación con el tamaño de la región del modelo o incluso de una sola celda discretizada. dentro del simulador Hydrotherm solo permite modelado de pozos verticales, debido a que no se pueden definir pozos horizontales ni inclinados, de igual manera se refiere a una fuente puntual en regiones bidimensionales. aunque hay excepciones en las que se puede incluir pozo en una región de corte vertical bidimensional, pero es físicamente imposible debido a que el flujo real cerca del pozo es tridimensional.

Un pozo puede ser inyector o extractor de fluidos, con inyección o producción de calor asociada, el pozo se comunica con el acuífero a lo largo de un conjunto de segmentos definidos lo largo de una línea fuente que se extiende en la coordenada z ubicada en la coordenada xy del pozo, pueden ser esté protegido o ser un agujero abierto en varios intervalos de profundidad. Si tomamos como ejemplo un pozo de reinyección este solo inyecta una fase o composición de mezclas, y su caudal total de inyección será determinado por:

$$Q_{\phi} = \int_{I_L}^{I_u} I q_{\phi} dl_{comp} = w, s \quad \text{Ecu.13}$$

Tabla 13

Definición de variables

Q_{ϕ}	Caudal volumétrico del pozo para la fase p (positivo para inyección)
I	Distancia a lo largo del pozo
I_L	Coordenada z del extremo inferior del intervalo protegido del pozo
I_u	Coordenada z del extremo superior del intervalo protegido del pozo
q_{ϕ}	Caudal volumétrico del pozo por longitud de pozo para fase (p=w agua y s para vapor)

Si analizamos un pozo de producción la composición de fases de fluido reflejará las condiciones calculadas del software en las proximidades del pozo, y no se podrá controlar directamente, siendo la condición de restricción impuesta esta puede ser la tasa de producción volumétrica del fluido siendo la ecuación:

$$Q_w = Q_{ww} + Q_{ws} \quad \text{Ecu.14}$$

Tabla 14

Definición de variables

Q_w	Caudal volumétrico de producción total de pozo
Q_{ww}	Caudal volumétrico de producción de agua para el pozo
Q_{ws}	Caudal de producción volumétrica de vapor de pozo

Así mismo la condición de restricción impuesta puede ser la tasa de producción volumétrica específica para agua líquida, considerando las condiciones del Software tenemos como primera condición es la ubicación de un punto dado a lo largo del pozo en el que el caudal por unidad de longitud deberán distribuirse las dos fases y el flujo total de cada fase en lo largo del pozo, sin embargo el caudal volumétrico del pozo dependerá de las presiones y saturaciones locales en el pozo las cuales serán los resultados de realizar la simulación.

-Fuentes puntuales

Se pueden especificar fuentes puntuales o sumideros dentro de la simulación para representar fluido y calor localizado en condición de flujo. Pueden representar pozos de región bidimensional o con condición de contorno de flujo específico. Para ello las fuentes puntuales inyectarán fluido con una entalpía de inyección asociada o por una temperatura definida por el usuario.

3.4 Variables de archivo de entrada

Para la creación del archivo de entrada de nuestro caso de estudio será necesario conocer la función de cada variable y cómo está influye en el proceso y análisis del modelo a estudiar, para ello a continuación se describen el nombre de la variable y su función dentro del software de análisis de fluidos confinados:

Tabla 15

Variables Hydrotherm (dimensiones, paso de tiempo)

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.		
DIMENSIONES	nx[i]	Nodos en dirección x para coordenadas cartesianas
	ny[i]	Nodos en dirección y para coordenadas cartesianas no se utiliza para coordenadas cilíndricas.
	nz[i]	Nodos en dirección z para coordenadas cartesianas
	Tmstr	Valor de tiempo inicial para la simulación ,generalmente, cero para nuevas simulaciones.
	Iyear	Variable para especificar la unidad de simulación, si es en segundos se especifica con el número 1, si se desea que sea en años se deberá colocar 2.
	Tstepmax	Número máximo de pasos de tiempo para ejecutar la simulación
	%Pchgts	factor máximo de incremento de paso, valor predeterminado 1.3
TIME STEP	Pchgts	Cambio porcentual máximo en la presión, permitido para establecer el paso de tiempo por flujo confinado %. Definido 10%
	%Hchgts	Cambio absoluto máximo en la presión, permitido para establecer el paso de tiempo para el flujo no confinado(dina/cm ²), valor predeterminad 1x10 ⁵ dina/cm ²
	Wsant	cambio máximo en la saturación de agua permitido para configurar el paso de tiempo (adimensional). Definido 0.03
	relax	Número máximo de bloques a través de los cuales puede fluir una partícula de fluido durante un paso de tiempo predeterminado (actualmente no se utiliza), Valor predeterminado 1
	deltmin	Período de tiempo mínimo requerido (s), (año). La simulación se interrumpe si se corta el paso de tiempo a un valor inferior a este, excepto en el primer paso de tiempo.
	n_tmcut	Número máximo de veces que se puede cortar un paso de tiempo y la solución recalculada. La simulación se anula si se supera este valor. El valor predeterminado se establece en 10.

Tabla 16

Variables Hydrotherm(iteraciones)

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.	
	<p>Itemx Número máximo de iteraciones de Newton Rapson permitidas para un paso de tiempo determinado, si ninguno de los criterios se cumple de convergencia después de este número de iteraciones se reduce a la mitad y se repite, Valor predeterminado 10</p>
	<p>resmas Tasa máxima de variación de la masa residual por unidad de volumen para las células activas (g/s-cm³). Criterio primario de convergencia de equilibrio de masa para los pasos de iteración de Newton Raphson. El valor predeterminado se establece en 1×10^{-12}.</p>
	<p>reseng Tasa máxima de cambio de entalpía residual por unidad de volumen para células activas (erg/s-cm³). Criterio de convergencia de balance de energía primaria para los pasos de iteración de Newton Raphson. Por lo general, este valor debe ser de unos 10 órdenes de magnitud mayor que resmas, debido a que el valor de entalpía para el agua líquida a 225 °C es aproximadamente 1×10^{10} erg/g. El valor predeterminado se establece en 1×10^{-2}.</p>
N-R ITERATION	<p>nphasechg Número máximo de celdas a los que se les permite cambiar de fase hacia o desde región de 2 fases o desde/hacia la región de aire-agua durante la iteración de Newton Raphson. valor predeterminado 10.</p>
	<p>%PchgNR Cambio porcentual máximo de presión a lo largo de las iteraciones sucesiones de Newton Rapson. Balance de masa secundario de Newton Rapson criterio de convergencia. Se utiliza para flujo confinado. Valor predeterminado 0.1%.</p>
	<p>PchgNR Cambio absoluto máximo de presión en las iteraciones sucesivas de Newton Rapson(dinas/cm²). Segundo criterio de convergencia del balance de masa de Newton Rapson, se utiliza para flujo no confinado. Por defecto 1×10^5 dinas/cm².</p>
	<p>%HchgNR Cambio porcentual máximo en entalpía a lo largo de las iteraciones sucesivas de Newton Rapson. Balance de energía secundario de Newton Raphson criterio de convergencia. Valor predeterminado 0.1%</p>

Tabla 17

Variables Hydrotherm (métodos de solución)

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.		
LINEAR		índice para la selección del método de solución lineal de Newton Rapson: 1 selecciona el solucionador de sobre relajación sucesiva (SSOR). 2 selecciona el solucionador iterativo de residuo mínimo generalizado (GMRES). No disponible para mallas unidireccionales.
EQUATION SOLVER	smelth	
SSOR SOLVER	ssormx	Número máximo de iteraciones permitidas para solución lineal, valor predeterminado 10.
CONTROL	Tol	Tolerancia convergente en el cambio de variable dependiente para solución, valor predeterminado 5×10^{-2}
	ssorw0	Parámetro de sobre relajación, valor predeterminado 1.0
		Estas variables controlan el procedimiento de solución de sobre relajación sucesiva de cortes utilizando para regiones de malla tridimensionales.
	m_save_dir	Numero de iteraciones entre reinicios del solucionador GMRES. Valor predeterminado 5.
GMRES SOLVER	stop_tol_gmres	Tolerancia de convergencia en el residual relativo para iterativo GMRES. Valor predeterminado 1×10^{-10} .
CONTROL	maxit_gmres	Número máximo de iteraciones permitidas para solución lineal. Valor predeterminado 100.
	ilu_method	Índice de selección de método de factorización incompleta ILU, utilizando como preconditionador. -Selecciona 1 para ILUT con tolerancia de caída y relleno máximo. Esto es el método predeterminado. -Seleccionar 2 para ILUT con nivel de llenado, k. Se incluye elementos de relleno hasta el nivel $k=lev_fill$.
	lev_fill	Define el número máximo de elementos por fila de L y U si usa ILUT o especifica el nivel máximo de elementos de relleno si usa ILUK, Valor por defecto 5.
	drop_tol	Especifica la tolerancia de caída relativa. Para ilu_method de 1. Rellenar los elementos con magnitud menor que drop_tol multiplicado por la norma L_1 -norm de a_{ij} en la fila i dividida por el número de elementos distintos de cero en la fila i será descuidado. No se usa para ilu_method de 2, pero luego se debe agregar un cero. Por defecto 0.001.

Tabla 18

VARIABLES Hydrotherm (ponderación, promedio y permeabilidad)

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.		
WEIGHTING AND AVERAGING	ioptupst[T/F]	Cambio lógico para la ponderación especial de los términos de entalpía y transporte advectivo y los términos de permeabilidad relativa : T selecciona la ponderación en el espacio de agua arriba ,F selecciona la ponderación centrada de espacio(cara de la celda)
	potdif	Relación umbral de potencia entre dos celdas por encima del cual se utiliza la ponderación aguas arriba(adimensional); por debajo de este valor ,se utiliza un promedio ponderado logarítmico de los valores de agua arriba y aguas abajo. Esta característica está destinada a facilitar cambios suaves en la dirección del flujo y minimizar la oscilación espacial de presión y entalpía. No se utiliza si ioptupst es falso (ponderación de caras de celda).Valor predeterminado 0.002
	theta	Factor de método de discretización temporal 0.5, selección diferencial centrada en tiempo por método de Crank Nicolson actualmente no disponible. 1.0 para diferencia hacia atrás en línea de tiempo. (totalmente implícita) Valor predeterminado 1.0
	Kodrp	Indica funciones de permeabilidad relativo, acuífero confinado. Ingresar 0 para permeabilidad relativa lineal. Ingresar 1 para permeabilidad relativa corey. Ingresar 2 para permeabilidad relativa de flujo fracturado. Ingresar 3 para permeabilidad relativa de corey para usar con la función de cooley.
RELATIVE PERMEABILITY	Wsant	saturación residual de agua líquida, Swr.
	Ssatn	saturación residual de vapor de agua, Ssr.

Tabla 19

Variables Hydrotherm (propiedades rocas)

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.		
ROCK PROPERTIES	Heatcpty	Capacidad calorífica de la fase sólida de la matriz porosa (erg/g-°c), si se escribe -1 se especificará el uso de grupo de registro de bloque. valor por defecto 1×10^7
	Rxden	Densidad de roca de fase solida del medio poroso(g/cm ³). Valor predeterminado 2.5, escribir -1 para especificar el uso de grupo de registro de bloque de datos de la palabra clave parameter.
	rxcomprss	Aparente de media porosa (cm ² /dina), el valor por defecto para la variable es 0. se introduce -1 para especificar el uso de un grupo de registro de bloque de datos de palabra clave PARAMETER
	Grav	Constante gravitacional, valor sugerido 9.81 m/s ²
	Initphi	Interruptor lógico de entrada para valores de presión y porosidad de condición inicial. T par valor condicional inicial, F para no seleccionar ninguna entrada de valores
	Irad[T/F]	Variable para seleccionar el sistema de coordenada, T para coordenadas cilíndricas y F para coordenadas cartesianas
	Wellrad	Radio del pozo en centímetros, también la ubicación de las coordenadas radiales del límite de celda más cercano
CYLINDRICAL COORDINATES	radiusmax	Radio exterior del sistema de coordenadas cilíndricas (cm). Ubicación en coordenada s radiales del límite de celda más externo

Tabla 20

VARIABLES Hydrotherm(Salidas)

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.	
Wide	<p>Indica el ancho de página de los archivos de salida utilizando para tablas de valores de celda:</p> <p>0 para seleccionar la salida de 80 columnas.</p> <p>1 para seleccionar la salida de 132 columnas.</p> <p>2 para seleccionar la salida d 159 columnas.</p>
Long	<p>Variable para la selección de la cantidad relativa de producción a escribir:</p> <p>0 selecciona una cantidad limitada de resultados escritos en los archivos Out_Probdefine.xxx y Calc_log.xxx y ningún resultado escrito en la pantalla del monitor.</p>
PRINT/PL OT	<ol style="list-style-type: none"> 1. Selecciona una cantidad moderada de resultados escritos en los archivos Out_Probdefine.xxx y Calc_log.xxx y una cantidad limitada de resultados escritos en la pantalla del monitor. 2. Selecciona la cantidad total de resultados escritos en los archivos de Out_Probdefine.xxx y Calc_log.xxx y una cantidad limitada de resultados escritos en pantalla del monitor.
v-avg	<p>Variable para seleccionar la salida de valores promediados verticalmente de presión entalpia, temperatura y saturación de agua.</p> <p>0 para no escribir los valores promediados verticalmente.</p> <p>1 1 para seleccionar valores promediados vertimente de las variables seleccionadas en PRINT 1 se escribirán en archivos.</p>

Lo seis registros de impresión contienen interruptores e intervalos de impresión, parametros para imprimir matrices específicas .Para cada uno de los parametros del intervalo de impresión que se muestra como xxx_pr_intrv ,se debe seleccionar uno de los siguientes valores:

Tabla 21

VARIABLES Hydrotherm

VARIABLES DE INTERVALO DE IMPRESIÓN	
xxx_pr_intrv	Intervalo de impresión para imprimir y trazar archivos (s) o (yr).
0	Seleccionar que no se produzcan ninguna impresión.
T	La impresión que se realizara en cada t unidades de tiempo de simulación y al final de cada periodo de simulación (timchg, Periodo de tiempo),t es un número real.
-n	La impresión se realizará en cada enésimo paso de tiempo y al final de cada periodo de simulación (timchg, Periodo de tiempo), n es un numero entero.

Variables de salida de datos

Tabla 22

VARIABLES Hydrotherm

VARIABLES DE IMPRESIÓN PARA PRESIÓN, ENTALPIA, TEMPERATURA Y SATURACIÓN.	
PRINT 1	<p>pres_pr_intrv Intervalo de impresión del campo de presión.</p> <p>enth_pr_intrv Interval de impresión para el campo de entalpia.</p> <p>temp_pr_intrv Interval de impresión para el campo de temperatura.</p> <p>satn_pr_intrv Intervalo de impresión para el campo de saturación.</p> <p>iprsat Índice para seleccionar la elección de los campos de saturación:</p> <p>0 para que no se produzca ninguna impresión</p> <p>1 para impresión de la saturación volumétrica</p> <p>2 para impresión de la fracción de masa de agua</p> <p>3 para impresión tanto de saturación como de fracción de masa.</p> <p>El registro anterior controla la salida de datos de variables dependientes primarias a los archivos Out_pression.xxx, Out_enthalpy.xxx y Out_saturation.xxx</p>

Tabla 23

VARIABLES Hydrotherm

VARIABLES DE IMPRESIÓN PARA DENSIDAD DE AGUA Y VAPOR	
dens_pr_intrv	Intervalo de impresión para campos de densidad de agua y vapor.
iprden	Índice de dos dígitos para elección de los campos de densidad: 00 selecciona que no se produzca ninguna 10 selecciona la impresión de la densidad de agua 01 selecciona la impresión de la densidad de vapor 11 selecciona la impresora de densidad de agua y vapor.
vis_pr_intrv	Intervalo de impresión para campos de viscosidad de agua y vapor.
iprvis	índice de dos dígitos para la elección de los campos de viscosidad: 00 selecciona que no se produzca ninguna 10 selecciona la impresión de la viscosidad de agua. 01 selecciona la impresión de la viscosidad de vapor 11 selecciona la impresora de viscosidad de agua y vapor.
potencial_pr_intrv	Intervalo para campos de presión y altura hidráulica de agua y vapor.
iprpot	Índice de dos dígitos para presión hidráulica y altura de campos: 00 selecciona que no se produzca ninguna 10 selecciona la impresión de la presión hidráulica del agua 01 selecciona la impresión de la presión hidráulica del vapor 11 selecciona la impresora de la presión hidráulica del agua y vapor 20 selecciona la impresión de cabezal potenciométrico del agua 02 selecciona la impresión del cabezal potenciométrico de vapor 22 selecciona la impresión del cabezal potenciométrico agua y vapor 30 selecciona la impresión tanto de la presión hidráulica como de la potenciométrica dirigente al agua. 03 selecciona la impresión tanto de la presión hidráulica como del cabezal potenciométrico para vapor 33 selecciona la impresión de todas las presiones y cabezales de agua vapor.
PRINT 2	

El registro anterior controla la salida de datos agua y vapor a los archivos Out_density.xxx , Out_viscosity.xxx y Out_potential.xxx

Tabla 24

VARIABLES Hydrotherm (Intervalos de tiempo)

VARIABLES DE IMPRESIÓN PARA INTERVALOS DE TIEMPO.	
velocity_pr_intrv	Índice de dos dígitos para seleccionar la elección de los campos de velocidad.
iprvel	Índice de dos dígitos para seleccionar la elección de los campos de velocidad. 00 selecciona que no se va a producir ninguna impresión. 10 selecciona la impresión de la velocidad intersticial del agua. 01 selecciona la impresión de la velocidad intersticial del vapor. 11 selecciona la impresión de la velocidad intersticial del agua y del vapor. 20 selecciona la impresión del flujo de masa de agua y el flujo de Darcy. 02 selecciona la impresión del flujo de masa de vapor y el fundente Darcy. 22 selecciona la impresión del flujo de masa de agua y vapor y el flujo Darcy. 30 selecciona la impresión de la velocidad intersticial, el flujo de masa y Darcy fundente para agua. 03 selecciona la impresión de la velocidad intersticial, el flujo de masa y Darcy fundente para vapor. 33 selecciona la impresión de todas las velocidades y flujos de agua y vapor.
PRINT 3	
bcflow_pr_intrv	Intervalo de impresión para los campos de caudal límite de agua y vapor.
ipreflow	Actualmente no se utiliza. Escriba 0.
source_pr_intrv:	Intervalo de impresión para tablas de caudal de fuente/sumidero.
iprsorce	Actualmente no se utiliza. Escriba 0.

El registro anterior controla la salida a los archivos Out_velocity.xxx, Out_bcflow.xxx y Out_source.xxx

Tabla 25

VARIABLES Hydrotherm

VARIABLES DE IMPRESIÓN PARA CAMPOS CON PROPIEDADES DE FLUJO Y MEDIO POROSO		
PRINT 4	pm_properties_pr_intrv	Intervalo de impresión para los campos de propiedades de flujo y medios porosos térmicos
	.	
	Iprmprop.	Índice de dos dígitos para seleccionar la elección de las propiedades de los medios porosos: 00 selecciones No se producirá ninguna impresión. 10 selecciona la impresión de los campos de propiedades de flujo de medios porosos: Masivo compresibilidad, densidad de la roca. 01 selecciona la impresión de los campos de propiedades térmicas de los medios porosos: conductividad térmica, capacidad calorífica de la roca. 11 selecciona la impresión de los campos de propiedades térmicas y de caudal.
	poros_pr_intrv	Intervalo de impresión para el campo de porosidad.
	permeability_pr_intrv	Intervalo de impresión para el campo de permeabilidad.

Tabla 26

Variables Hydrotherm

VARIABLES DE IMPRESIÓN PARA BALANCE DE ENERGÍA

PRINT 5	balance_pr_intrv	Intervalo de impresión para tablas de balance de caudal y energía térmica.
	dimno_pr_intrv	Intervalo de impresión para números adimensionales, Peclet y Nusselt.
	Iprdimno	Índice de dos dígitos para seleccionar la elección de números adimensionales. 00 selecciones No se producirá ninguna impresión. 10 selecciona la impresión del campo de número de Peclet térmico de la célula. 01 selecciona la impresión del campo numérico de Nusselt de la celda. 11 selecciona la impresión de los campos numéricos térmicos Peclet y Nusselt.
	residuals_pr_intrv	Intervalo de impresión para los residuos de las ecuaciones de diferencia.
	dump_pr_intrv	Intervalo de impresión para reiniciar el archivo de datos.

Tabla 27

VARIABLES Hydrotherm

VARIABLES DE IMPRESIÓN PARA INTERVALOS DE CAMPO		
PRINT 6	pltscalar_pr_intrv	Intervalo de impresión para campos de variables dependientes escalares: presión, entalpía, temperatura, saturación
	pltvect_pr_intr	Intervalo de impresión para campos de variables dependientes vectoriales: intersticial de velocidad de flujo másico.
	plotfile_type	<p>Índice para la selección del software de visualización que se va a utilizar (Explorer, HTgnuplot, IDL, Basin2) y el formato de salida (texto ASCII o binarios datos).</p> <p>0 selecciona que no se escribirá ningún archivo de trazado.</p> <p>1 selecciona el archivo de trazado del Explorador para que se escriba en formato de texto ASCII.</p> <p>2 selecciona el archivo de trama HTgnuplot para que se escriba en formato binario.</p> <p>3 selecciona el archivo de gráfico HTgnuplot para que se escriba en formato de texto ASCII.</p> <p>4 selecciona el fichero de trazado IDL para que se escriba en formato binario.</p> <p>5 selecciona el archivo de trazado IDL para que se escriba en formato de texto ASCII.</p> <p>6 selecciona el archivo de gráfico de columnas separado por tabulaciones para que se escriba en texto ASCII formato.</p> <p>8 selecciona el archivo de trama Basin2 para que se escriba en formato de texto ASCII.</p> <p>9 selecciona el fichero de trama Basin2 para escribirlo en formato binario.</p>
	time_ser_pr_intrv	: Intervalo de impresión para series temporales de variables dependientes en ubicaciones.

Especificando que la variable num_locations, (i(n), j(n), k(n), n=1 a num_locations) es opcional, pero será obligatorio declararla si time_ser_pr_intrv es distinto de cero. Siendo num_locations la variable que indica el número de ubicaciones de nodo seleccionadas en las que se van a utilizar los datos de series temporales reunido. Siendo i, j, k el conjunto de índices que identifican las ubicaciones de los nodos para los datos de series temporales.

Tabla 28

Variables Hydrotherm

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.		
SLICE	start_location	Palabra clave secundaria para seleccionar el orden de los registros de entrada que contienen índices de tipo roca. TOP selecciona los valores que se introducirán desde la capa del nodo superior hacia abajo (k=N _z a 1). BOTTOM selecciona los valores que se introducirán desde la capa del nodo inferior hacia arriba (k=1 a N _z).
	Index_rock_type	Valores de índice que definen el tipo de roca para cada celda en el SLICE actual número. El orden es fila por fila barriendo en la dirección positiva. n Valor de índice del tipo de roca para una celda en la región de simulación. El rango es del 1 al 9 -n especifica una celda con un valor constante de presión y entalpia y valor del índice del tipo de roca n -1n especifica una celda con un valor específico de presión y asociado a entalpia y temperatura del fluido entrante y valor del índice de la roca de tipo n. -3n especifica una celda de filtración y un valor de índice de tipo de roca n -5n especifica una celda con una cara de filtración o un flujo de precipitación y un valor de índice de tipo de roca 0 especifica una celda que se excluye de la región de simulación.
UNCONFINE D AQUIFER	Unconfined[T/F]	Interruptor lógico para la selección del sistema de flujo no confinado: T selecciona que el acuífero no está confinado F selecciona que el acuífero este confinado
	Patm.	presión atmosférica(dyne/cm ²)

Función de saturación

En la actualidad, existen tres opciones para la función que relaciona la presión capilar con la saturación para sistemas de flujo no confinados: LINEAR, COREY Y COOLEY. Están ligados a la elección de la función que relaciona la permeabilidad relativa con la saturación.

Tabla 29

Variables Hydrotherm

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.		
LINEAR	Pwr	Presión a saturación de agua residual para función lineal (dyna/cm ²).
	Pwb	Presión de punto de burbuja para el capilar como función lineal de la saturación. (dyna/cm ²)
	Pwb, Pwr; son opcional solo es necesario si (kordp, relativa permeabilidad; no confinado, acuífero no confinado)	
COREY	Lambd	Índice de tamaño de poro para la función Corey(adimensional), a
	Actualmente no se utiliza. El valor predeterminado se establece en 2.	
	Pwb	Presión de punto de burbuja para la confusión de presión capilar y saturación(dyna/cm ²)
Pwb, lambda; opcional requerido solo si kordp es 1 y no confinado es verdadero (kordp, permeabilidad relativa; no confinada, acuífero no confinado)		
COOLEY	Cc	Parámetro de exponente para la función de Cooley (adimensional).
	Pwb	Presión de punto de burbuja para la función de Cooley de presión capilar y Saturación (dina/cm ²).
	Bb	Parámetro para la función de Cooley (adimensional).

Pwb, bb, cc; Opcional, requerido solo si kodrp es 3 y no confinado es verdad (kodrp, permeabilidad relativa; acuífero no confinado).

Tabla 30

Variables Hydrotherm

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.	
XSPACING	Lista de las dimensiones de la celda en la dirección de la coordenada x si las coordenadas cartesianas.
YSPACING	Lista de las dimensiones de la celda en la dirección de la coordenada y si las coordenadas cartesianas(cm),(m),(km).
ZSPACING	Lista de las dimensiones de la celda en la dirección de la coordenada z (cm), (m),(km).
POROSITY	Porosidad del medio (-), (%).
XPERMEABILITY	Permeabilidad del medio poroso en la dirección de la coordenada x (cm ²), (m ²), (Darcy).
YPERMEABILITY	Permeabilidad del medio poroso en la dirección de la coordenada y (cm ²), (m ²), (Darcy).
ZPERMEABILITY	Permeabilidad del medio poroso en la dirección de la coordenada z (cm ²), (m ²), (Darcy).
RDENSITY	Densidad de la fase sólida del medio poroso (no la densidad aparente) (g/cm ³), (kg/m ³).
SPECIFIC HEAT	Calor específico o capacidad calorífica de la fase sólida de la matriz porosa. (erg/g-K), (J/g-K), (J/kg-K), (kJ/kg-K), (erg/g-C), (J/g-C), (J/kg-C).
THERMAL CONDUCTIVITY (W/m K)	Conductividad térmica de los medios porosos y fases fluidas (erg/s-cm-K),(W/mK),(J/s-m-K).
	Unidades Unidades dimensionales de medida que deben seleccionarse entre las opciones. Se muestra con la palabra clave CONDUCCIÓN.
	option_no Establezca en 1 para calcular una distribución lineal del flujo de calor a lo largo de la parte inferior de la región
	heat_flux_1 Valor del flujo de calor en i=1 (unidad).
	heat_flux_nx Valor del flujo de calor en i=N (unidad).

Tabla 31

Variables Hydrotherm

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.

CONDUCTIVE	Flujo de calor conductivo a lo largo de la base del modelo(mW/m ²).
TEMPERATURE	Distribución de temperatura en condiciones iniciales para la región (C), (Deg.C). Estos valores serán los valores de la condición de contorno en cualquier límite de presión y entalpía especificados nodos. Si se utiliza, no especifique también una distribución de entalpía. La entalpía específica será calculada a partir de las distribuciones de temperatura y presión.
CALC	2, top_temp, temp_grad
(unit)	Unidades dimensionales de medida que deben seleccionarse entre las opciones, se muestra con la palabra clave TEMPERATURA. Se requieren paréntesis, pero las unidades no distinguen entre mayúsculas y minúsculas.
option_no	Establezca en 2 para calcular una distribución de temperatura basada en la temperatura en el nodo superior de la región de malla activa y el gradiente de temperatura en la dirección vertical.
top_temp	Temperatura en el nodo superior de la región de malla activa (°C).
temp_grad	Gradiente de temperatura en dirección vertical (°C/km).
PRESSURE	Distribución de presión en condiciones iniciales para la región (dinas/cm ²), (Pa), (bar). Estos valores serán los valores de las condiciones de contorno en cualquier nodo de límite de presión especificado.
CALC	1, top_pressure
Unidades	Unidades dimensionales de medida que deben seleccionarse entre las opciones. Se muestra con la palabra clave PRESIÓN. Se requieren paréntesis, pero las unidades no distinguen entre mayúsculas y minúsculas.
option_no	Establezca en 1 para calcular una distribución de presión hidrostática basada en una presión uniforme en los nodos superiores de la región de malla activa y la distribución de temperatura (entalpía) especificada con la profundidad.
top_pressure	Presión en los nodos activos más altos de la región (unidad). Conjunto predeterminado a 1.013×10^6 dinas/cm ² .

PERIODO DE TIEMPO

Las líneas de PERIODO DE TIEMPO especifican el paso de tiempo inicial y el número de fuente y sumideros y, lo que es más importante, también se puede utilizar para cambiar las condiciones en cualquier momento durante una ejecución de simulación. Las contribuciones de fuentes y sumideros pueden ser variadas, opciones de impresión. modificado, y varios de los PARÁMETROS cambiados usando un TIEMPO. Línea PERIODO y cualquier línea adicional requerida. No hay límite al número de líneas de PERIODO DE TIEMPO, pero deben ingresarse en orden cronológico. La última línea del archivo debería tener "tchg" = -1 para finalizar la ejecución.

Tabla 32

Variables Hydrotherm

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.	
Tchg	Tiempo (en años o segundos, dependiendo de "iyr") en el que este período finalizará y aparecerá una nueva línea de PERÍODO DE TIEMPO. leer. Un valor de -1 finalizará la ejecución y debería aparecer en la última línea del archivo
Delt	Paso de tiempo inicial (en años o segundos, según "iyr"). Después del primer período de tiempo, el paso de tiempo se calculará automáticamente si "delt" se especifica como -1
nsrce[I]	Número de líneas SOURCE/ SINK a seguir; -1 indica que no hay cambios en las líneas SOURCE/SINK con respecto al período de tiempo anterior
lchgpr T/F]	[T indica que se deben cambiar alguna o todas las opciones de impresión/trazado especificadas anteriormente y requiere que sigan las líneas impresión/trazado e IMPRESIÓN descritas anteriormente. F indica que no se deben cambiar las opciones de impresión/trazado.
nparms[I]	Número de PARÁMETROS que se deben redefinir. En cualquier momento durante la ejecución, se pueden modificar la porosidad, la permeabilidad "x", "y" y "z", la conductividad térmica, el flujo de calor conductivo, la temperatura/entalpía y (o) la presión. Las líneas requeridas son idénticas a las líneas de PARÁMETROS descritas anteriormente y siguen a las líneas FUENTE/SUMISIÓN e IMPRESIÓN (si las hay). Recuerde que la opción de formato NODO proporciona una manera fácil de cambiar los valores de algunos bloques.

Variable source/sink

Tabla 33

Variabes Hydrotherm

DESCRIPCIÓN DE VARIABLES.

WELL	Palabra clave que especifica un grupo o nodo de datos de origen establecido.
Unit_Flow	Unidades dimensionales para el caudal másico de pozos (g/s), (kg/s), (g/año),(kg/año).
Unit_heat	Unidades dimensionales para entalpías o temperaturas específicas de los fluidos de inyección (erg/g), (J/g), (J/kg), (kJ/kg) o (C), (Deg.C).
I	Índice de la ubicación del pozo a lo largo de la coordenada x. En coordenadas cilíndricas, seria 1 para el pozo único en el eje del sistema de coordenadas.
J	Índice de la ubicación del pozo a lo largo de la coordenada y. No se utiliza en coordenadas cilíndricas, pero se debe incluir un cero o un espacio en blanco en el registro de entrada.
well_flow	Caudal másico del pozo (unidad caudal). El valor positivo es inyección (entrada), negativo es producción (salida).
well_enth	Entalpía específica o temperatura del fluido de inyección (unidad calor). Las unidades dimensionales especificadas determinan si el valor de entrada es entalpía específica o temperatura. Ingrese 0 para un pozo de producción. Si se especifica temperatura, se calculará la entalpía específica, basada en un fluido monofásico.
n_openint	Número de celdas con un intervalo abierto o protegido definido para este pocillo.
k(m)	Índice a lo largo de la coordenada z de una celda que tiene un intervalo abierto o filtrado. Debe haber valores n_openint de estos datos. Indica el final de este conjunto de datos.

Se deben incluir pares de registros de datos como se muestra entre llaves, {}, para cada pozo que se defina para la región de simulación o para cada pozo que tenga nuevos datos transitorios especificados.

Opcional, el grupo de datos de POZO se requiere solo si nsrce es dos, se puede usar si nsrce es uno. Todos los pozos con datos nuevos para este # PERÍODO DE TIEMPO se deben incluir en un grupo de datos de POZO. Tenga en cuenta que dos pozos no pueden coexistir en la misma columna de celdas.

3.5 Condiciones del software

Dentro de las condiciones tenemos de condición tipo valor específico como lo es presión específica, entalpía específica, temperatura especificada y tenemos de tipo combinación flujo específico, flujo calor específico y superficie de filtración.

-Límite de presión, entalpía y temperatura específica

La primera condición es de frontera de Dirichlet, es una función de presión de fluido específica para la ecuación de agua subterránea y una entalpía específica o una condición de temperatura específica para la ecuación de transporte de calor, dichas condiciones las podemos definir individualmente de la siguiente forma:

$$P = P_B(x, t) \text{ para } xyA_p^1 \text{ Ecu.15 ; } h = h_B(x, t) \text{ para } xyA_h^1 \text{ Ecu. 16;}$$

$$T = T_B(x, t) \text{ para } xyA_t^1 \text{ Ecu.17}$$

En la cual:

Tabla 34

Definición de variables

P_B	Presión del fluido en el límite del calor especifico (Pa)
h_B	Entalpia especifica en el límite del calor especificado(J/kg)
T_B	Temperatura límite del valor especificado(°C)
x	Ubicación espacial en el límite (m)
A_p^1	Parte del límite con una condición límite de presión especificada
A_h^1	Parte del límite regional con condición de límite de entalpia especificada
A_t^1	Límite regional con condición de límite de temperatura especifica.

En las primeras versiones del software las condiciones límites de presión y temperatura estaban unidas, siendo beneficioso para simular el transporte de calor en límites abiertos con entrada de agua subterránea, en las superficies límites donde ocurre el flujo el transporte de calor domina sobre cualquier transporte conductivo. La condición de frontera asociada al transporte de calor sería el flujo advectivo de entalpia, mientras que para las condiciones de contorno de flujo de entrada se necesita especificar la entalpia del fluido entrante, así mismo para el límite de flujo de salida la entalpia del fluido saliente será el fluido ambiental en el límite y se determinará por medio de la ecuación de transporte de calor. Todas estas combinaciones de límite se conocen como condiciones de presión especificada y entalpia asociada, El fluido que ingresa a la región advecta como calor a la entalpia variará el límite local de la simulación. En la última versión del software nos permita que las condiciones de límite de presión y temperatura especificada se distribuyan de forma independiente. Frecuentemente se utilizan condiciones límite de presión y temperatura específicas en el límite del terreno de modelo, así mismo los límites laterales que se determinan son la presión hidrostática y geotérmica.

-Límite de flujo específico

La condición establece que no exista flujo de fluido ni flujo de calor a través de superficies límites, el flujo de calor y fluido se pueden especificar en ciertas partes de la frontera como funciones de tiempo y ubicación. Las dos condiciones de contorno de flujo son el flujo de carga de precipitación que es la precipitación infiltrante y se aplica solo a lo largo del límite de la región a simular frecuentemente superficie terrestre. la otra condición es de flujo de calor el cual representa el calentamiento geotérmico conductivo debajo de la región de simulación y se aplica nada más a lo largo el límite inferior.

-Límite de precipitación y recarga

Partiendo del flujo ilimitado de agua subterránea la recarga de precipitaciones en la superficie terrestre se representa por la condición límite de flujo de fluido especificada como flujo de e calor advectivo que se asocia a la región, se especificara el flujo volumétrico de agua sobre el límite de superficie y la temperatura que se asocia con el flujo, esta temperatura se convierte en entalpia a presión atmosférica lo cual determina el flujo advectivo de calor hacia la región.

Definiremos el flujo como la recarga neta de la región simulada, esta podría resultar de restar la precipitación y la evapotranspiración, considerando una posible variación espacial y así como de tiempo durante la realización de la simulación.

La evapotranspiración en función de profundidad de nivel del acuífero debajo de superficie, encaramiento y escorrentía espacial superficial del exceso de flujo de precipitación no se encuentran representados dentro del software. Así como la presión atmosférica no puede variar dependiendo de la ubicación a lo largo de la superficie terrestre, esto representaría una limitación a la hora de evaluar superficies con geografía montañosa.

El flujo de recarga de precipitación y el flujo de calor advectivo no variaran con los cambios de saturación o temperatura en la superficie, el flujo máximo de precipitación está limitado por el valor de la permeabilidad vertical saturada, si el flujo de precipitación se excede del límite provocara una advertencia y con ello la finalización de la simulación, teniendo en cuenta lo anterior el flujo de precipitación será determinado por:

$$q_F = q_{FP}(x, t) \text{ para } xyA_p^2 \quad \text{Ecu.17}$$

Tabla 35

Definición de variables

q_F	flujo de fluido en el límite de precipitación recarga
q_{FP}	flujo de fluido especificado procedente de la precipitación
A_p^2	límite regional con una condición de límite precipitación recarga

Suponiendo que el flujo térmico de la precipitación sea puramente advectivo y el calor sea procedente de la temperatura asociada al flujo de precipitación.

3.6 Condiciones iniciales

El software Hydrotherm solo permite resolver formas transitorias del flujo de agua subterránea y las ecuaciones de transporte de calor, por lo cual las condiciones iniciales necesarias para simular. Así para la ecuación del flujo de agua subterránea es necesario especificar una distribución de presión inicial dentro de la región.

Dentro de las condiciones más fáciles de simular están:

- La hidrostática, en la cual la presión uniforme se especifica a una profundidad o elevación determinada.
- Una distribución de presión inicial especificada a lo largo de la parte superior de la región simulada.
- Distribución de presión hidrostática inicial en base al campo de densidad resultante del campo de temperatura inicial
- Especificación general de presión por nodo a nodo, lo cual es el resultado obtenido de una simulación realizada antes.

Para realizar un análisis de la ecuación de transporte de energía de calor, se necesita la entalpia inicial o el campo de temperatura especificando en función de posición o interpolación lineal a lo largo de la dirección de la coordenada "Z" debido a que la interpolación no está disponible en el software para direcciones horizontales, sin embargo la interpolación de temperatura si es posible realizar en dirección vertical creando un perfil geotérmico inicial, así mismo es posible extrapolar partiendo de temperatura inicial en la parte superior de la región a analizar por medio del gradiente de temperatura específico. La temperatura inicial la podemos calcular como la temperatura del

punto de ebullición en función de la profundidad usando una distribución de presión hidrostática matemáticamente hablando sería:

$$p = p^0(x), \text{ es } t = 0 \text{ en } V. \text{ Ecu.18 ; } h = h^0(x), \text{ es } t = 0 \text{ en } V. \text{ Ecu.19;}$$

$$T = T^0(x), \text{ es } t = 0 \text{ en } V. \text{ Ecu.20}$$

Tabla 36

Definición de variables

p^0	Distribución inicial de presión del fluido
h^0	Distribución de entalpia especifica inicial
T^0	Distribución de temperatura inicial
V	Región de simulación.

El campo de presión, entalpia y porosidad calculados en la simulación pueden definirse las condiciones iniciales para una simulación posterior haciendo uso de dos archivos de salida diseñados para este propósito. Siendo la forma más sencilla de establecer un campo de flujo en estado estacionario antes de simular el transporte de calor siendo necesario establecer un campo de flujo inicial en estado estacionario es razonable o no para la situación física que se simula. Es importante mencionar que con una aproximación hidrostática o de condiciones de presión inicial podemos trasladar una cantidad sustancial de tiempo de simulación estableciendo el campo de flujo en estado estacionario con una tolerancia numérica determinada.

Hay que tener presente algunas consideraciones especiales cuando se establecen las condiciones iniciales en medios porosos casi secos. Debido a que son muy lentos y se requiere demasiado tiempo de simulación para calcular las condiciones de equilibrio. Por otro lado, cuando el flujo de la zona parcialmente no saturada no es importante la simulación se podría facilitar al determinar la presión inicial de una saturación de agua mayor en la zona de lo que es físicamente realista. Si definimos una mayor saturación nos permitirá mayores caudales en la zona parcial de saturación permitiendo tener una configuración equilibrio en lo que es nivel freático en un periodo de tiempo más corto que el sistema real.

3.7 Números sin dimensiones

El flujo y transporte térmico en un medio poroso lo podemos caracterizar por medio de números adimensionales, de los cuales el software Hydrotherm utiliza dos de ellos para realizar sus cálculos, estos números serían número de Nusselt y el número Peclet térmico.

-Número Nusselt

Se define como la relación entre flujo de calor total y flujo de calor conductivo en un sistema de transporte térmico, al definiendo las condiciones locales será en función del espacio y tiempo de la simulación. Originalmente el número Nusselt está determinado para regiones unidimensionales, se amplió para regiones tridimensionales haciendo uso de las magnitudes de los distintos constituyentes del vector. siendo la ecuación la siguiente:

$$N_u = |\rho q| h + \frac{1}{K_a \nabla T} \quad \text{Ecu.21}$$

Tabla 37

Definición de variables

N_u	Numero Nusselt
$ \rho q $	Magnitud del flujo masico del fluido (kg/s -m ²)
∇T	Magnitud del gradiente de temperatura (°C/m)

Este número oscila desde 1 para la conducción pura hasta ∞ para advección pura.

-Número peclet térmico

Es la relación entre el flujo de calor advectivo y el flujo de calor conductivo de una zona térmica. El sistema de transporte es similar al número Peclet comúnmente se utiliza para simular transporte de solutos. cuando definimos las condiciones locales el número queda en función de espacio y tiempo, si definimos la ecuación de Peclet térmico nos quedaría:

$$P_e = \frac{L|q|}{K_a} \quad \text{Ecu. 22 y} \quad k_a = \frac{K_a}{(\rho c)_a} \quad \text{Ecu. 23}$$

Tabla 38

Definición de variables

Pe	Numero térmico Peclet
L	Parámetro de escala de longitud
$ q $	Magnitud de la velocidad de Darcy
k_a	Difusión térmica efectiva del medio poroso
$(\rho c)_a$	Capacidad calorífica efectiva por unidad de volumen del medio poroso
K_a	Conductividad térmica efectiva del medio poroso

Este número lo podemos aplicar para regiones unidimensionales como para regiones tridimensionales definiendo la magnitud de la suma vectorial de los números de peclet en cada una de las tres direcciones de las coordenadas. Para ello calcularemos en número peclet para cada dirección de coordenada usando la escala de la longitud y la velocidad de Darcy en esa misma dirección de la siguiente manera:

$$Pe_{xm} = \frac{\Delta X_m q_{xm} (\rho c)_{am}}{K_{am}} \text{ Ecu.24}; \quad Pe_{ym} = \frac{\Delta Y_m q_{ym} (\rho c)_{am}}{K_{am}} \text{ Ecu. 25}$$

$$Pe_{zm} = \frac{\Delta Z_m q_{zm} (\rho c)_{am}}{K_{am}} \text{ Ecu.26}; \quad Pe = Pe_{xm}^2 + Pe_{ym}^2 + Pe_{zm}^2 \text{ Ecu.27}$$

Tabla 39

Definición de variables

Pe_{dm}	Numero de peclet térmico en la dirección de coordenadas d
Δd_m	Longitud característica en la dirección de coordenadas d
q_{dm}	Velocidad de Darcy del fluido en la dirección de coordenadas
d	Dirección de coordenadas X, Y, Z

3.8 Instalación del software HYDROTHERM

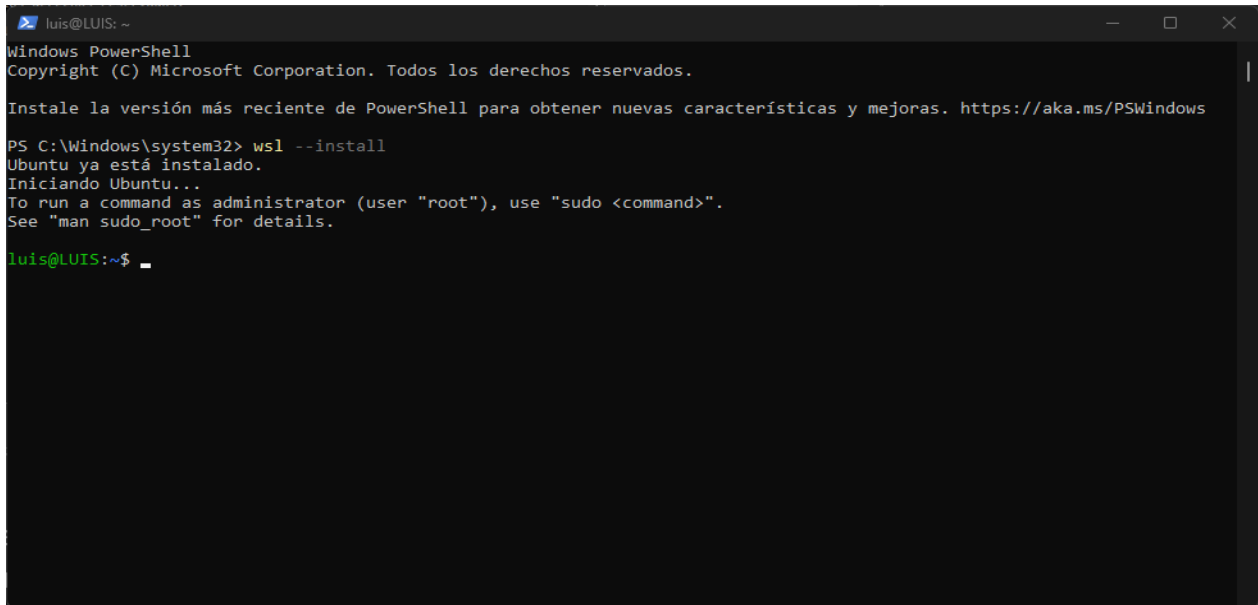
3.8.1 Instalación de software y complementos auxiliares.

Para iniciar con la instalación de nuestro software de simulación de flujo de agua subterránea será necesario tener instalados los siguientes programas y sus respectivas librerías: WSL, PYTHON, MAKEFILE, VISUAL CODE, NOTEPAD++ Y UNA DISTRIBUCION DE LINUX.

1. WSL: Característica del Sistema Operativo Windows que permite ejecutar un sistema de archivos Linux. Para su instalación se realiza desde PowerShell ejecutando como administrador, A continuación, se deberá escribir el comando: “wsl --install”.(Microsoft, 204 C.E.)

Figura 23

Instalación de Software WSL



```
luis@LUIS: ~
Windows PowerShell
Copyright (C) Microsoft Corporation. Todos los derechos reservados.

Instale la versión más reciente de PowerShell para obtener nuevas características y mejoras. https://aka.ms/PSWindows

PS C:\Windows\system32> wsl --install
Ubuntu ya está instalado.
Iniciando Ubuntu...
To run a command as administrator (user "root"), use "sudo <command>".
See "man sudo_root" for details.

luis@LUIS:~$
```

Posterior a la instalación de WSL será necesario activar el subsistema para Linux y actualizar WSL a WSL2, Para realizar esta modificación se realizará en varios pasos como a continuación se describen:

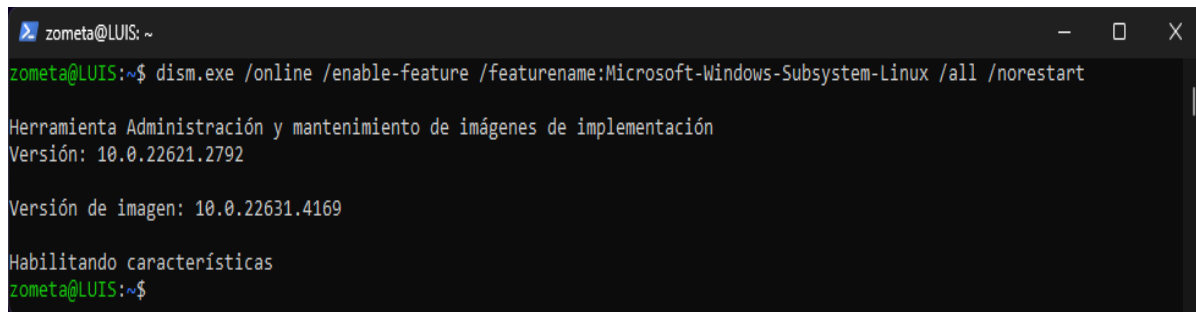
Paso 1 Habilitar subsistema de Windows para Linux

Desde el terminal de PowerShell escribiremos la siguiente línea de código la cual habilitara la característica opcional de subsistema de Windows para Linux:

```
dism.exe /online /enable-feature /featurename:Microsoft-Windows-Subsystem-Linux /all /norestart.
```

Figura 24

Activación de Característica Subsistema Linux



```
zometa@LUIS: ~  
zometa@LUIS:~$ dism.exe /online /enable-feature /featurename:Microsoft-Windows-Subsystem-Linux /all /norestart  
Herramienta Administración y mantenimiento de imágenes de implementación  
Versión: 10.0.22621.2792  
Versión de imagen: 10.0.22631.4169  
Habilitando características  
zometa@LUIS:~$
```

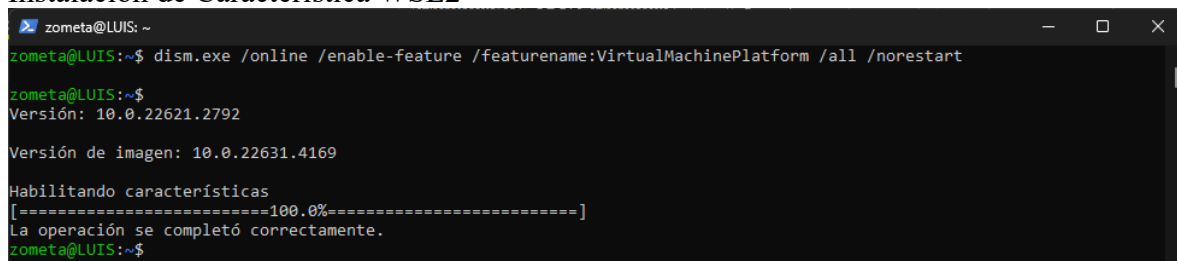
Paso 2 Habilitar Máquina Virtual:

Para proceder a la instalación de WLS2, se debe de habilitar la característica de plataforma de máquina virtual con la cual nos permite tener la función de virtualización para nuestro entorno de Linux sin necesidad de tener instalada una máquina Virtual ,esta característica la habilitaremos escribiendo el siguiente comando en PowerShell:

```
dism.exe /online /enable-feature /featurename:VirtualMachinePlatform /all /norestart.
```

Figura 25

Instalación de Característica WSL2



```
zometa@LUIS: ~  
zometa@LUIS:~$ dism.exe /online /enable-feature /featurename:VirtualMachinePlatform /all /norestart  
zometa@LUIS:~$  
Versión: 10.0.22621.2792  
Versión de imagen: 10.0.22631.4169  
Habilitando características  
[=====100.0%=====]  
La operación se completó correctamente.  
zometa@LUIS:~$
```

Al finalizar la operación, será necesario reiniciar el equipo informático con la finalidad de que se efectúen los cambios realizados.

Paso 3 Actualización del kernel de Linux

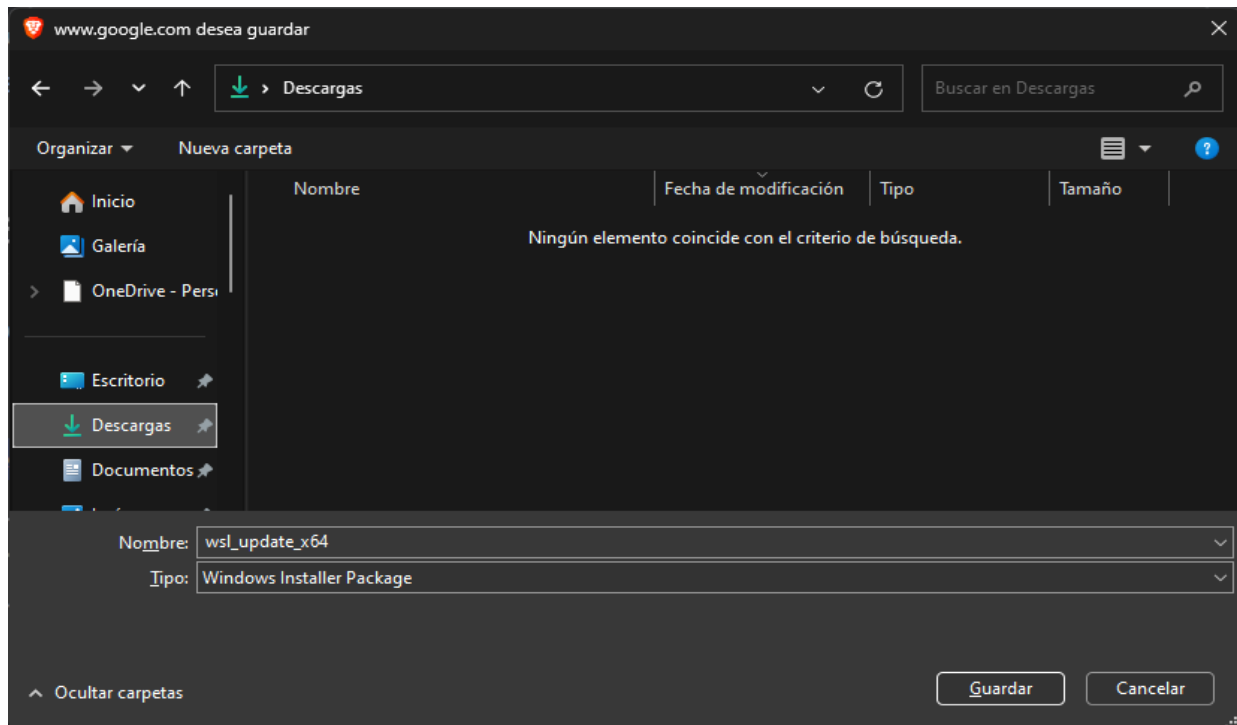
Con la finalidad de tener un mejor rendimiento, compatibilidad y poder aprovechar al máximo las características de Linux ,será necesario descargar la última version de kernel de Linux ,para ello deberemos ingresar en nuestro navegador el siguiente

URL: https://wslstorestorage.blob.core.windows.net/wslblob/wsl_update_x64.msi

Este enlace automáticamente nos descarga un paquete de actualización de Windows para WSL como a continuación se muestra:

Figura 26

Paquete de Actualización Software WSL



Al finalizar la instalación del paquete, ya estaríamos por finalizar la preparación para poder hacer uso del subsistema de Linux en Windows.

Paso 4 Establecer WLS2 como version predeterminada

Ejecutaremos PowerShell como administrador, seguidamente ingresaremos el comando :

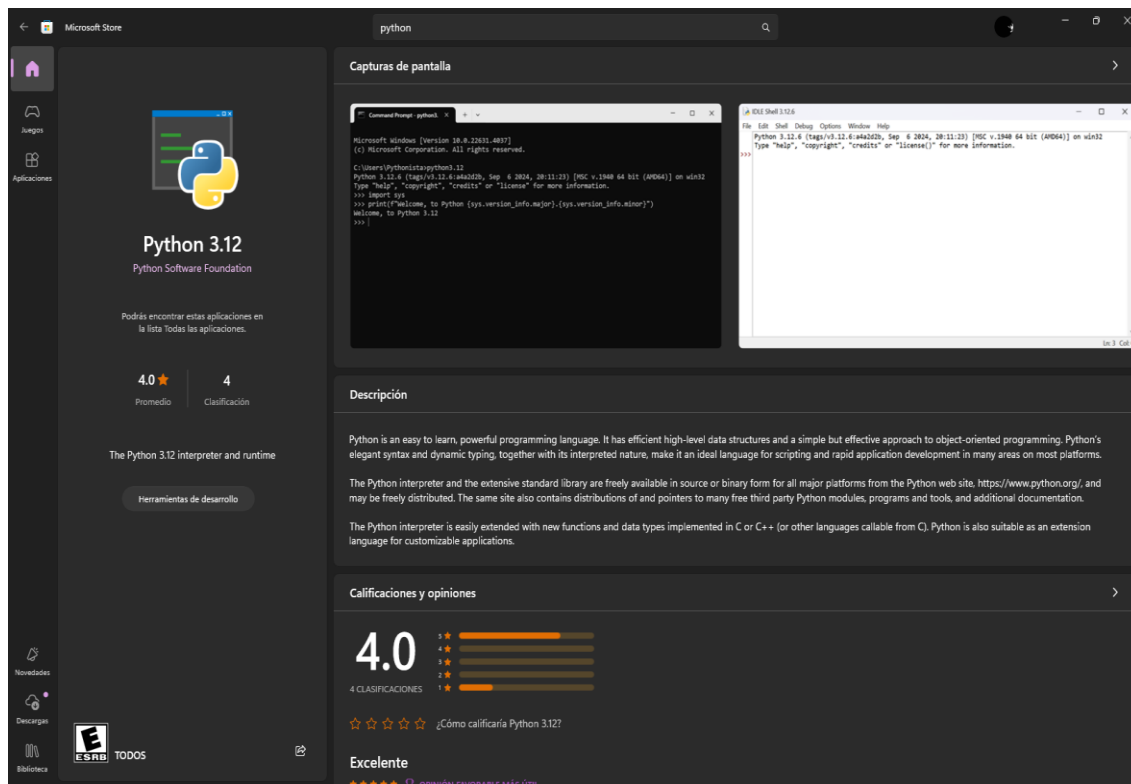
```
wsl --set-default-version 2
```

Teniendo definida la version de WSL2 como predeterminada, solo faltaría obtener la distribucion de Linux que más nos parezca ,teniendo como opciones Debian, Ubuntu ,Kali Linux ,Arch Linux ,Fedora entre otras.

2. Python: Lenguaje de programación utilizado para el desarrollo de software, machine learning entre otras aplicaciones. Para poder procesar los datos obtenidos será necesario tener instalado las librerías Numpy, Pandas y Matplotlib, asi mismo el software el cual se adquiere mediante la tienda oficial de Microsoft. La instalación de las librerías se realiza a través del comando pip install “librería” dentro del terminal, siendo asi el comando para la librería Pandas: pip install pandas. (Guido van Rossum, 1989; NumPy team, 2005; The Matplotlib development team, 2012)

Figura 27

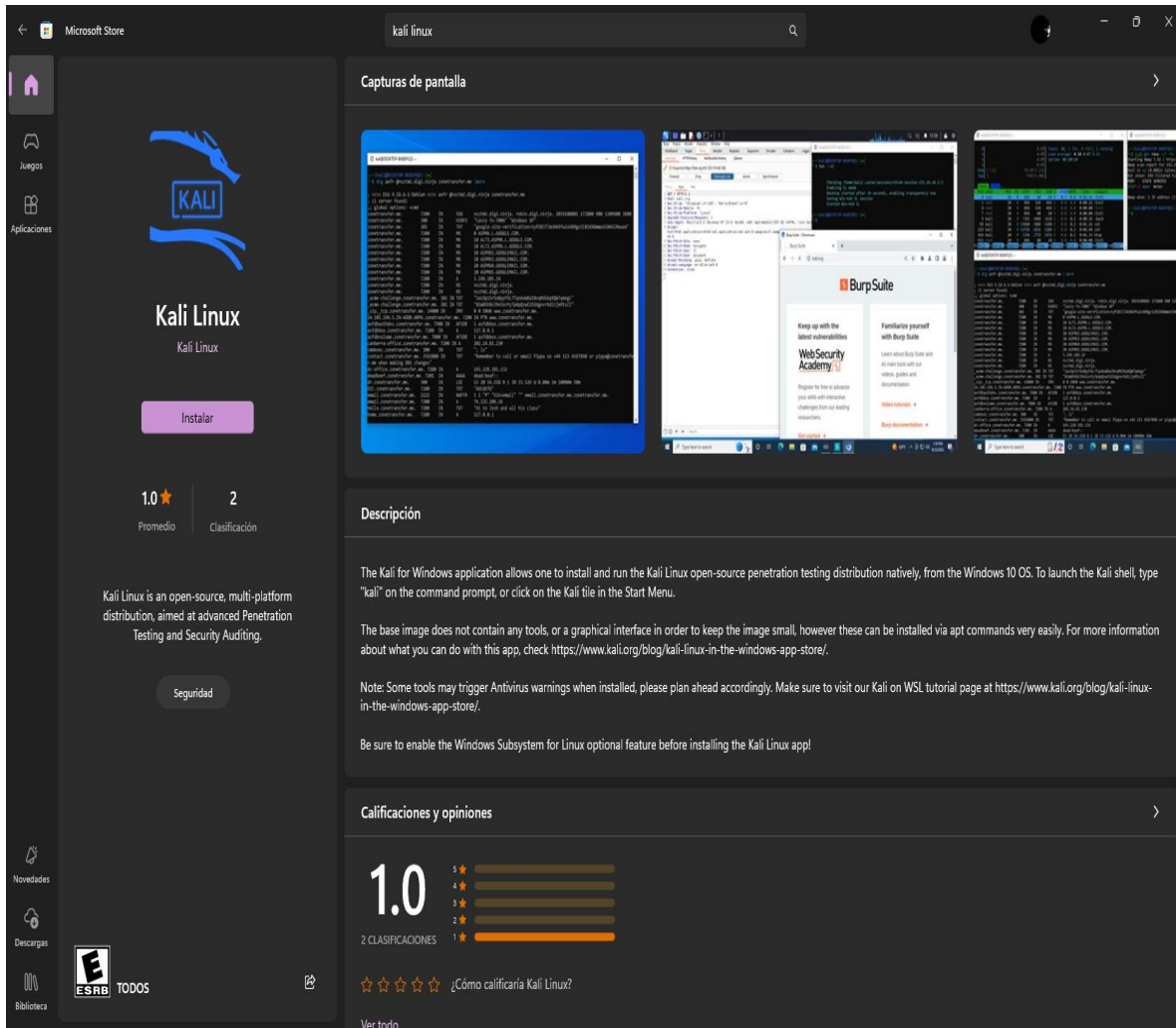
Descarga de Herramienta Informática Python 3.12



3. Kali Linux: Distribución de sistema operativo Linux basada en Debian, diseñado con fines de seguridad, análisis de redes, análisis de datos entre muchas otras funciones, para su instalación nos dirigiremos a la Microsoft Store en el cual encontraremos la distribución de Linux la cual instalaremos. (Devon Kearns, 2013)

Figura 28

Descarga Subsistema Linux

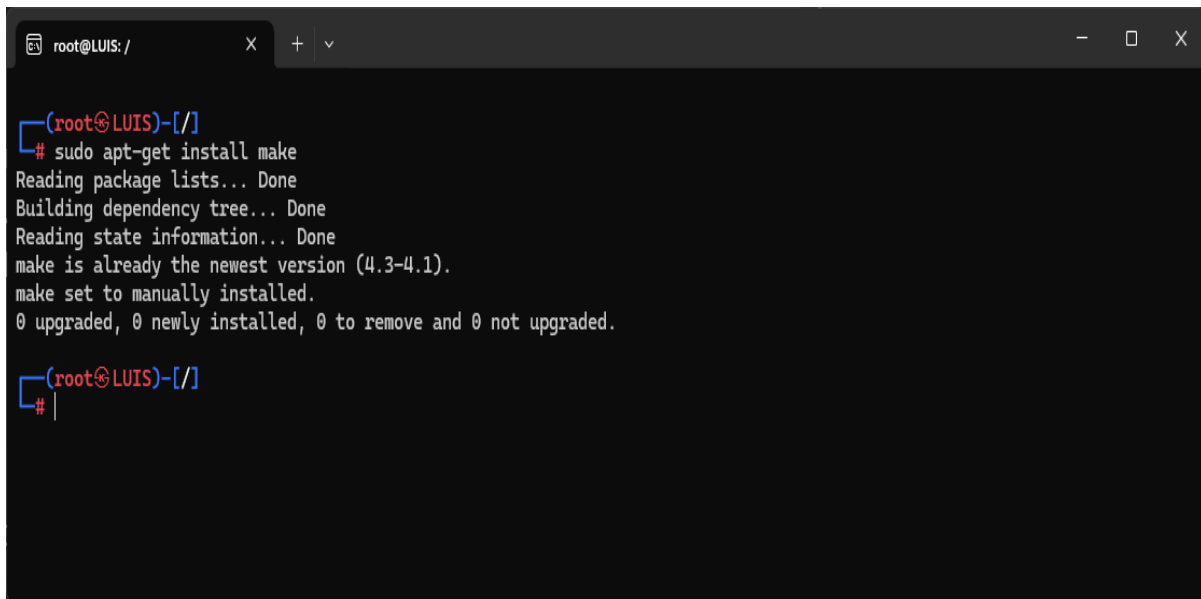


Posterior a instalar el software será necesario crear el usuario UNIX, contraseña y descargar los paquetes necesarios para su funcionamiento.

4. Makefile: Es una utilidad disponible en Linux, la cual nos permite realizar compilación de códigos a través del terminal de manera más fácil, agilizando el proceso de ingresar cada comando a mano, que muchas veces son una serie bastante larga de comandos y escribirlo de manera compacta obteniendo el mismo resultado. Su instalación se realiza por medio del comando “sudo apt-get install make ”.([Learn Makefiles, 2023](#))

Figura 29

Instalación de Compilador Makefile

A terminal window with a dark background and light text. The window title is 'root@LUIS: /'. The prompt is '(root@LUIS)-[/]'. The user enters the command '# sudo apt-get install make'. The terminal output shows: 'Reading package lists... Done', 'Building dependency tree... Done', 'Reading state information... Done', 'make is already the newest version (4.3-4.1).', 'make set to manually installed.', and '0 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 0 not upgraded.'. The prompt returns to '(root@LUIS)-[/]' and the user enters a '#' character.

```
(root@LUIS)-[/]  
# sudo apt-get install make  
Reading package lists... Done  
Building dependency tree... Done  
Reading state information... Done  
make is already the newest version (4.3-4.1).  
make set to manually installed.  
0 upgraded, 0 newly installed, 0 to remove and 0 not upgraded.  
  
(root@LUIS)-[/]  
#
```

5. Gfortran: Herramienta que nos permite compilar lenguaje Fortran, Fortran es un lenguaje de programación utilizado para realizar investigaciones en los diversos campos de estudio entre ellos se encuentran programas escritos utilizados para modelización climática.([Fortran Community, 2023](#))

Para su instalación se deberá seguir una serie de comandos los cuales se describen a continuación:

Paso 1. Instalación de Gfortran: sudo apt install gfortran

Figura 30

Instalación de Compilador Gfortran

```
root@LUIS: /
└─# sudo apt install gfortran
Installing:
  gfortran

Installing dependencies:
  gfortran-13 gfortran-13-x86-64-linux-gnu gfortran-x86-64-linux-gnu libgfortran-13-dev

Suggested packages:
  gfortran-multilib gfortran-doc gfortran-13-multilib gfortran-13-doc libcoarrays-dev

Summary:
  Upgrading: 0, Installing: 5, Removing: 0, Not Upgrading: 0
  Download size: 11.4 MB
  Space needed: 38.3 MB / 1,014 GB available

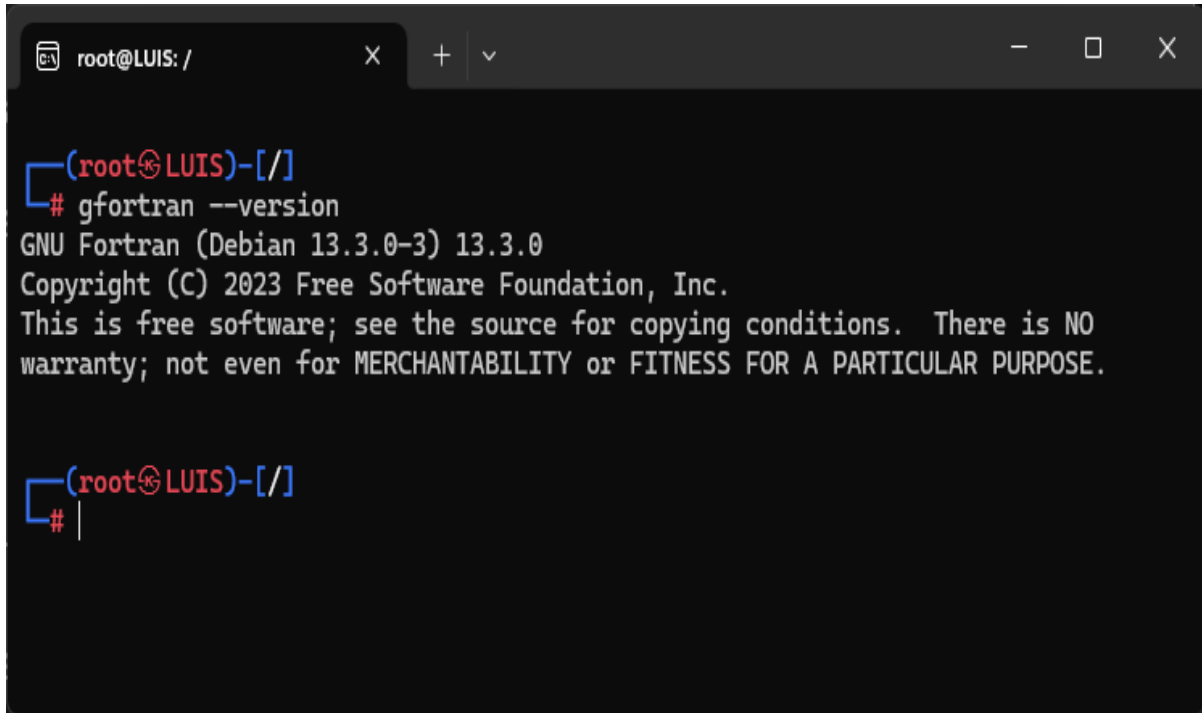
Continue? [Y/n] y
Get:2 http://kali.download/kali kali-last-snapshot/main amd64 gfortran-13-x86-64-linux-gnu amd64 13.3.0-3 [10.6 MB]
Get:4 http://kali.darklab.sh/kali kali-last-snapshot/main amd64 gfortran-x86-64-linux-gnu amd64 4:13.2.0-7 [1,280 B]
Get:1 https://mirror.cedia.org.ec/kali kali-last-snapshot/main amd64 libgfortran-13-dev amd64 13.3.0-3 [847 kB]
Get:3 https://mirror.cedia.org.ec/kali kali-last-snapshot/main amd64 gfortran-13 amd64 13.3.0-3 [13.7 kB]
Get:5 https://mirror.cedia.org.ec/kali kali-last-snapshot/main amd64 gfortran amd64 4:13.2.0-7 [1,440 B]
Fetched 11.4 MB in 13s (849 kB/s)
Selecting previously unselected package libgfortran-13-dev:amd64.
(Reading database ... 299389 files and directories currently installed.)
Preparing to unpack ../libgfortran-13-dev_13.3.0-3_amd64.deb ...
Unpacking libgfortran-13-dev:amd64 (13.3.0-3) ...
Selecting previously unselected package gfortran-13-x86-64-linux-gnu.
Preparing to unpack ../gfortran-13-x86-64-linux-gnu_13.3.0-3_amd64.deb ...
Unpacking gfortran-13-x86-64-linux-gnu (13.3.0-3) ...
Selecting previously unselected package gfortran-13.
Preparing to unpack ../gfortran-13_13.3.0-3_amd64.deb ...
Unpacking gfortran-13 (13.3.0-3) ...
Selecting previously unselected package gfortran-x86-64-linux-gnu.
Preparing to unpack ../gfortran-x86-64-linux-gnu_4%3a13.2.0-7_amd64.deb ...
Unpacking gfortran-x86-64-linux-gnu (4:13.2.0-7) ...
Selecting previously unselected package gfortran.
Preparing to unpack ../gfortran_4%3a13.2.0-7_amd64.deb ...
Unpacking gfortran (4:13.2.0-7) ...
Setting up libgfortran-13-dev:amd64 (13.3.0-3) ...
Setting up gfortran-13-x86-64-linux-gnu (13.3.0-3) ...
Setting up gfortran-13 (13.3.0-3) ...
Setting up gfortran-x86-64-linux-gnu (4:13.2.0-7) ...
Setting up gfortran (4:13.2.0-7) ...
update-alternatives: using /usr/bin/gfortran to provide /usr/bin/f95 (f95) in auto mode
update-alternatives: using /usr/bin/gfortran to provide /usr/bin/f77 (f77) in auto mode
Processing triggers for man-db (2.12.1-2) ...

(root@LUIS)-[~]
└─#
```

Paso 2. Verificar la version instalada: gfortran --version

Figura 31

Verificación de Version Gfortran

A terminal window with a dark background and light text. The window title is 'root@LUIS: /'. The prompt is '(root@LUIS)-[/]'. The user enters '# gfortran --version'. The output is: 'GNU Fortran (Debian 13.3.0-3) 13.3.0', 'Copyright (C) 2023 Free Software Foundation, Inc.', and 'This is free software; see the source for copying conditions. There is NO warranty; not even for MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.'. The prompt is now '(root@LUIS)-[/]#' with a cursor.

```
root@LUIS: /
(root@LUIS)-[/]
# gfortran --version
GNU Fortran (Debian 13.3.0-3) 13.3.0
Copyright (C) 2023 Free Software Foundation, Inc.
This is free software; see the source for copying conditions. There is NO
warranty; not even for MERCHANTABILITY or FITNESS FOR A PARTICULAR PURPOSE.

(root@LUIS)-[/]
# |
```

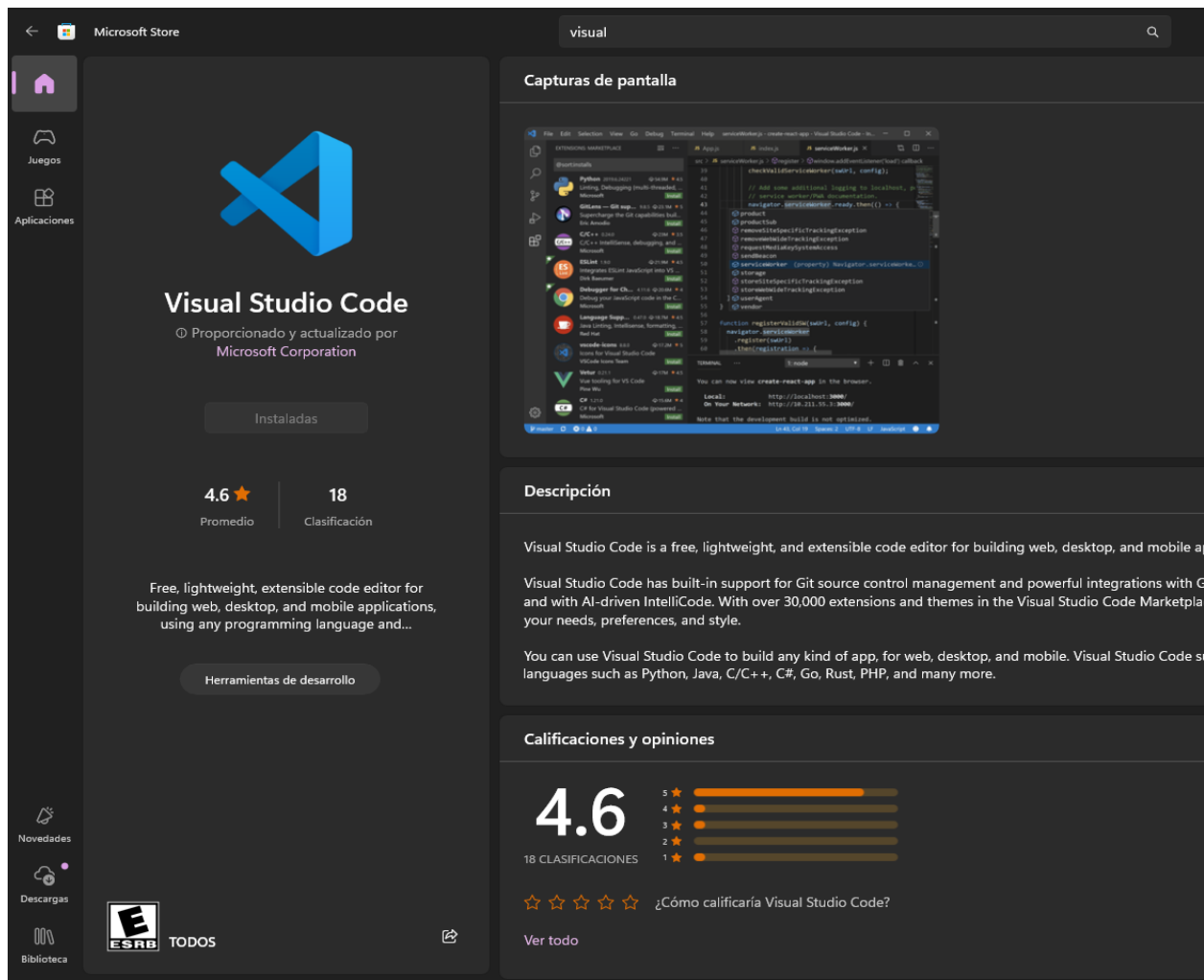
Se recomienda actualizar los repositorios y librerías de Linux: sudo apt update && sudo apt upgrade

En caso de que ocurra un error durante el proceso de instalación, se recomienda consultar la página oficial, cuya URL está disponible en el apartado de Bibliografía.

6. Visual Code: Editor de código fuente desarrollado por Microsoft, utilizado para el desarrollo de códigos fuente, depuración de script, entre otras funciones, su versatilidad y soporte de lenguajes de programación nos facilitan la creación de fuentes de manera más efectiva. Su instalación la realizaremos dirigiendo a la tienda oficial de Microsoft y colocando en el buscador el nombre de Visual Studio Code (Microsoft, 2015)

Figura 32

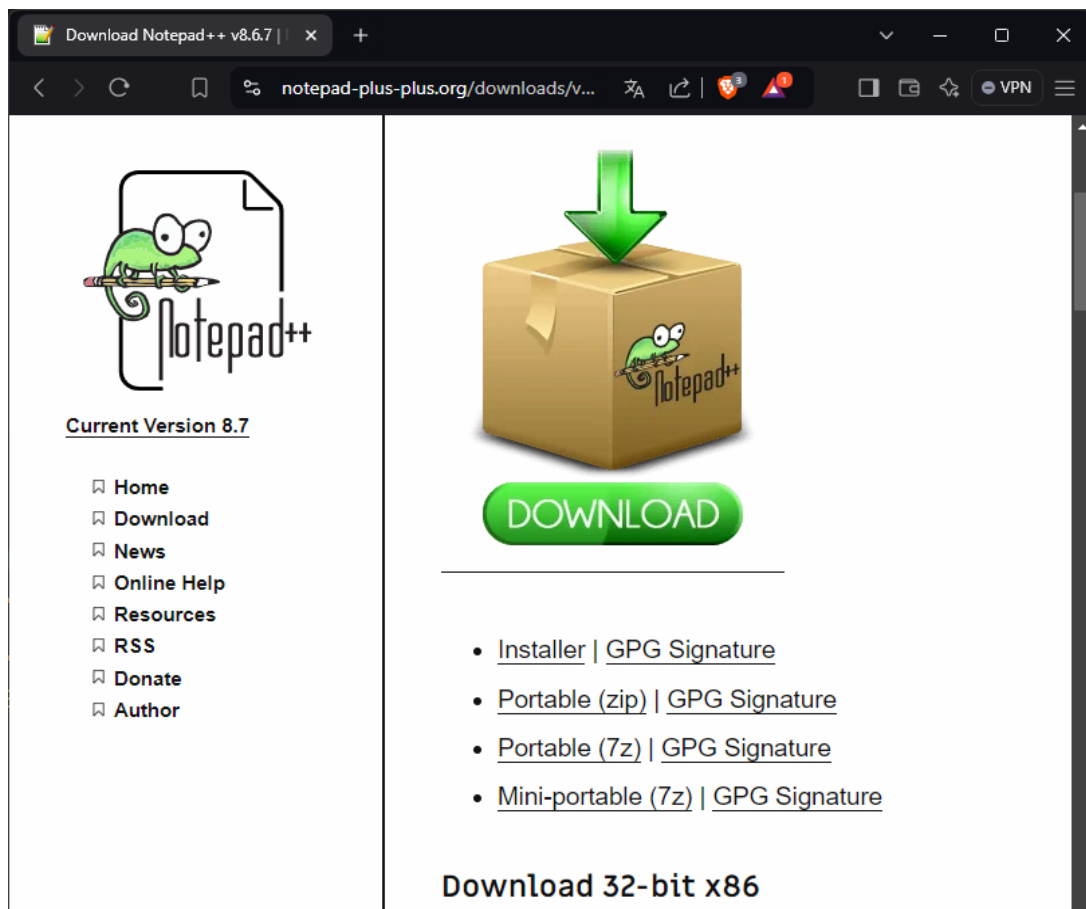
Instalación de Visual Studio Code



7. **Notepad++**: Editor de texto y de código fuente libre con soporte en múltiples lenguajes de programación, al igual el Block de Notas nos permite editar texto, el software se diferencia en las opciones avanzadas disponibles las cuales se utilizan durante desarrollo de aplicaciones y programas. La instalación se realiza descargando el instalador desde el sitio oficial de Notepad++, recomendando instalar la versión más reciente. (notepad-plus-plus.org, 2023)

Figura 33

Instalación de Notepad++



8. Instalación del software hydrotherm

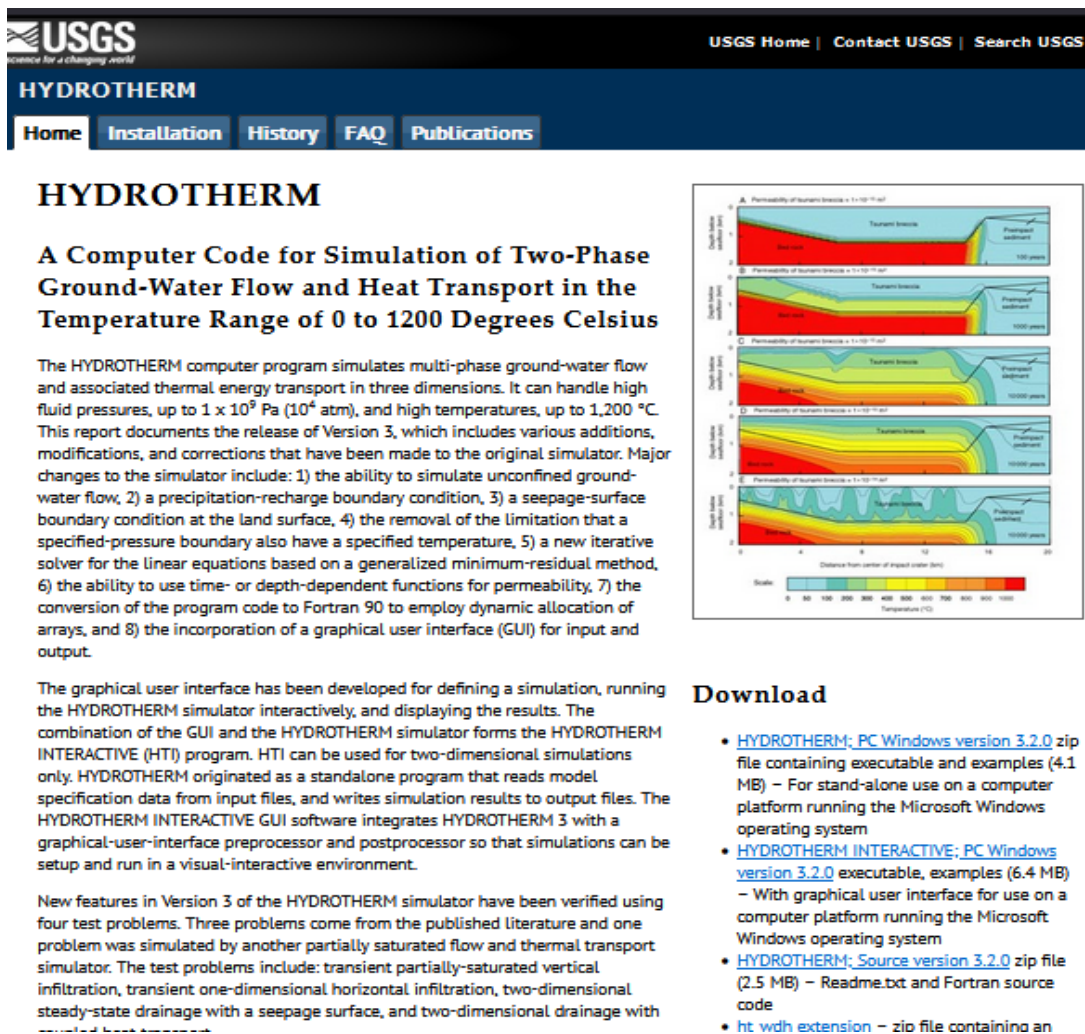
Para la instalación del software nos dirigiremos a la página oficial:

<https://volcanoes.usgs.gov/software/hydrotherm/>

En donde encontraremos el instalador para Linux y Windows así como los manuales y bibliografías referente al funcionamiento del software, así como se muestra en la siguiente ilustración.

Figura 34

Manuales e Instaladores de HYDROTHERM



The screenshot shows the USGS website for HYDROTHERM. The header includes the USGS logo and navigation links: Home, Installation, History, FAQ, and Publications. The main heading is "HYDROTHERM" followed by the subtitle "A Computer Code for Simulation of Two-Phase Ground-Water Flow and Heat Transport in the Temperature Range of 0 to 1200 Degrees Celsius". The text describes the software's capabilities, including handling high fluid pressures and temperatures, and lists several new features in Version 3. A figure on the right shows five cross-sectional plots (A-E) of temperature distribution in a subsurface, with a color scale from 0 to 1000 °C. Below the figure is a "Download" section with a list of links for different versions and source code.

HYDROTHERM

A Computer Code for Simulation of Two-Phase Ground-Water Flow and Heat Transport in the Temperature Range of 0 to 1200 Degrees Celsius

The HYDROTHERM computer program simulates multi-phase ground-water flow and associated thermal energy transport in three dimensions. It can handle high fluid pressures, up to 1×10^9 Pa (10^4 atm), and high temperatures, up to 1,200 °C. This report documents the release of Version 3, which includes various additions, modifications, and corrections that have been made to the original simulator. Major changes to the simulator include: 1) the ability to simulate unconfined ground-water flow, 2) a precipitation-recharge boundary condition, 3) a seepage-surface boundary condition at the land surface, 4) the removal of the limitation that a specified-pressure boundary also have a specified temperature, 5) a new iterative solver for the linear equations based on a generalized minimum-residual method, 6) the ability to use time- or depth-dependent functions for permeability, 7) the conversion of the program code to Fortran 90 to employ dynamic allocation of arrays, and 8) the incorporation of a graphical user interface (GUI) for input and output.

The graphical user interface has been developed for defining a simulation, running the HYDROTHERM simulator interactively, and displaying the results. The combination of the GUI and the HYDROTHERM simulator forms the HYDROTHERM INTERACTIVE (HTI) program. HTI can be used for two-dimensional simulations only. HYDROTHERM originated as a standalone program that reads model specification data from input files, and writes simulation results to output files. The HYDROTHERM INTERACTIVE GUI software integrates HYDROTHERM 3 with a graphical-user-interface preprocessor and postprocessor so that simulations can be setup and run in a visual-interactive environment.

New features in Version 3 of the HYDROTHERM simulator have been verified using four test problems. Three problems come from the published literature and one problem was simulated by another partially saturated flow and thermal transport simulator. The test problems include: transient partially-saturated vertical infiltration, transient one-dimensional horizontal infiltration, two-dimensional steady-state drainage with a seepage surface, and two-dimensional drainage with

Download

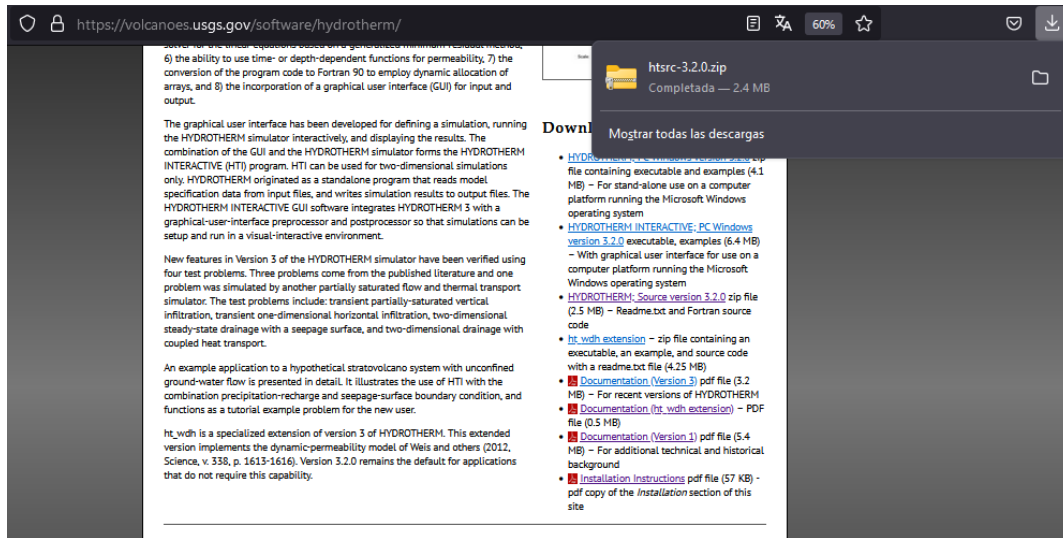
- [HYDROTHERM; PC Windows version 3.2.0](#) zip file containing executable and examples (4.1 MB) – For stand-alone use on a computer platform running the Microsoft Windows operating system
- [HYDROTHERM INTERACTIVE; PC Windows version 3.2.0](#) executable, examples (6.4 MB) – With graphical user interface for use on a computer platform running the Microsoft Windows operating system
- [HYDROTHERM; Source version 3.2.0](#) zip file (2.5 MB) – Readme.txt and Fortran source code
- [ht wdh extension](#) – zip file containing an

Seguidamente nos dirigiremos al apartado de descargas en donde seleccionaremos la versión del software dependiendo del tipo de análisis que tenemos planeado utilizar, ya sea modelado en 2

dimensiones o 3 dimensiones , en nuestro caso y con fines demostrativos de este apartado descargaremos la versión de Linux([HYDROTHERM; Source version 3.2.0.zip](https://volcanoes.usgs.gov/software/hydrotherm/)) la cual tiene la capacidad de realizar análisis tridimensionales.

Figura 35

Descarga de Paquetes de Instalación



Al dirigirnos al apartado de descargas nos encontramos con un archivo comprimido en el cual contendrá ficheros con extensión. f90 que se utilizaran para realizar la instalación del software.

Antes de poder realizar la instalación será necesario tener una idea de que son los archivos. f90, siendo estos una extensión asociada a archivos fortran, este tipo de archivos se codifican y se le aplican estándares de formato. F junto con su versión. Partiendo de ello será necesario la instalación de librerías, software y creación de un instalador como a continuación mostraremos.

Previamente se mostró en el apartado 3.6.1 el proceso de instalación de las librerías y softwares partiendo de ello, procederemos a crear un archivo de instalación basado en arquitectura fortran en el cual se encontrarán los archivos base para crear el instalador de nuestro software Hydrotherm.

Para ello se creará un Makefile utilizando el editor de texto Notepad++ en el cual se escribe una serie de comandos, cuya finalidad será compilar los archivos de instalación de nuestro programa de simulación, como a continuación se muestra.(Muller & Cruz, 2007)

1. #HYDROTHERM

2. OBJ = assemble_nre_csr.o avgprpty.o avgvalue.o balance.o bndyT0.o cl
osef.o converge_criterion.o damper.o daxpy.o ddot.o dealloc_arr.o di
mnum.o dnrn2.o endsummary.o enthrock.o enthtemp.o errrprint.o formeq.
o gdata.o getunits.o gfiles.o gmres_asem_solve.o gmres.o goveqn2.o g
oveqn.o gov_seep.o gov_spp.o hyd_potential.o ictoijk.o ilupc_mod.o i
nit_ht.o init_wr_bc.o init_wr_pmp.o inputph.o interp1.o ldci.o ldiaj
a.o linked_list_mod.o mach_mod.o maxchg.o max_ddv_NR.o modules.o mto
ijk.o parmcalf.o pdata.o permftime.o permfunc.o phasechg.o phreg.o p
hsbndy1.o phsbndy2.o phsbndy3.o phsbnklo.o pickup.o plotb2.o plotexp
l.o plotgnu.o plotidl.o plotxyz.o presboil.o preslith.o press.o prin
tar.o print_control.o printopt.o prptabl1_mod.o prptabl2_mod.o prpta
bl3_mod.o prptabl4_mod.o prpty.o rcomment.o rd.o rdspace.o readarry.
o relperm2.o relperm.o reset.o resid.o rockparm.o satur_w.o scale.o
sinknode.o sink.o sinkwell.o solve.o spline42.o splnT0_mod.o splnws_
mod.o ssor.o steam_mass.o steam_tab_mod.o storativ.o table1.o table2
.o table3.o table4.o tables_mod.o tlookup.o tcalc.o tempdegc.o term
inate_ht.o timestamp.o timestep_criterion.o time_step_ht.o uppercase
.o upstre.o velocity.o wellallo.o wrnew.o wr.o wt_elev.o hydrotherm.
o
3. #F77 = gfortran -fdefault-real-8
4. F77 = gfortran -fdefault-double-8 -fdefault-real-8
5. FFLAGS = -g
6. OFLAGS = -g -O -c
7. PROJECTNAME=hydrotherm
8. \$(PROJECTNAME):
9. @echo; echo GENERATE MOULE FILE ...
10. \$(F77) \$(OFLAGS) mach_mod.f90
11. \$(F77) \$(OFLAGS) modules.f90
12. \$(F77) \$(OFLAGS) assemble_nre_csr.f90
13. \$(F77) \$(OFLAGS) avgprpty.f90
14. \$(F77) \$(OFLAGS) avgvalue.f90
15. \$(F77) \$(OFLAGS) balance.f90
16. \$(F77) \$(OFLAGS) prptabl1_mod.f90
17. \$(F77) \$(OFLAGS) prptabl2_mod.f90
18. \$(F77) \$(OFLAGS) prptabl3_mod.f90
19. \$(F77) \$(OFLAGS) prptabl4_mod.f90
20. \$(F77) \$(OFLAGS) splnT0_mod.f90
21. \$(F77) \$(OFLAGS) splnws_mod.f90
22. \$(F77) \$(OFLAGS) tables_mod.f90
23. \$(F77) \$(OFLAGS) bndyT0.f90
24. \$(F77) \$(OFLAGS) cclosef.f90
25. \$(F77) \$(OFLAGS) converge_criterion.f90
26. \$(F77) \$(OFLAGS) damper.f90
27. \$(F77) \$(OFLAGS) daxpy.f
28. \$(F77) \$(OFLAGS) ddot.f

29. \$(F77) \$(OFLAGS) dealloc_arr.f90
30. \$(F77) \$(OFLAGS) dimnum.f90
31. \$(F77) \$(OFLAGS) dnrn2.f
32. \$(F77) \$(OFLAGS) endsummary.f90
33. \$(F77) \$(OFLAGS) enthrock.f90
34. \$(F77) \$(OFLAGS) steam_tab_mod.f90
35. \$(F77) \$(OFLAGS) enthtemp.f90
36. \$(F77) \$(OFLAGS) errrprint.f90
37. \$(F77) \$(OFLAGS) formeq.f90
38. \$(F77) \$(OFLAGS) ilupc_mod.f90
39. \$(F77) \$(OFLAGS) linked_list_mod.f90
40. \$(F77) \$(OFLAGS) gdata.f90
41. \$(F77) \$(OFLAGS) getunits.f90
42. \$(F77) \$(OFLAGS) gfiles.f90
43. \$(F77) \$(OFLAGS) gmres_asem_solve.f90
44. \$(F77) \$(OFLAGS) gmres.f90
45. \$(F77) \$(OFLAGS) goveqn2.f90
46. \$(F77) \$(OFLAGS) goveqn.f90
47. \$(F77) \$(OFLAGS) gov_seep.f90
48. \$(F77) \$(OFLAGS) gov_spp.f90
49. \$(F77) \$(OFLAGS) hyd_potential.f90
50. \$(F77) \$(OFLAGS) ictoijk.f90
51. \$(F77) \$(OFLAGS) init_ht.f90
52. \$(F77) \$(OFLAGS) init_wr_bc.f90
53. \$(F77) \$(OFLAGS) init_wr_pmp.f90
54. \$(F77) \$(OFLAGS) inputph.f90
55. \$(F77) \$(OFLAGS) interp1.f90
56. \$(F77) \$(OFLAGS) ldci.f90
57. \$(F77) \$(OFLAGS) ldiaja.f90
58. \$(F77) \$(OFLAGS) maxchg.f90
59. \$(F77) \$(OFLAGS) max_ddv_NR.f90
60. \$(F77) \$(OFLAGS) mtoijk.f90
61. \$(F77) \$(OFLAGS) parmcalc.f90
62. \$(F77) \$(OFLAGS) pdata.f90
63. \$(F77) \$(OFLAGS) permftime.f90
64. \$(F77) \$(OFLAGS) permfunc.f90
65. \$(F77) \$(OFLAGS) phasechg.f90
66. \$(F77) \$(OFLAGS) phreg.f90
67. \$(F77) \$(OFLAGS) phsbndy1.f90
68. \$(F77) \$(OFLAGS) phsbndy2.f90
69. \$(F77) \$(OFLAGS) phsbndy3.f90
70. \$(F77) \$(OFLAGS) phsbnklo.f90
71. \$(F77) \$(OFLAGS) pickup.f90
72. \$(F77) \$(OFLAGS) plotb2.f90
73. \$(F77) \$(OFLAGS) plotexpl.f90
74. \$(F77) \$(OFLAGS) plotgnu.f90

75. \$(F77) \$(OFLAGS) plotidl.f90
76. \$(F77) \$(OFLAGS) plotxyz.f90
77. \$(F77) \$(OFLAGS) presboil.f90
78. \$(F77) \$(OFLAGS) preslith.f90
79. \$(F77) \$(OFLAGS) press.f90
80. \$(F77) \$(OFLAGS) printar.f90
81. \$(F77) \$(OFLAGS) print_control.f90
82. \$(F77) \$(OFLAGS) printopt.f90
83. \$(F77) \$(OFLAGS) prpty.f90
84. \$(F77) \$(OFLAGS) rcomment.f90
85. \$(F77) \$(OFLAGS) rd.f90
86. \$(F77) \$(OFLAGS) rdspace.f90
87. \$(F77) \$(OFLAGS) readarry.f90
88. \$(F77) \$(OFLAGS) relperm2.f90
89. \$(F77) \$(OFLAGS) relperm.f90
90. \$(F77) \$(OFLAGS) reset.f90
91. \$(F77) \$(OFLAGS) resid.f90
92. \$(F77) \$(OFLAGS) rockparm.f90
93. \$(F77) \$(OFLAGS) satur_w.f90
94. \$(F77) \$(OFLAGS) scale.f90
95. \$(F77) \$(OFLAGS) sink.f90
96. \$(F77) \$(OFLAGS) sinknode.f90
97. \$(F77) \$(OFLAGS) sinkwell.f90
98. \$(F77) \$(OFLAGS) solve.f90
99. \$(F77) \$(OFLAGS) spline42.f90
100. \$(F77) \$(OFLAGS) ssor.f90
101. \$(F77) \$(OFLAGS) steam_mass.f90
102. \$(F77) \$(OFLAGS) storativ.f90
103. \$(F77) \$(OFLAGS) table1.f90
104. \$(F77) \$(OFLAGS) table2.f90
105. \$(F77) \$(OFLAGS) table3.f90
106. \$(F77) \$(OFLAGS) table4.f90
107. \$(F77) \$(OFLAGS) tbllookup.f90
108. \$(F77) \$(OFLAGS) tcalc.f90
109. \$(F77) \$(OFLAGS) tempdegc.f90
110. \$(F77) \$(OFLAGS) terminate_ht.f90
111. \$(F77) \$(OFLAGS) timestamp.f90
112. \$(F77) \$(OFLAGS) timestep_criterion.f90
113. \$(F77) \$(OFLAGS) time_step_ht.f90
114. \$(F77) \$(OFLAGS) uppercase.f90
115. \$(F77) \$(OFLAGS) upstre.f90
116. \$(F77) \$(OFLAGS) velocity.f90
117. \$(F77) \$(OFLAGS) wellallo.f90
118. \$(F77) \$(OFLAGS) wr.f90
119. \$(F77) \$(OFLAGS) wrnew.f90
120. \$(F77) \$(OFLAGS) wt_elev.f90

```

121. $(F77) $(OFLAGS) hydrotherm.f90
122. @echo; echo EXECUTABLE ...
123. $(F77) $(FFLAGS) $(OBJ) -o $@
124. @echo; echo FINISHED ...FOR CLEANING USE ...make clean... OPTION
125. @rm $(OBJ) *.mod
126. clean:
127. @rm $(PROJECTNAME)

```

Teniendo el archivo de instalación guardado en la carpeta donde se encuentran los archivos .f90 se procede a navegar por la terminal hasta la carpeta en la cual están ubicados, esto lo podemos hacer utilizando las líneas (ls) para ver los archivos en la ubicación que estamos y (cd) para entrar en las carpetas, así como se muestran en la siguiente imagen.

Figura 36

Ficheros de Instalación de Software

```

zometa@DESKTOP-SFPTBT1: ~/Desktop/htsrc-3.2.0
File Actions Edit View Help
(zometa@DESKTOP-SFPTBT1)~$ ls
Desktop Documents Downloads Music Pictures Public Templates Videos
(zometa@DESKTOP-SFPTBT1)~$ cd Desktop
(zometa@DESKTOP-SFPTBT1)~/Desktop$ ls
htsrc-3.2.0 python TESIS
(zometa@DESKTOP-SFPTBT1)~/Desktop$ cd htsrc-3.2.0/
(zometa@DESKTOP-SFPTBT1)~/Desktop/htsrc-3.2.0$ ls
assemble_nre_csr.f90  formeq.f90          input.f90           phsbdny1.f90       prptabl2_mod.f90   sinknode.f90       tempdegc.f90
avgprpty.f90         gdata.f90           interpl.f90        phsbdny2.f90       prptabl3_mod.f90   sinkwell.f90       terminate_ht.f90
avgvalue.f90         getunits.f90        ldcl.f90           phsbdny3.f90       prptabl4_mod.f90   solve.f90          timestamp.f90
balance.f90          gfiles.f90          ldiaja.f90         phsbnklo.f90       prpty.f90          spline42.f90       timestep_criterion.f90
bndyT0.f90           gmres_asm_solve.f90 linked_list_mod.f90 pickup.f90         rcomment.f90      splnT0_mod.f90    time_step_ht.f90
closef.f90           gmres.f90           mach_mod.f90       plotb2.f90         rd.f90             splnws_mod.f90    uppercase.f90
converge_criterion.f90 goveqn2.f90         Makefile           plotexpl.f90       rdspace.f90        ssor.f90           upstre.f90
damper.f90           goveqn.f90          maxchg.f90         plotgnu.f90        readarry.f90       steam_mass.f90     velocity.f90
daxpy.f              gov_spp.f90         max_ddv_NR.f90    plotidl.f90        _readme.txt        steam_tab_mod.f90 wellallo.f90
ddot.f              modules.f90         mtoiijk.f90       presboil.f90       relperm2.f90       storativ.f90       wr.f90
dealloc_arr.f90     hyd_potential.f90  parmcalc.f90      press.f90          reset.f90           table1.f90         wrnew.f90
dimnum.f90          hydrotherm.f90     pdata.f90         printar.f90        resid.f90          table2.f90         wt_elev.f90
dnrm2.f             ilupc_mod.f90      permfunc.f90      print_control.f90  satur_w.f90        table3.f90         tables_mod.f90
endsummary.f90     init_ht.f90         permtime.f90      printopt.f90       scale.f90          table4.f90         tblookup.f90
enthrock.f90       init_wr_bc.f90     phreg.f90         prptabl1_mod.f90  sink.f90           tcalc.f90
errprint.f90       init_wr_pmp.f90

```

Posteriormente estando en la carpeta se mandará a llamar al archivo Makefile que creamos desde la terminal escribiendo la palabra make mostrando a continuación la generación del de archivos para crear el instalador este proceso puede tardar dependiendo del rendimiento del ordenador en el cual se está instalando.

Figura 37

Compilación para Generar Launcher del Software

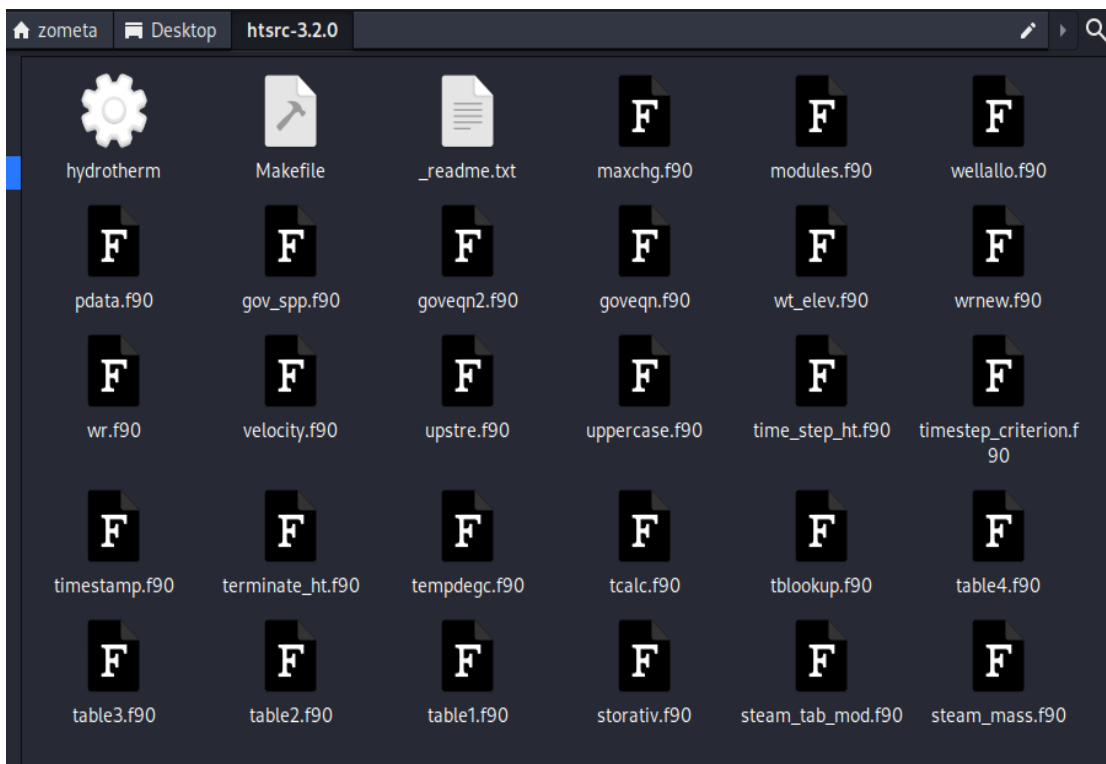
```
(zometa@DESKTOP-SFPTBT1) [~/Desktop/htsrc-3.2.0]
$ make

GENERATE MOULE FILE ...
gfortran -fdefault-double-8 -fdefault-real-8 -g -O -c mach_mod.f90
gfortran -fdefault-double-8 -fdefault-real-8 -g -O -c modules.f90
gfortran -fdefault-double-8 -fdefault-real-8 -g -O -c assemble_nre_csr.f90
gfortran -fdefault-double-8 -fdefault-real-8 -g -O -c avgprpty.f90
gfortran -fdefault-double-8 -fdefault-real-8 -g -O -c avgvalue.f90
gfortran -fdefault-double-8 -fdefault-real-8 -g -O -c balance.f90
gfortran -fdefault-double-8 -fdefault-real-8 -g -O -c prptabl1_mod.f90
```

Al final la instalación nos dirigimos a la carpeta de los archivos y verificamos si está el instalador del software resultante de la compilación de los archivos por medio del Makefile.

Figura 38

Finalización de Lanzador de Software



Para poder utilizar el programa bastara con escribir ./hydrotherm en la terminal de Linux y posteriormente solicitara ingresar el nombre del archivo del objeto de estudio que queremos analizar cuya extensión del archivo es .in , posteriormente generara un total de 2 a 8 archivos de salida con los cuales se necesitara de un conjunto de códigos en lenguaje Python para lograr ver de forma gráfica los resultados .con fines de demostración se simulara un modelo básico el cual se anexa al final del documento.

Figura 39

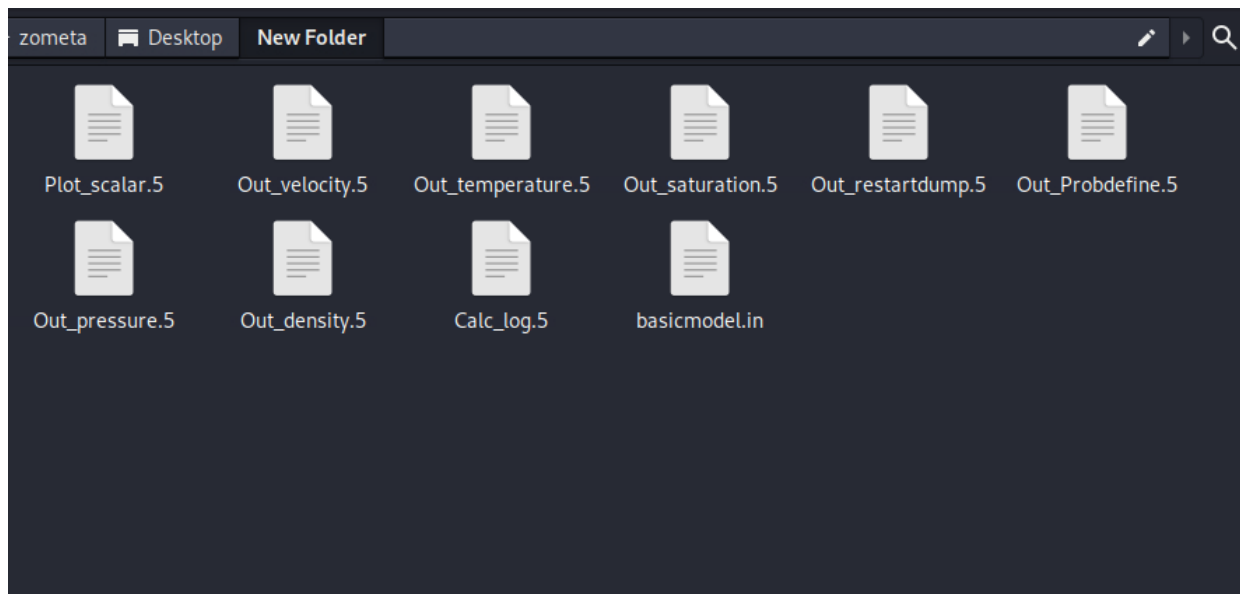
Entrada de Archivos de Modelo

```
(zometa@DESKTOP-SFPTBT1) - [~/Desktop/htsrc-3.2.0]
$ ./hydrotherm
Enter name of input data file
basicmodel.in
```

Luego de procesar y simular los datos el software generara un conjunto de archivos de salida en la carpeta en la cual se ubica nuestro modelo de estudio como a continuación se muestra.

Figura 40

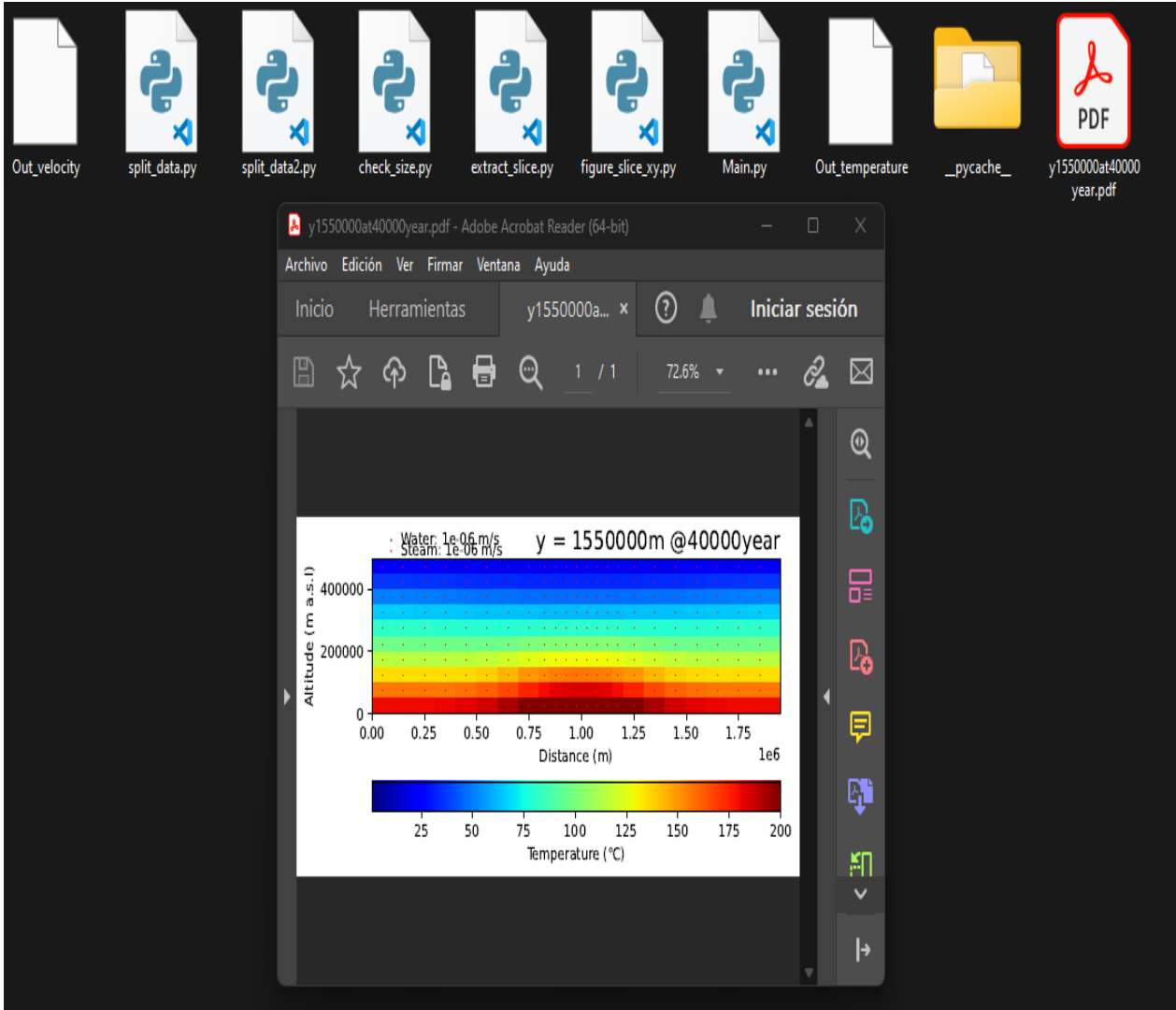
Archivos de Salida Modelo



Como siguiente paso se creará un archivo Python el cual será nuestro MAIN desde el cual se llamarán las funciones necesarias para mostrar gráficamente el resultado asi como también los archivos que queremos analizar.

Figura 43

Respuesta Grafica Resultante de Modelo Ingresado



CAPÍTULO 4. PRODUCCIÓN GEOTÉRMICA EN YACIMIENTO AHUACHAPÁN

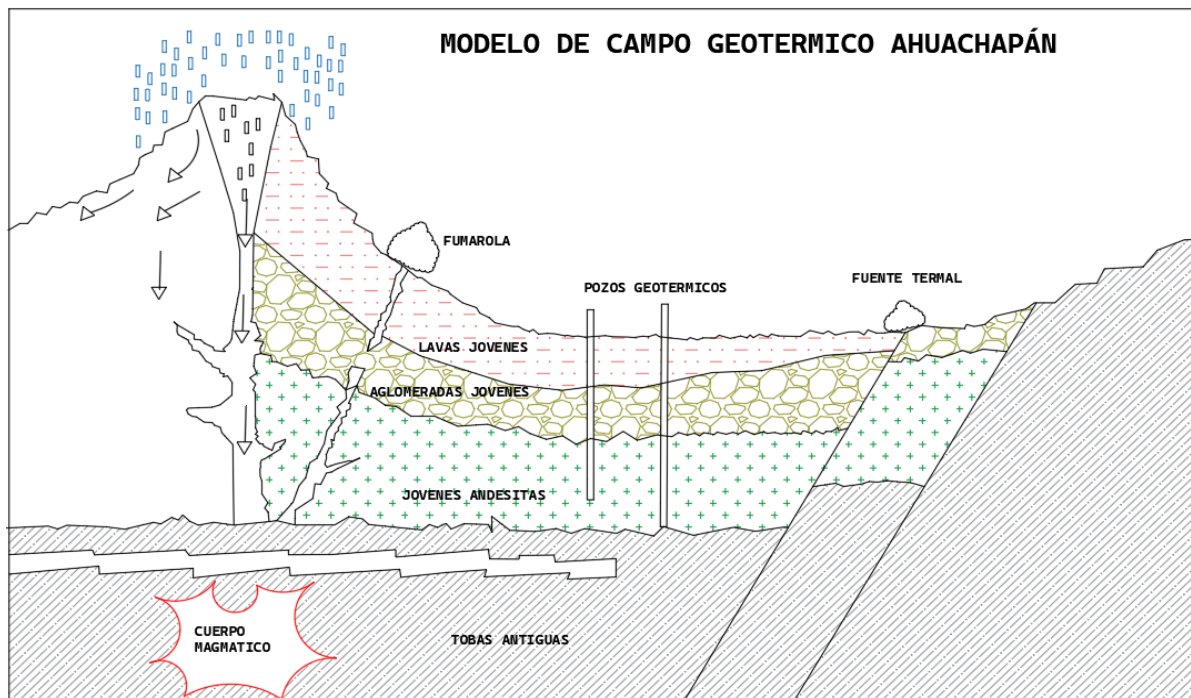
En el presente capítulo se procederá a describir los aspectos básicos del sistema geotérmico de Ahuachapán detallando historia, características del sistema geotérmico (fuente de calor, reservorio y capa sello), ubicación de pozos y descripción del funcionamiento en nuestra zona de estudio.

4.1 Sus inicios.

Las investigaciones geotérmicas dieron inicio en el año de 1953. La primera perforación exploratoria se realizó en el campo geotermal de agua chuca en 1956, previamente las investigaciones preliminares indicaron que los campos geotérmicos en la región de Ahuachapán fueron una prueba clara de la intensa actividad geotérmica en el subsuelo, por lo cual dieron inicio las investigaciones y limitaciones a los estudios correspondientes en esta región. Esta región cuenta con un área relativamente limitada, presentando una gran cantidad de exposiciones como fuentes termales, agua hirviendo, sopladores de vapor húmedo y seco, se caracteriza por una fuerte actividad tectónica evidenciada por su actividad sísmica, favoreciendo los procesos magmáticos y la profundidad para la formación de cuerpos de agua caliente o vapor. (Moreira et al., 1980)

Figura 44

Modelo de Campo Geotérmico de Ahuachapán

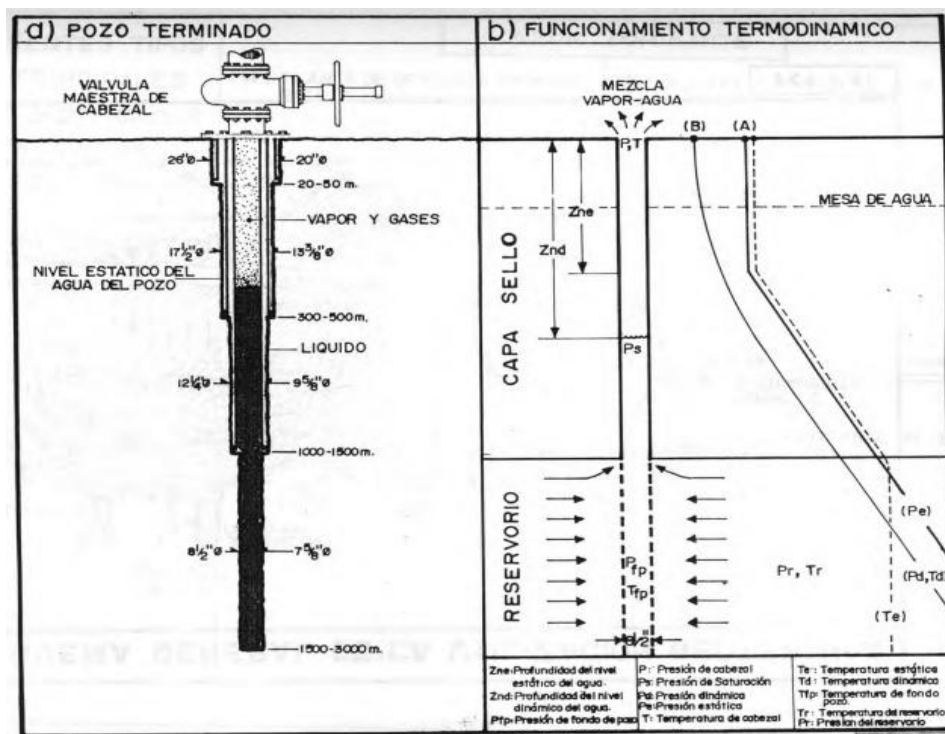


En el periodo comprendido entre los años de 1956 a 1959 se realizó la perforación de once agujeros con profundidades de 32 a 373 metros, distribuidos de la siguiente manera en los sectores termales de agua chuca se perforaron 3 pozos, playón de Ahuachapán 4 pozos y playón de salitre 3 pozos, las perforaciones en las 3 áreas mencionadas tuvieron resultados positivos iniciando los conocimientos endógenos del país.

Un pozo explorador nombrado AH-1 fue completado en el campo de Ahuachapán en el año de 1968, generando aproximadamente 8 MW y expeliendo chorros de vapor a 240 grados centígrados, elevándose la masa compacta de las descargas aproximadamente a 40 metros de altura. culminada la primera fase de investigación en 1968 una misión de evaluación por parte de (NU/PNUD) recomendó que se diera inicio a una segunda fase del proyecto siempre concentrada en el área de Ahuachapán, en la cual se realizará la perforación de 5 pozos, ensayo de producción, solución del problema de disposición de aguas térmicas utilizadas, diseño preliminar y estudio de factibilidad en la primera estación de energía de 20-30 MW.

Figura 45

Bosquejo de Pozo Geotérmico



Nota: Esquemático de estructura de pozo extractor (Moreira et al., 1980)

En base al estudio de factibilidad realizado se demostró que una planta de energía geotérmica de 30 MW en Ahuachapán sería competitiva con plantas convencionales de energía térmica.

En base al estudio realizado la comisión la comisión Ejecutiva Hidroeléctrica del Río Lempa, decidió en Mayo 18 de 1971 la construcción de la primera planta geotérmica, su operación comercial inició en septiembre de 1975 con una unidad de 30 MW/h produciendo 23 MW/h la cual utiliza a 5.6 bar.

Al año siguiente fue adicionada otra unidad de idénticas características con la única diferencia que esta unidad produce 24 MW/h, y en 1980 se adiciona la tercera unidad de 35 MW que se diferencia de las 2 primeras porque produce 35 MW/h y además de vapor a 5.6, utiliza vapor de 1.6 bar producido en los vaporizadores con agua separada de los pozos productores que inyectan vapor a las 3 unidades de generación que producen alrededor de 82 (MW/h) por día, donde 77 son inyectados a la red. ((Edgar Santoyo & Rosa Maria, 2010; Lucha & Moran, 2003; Mendoza et al., 2023; Moreira et al., 1980; OLANDE, 1978)

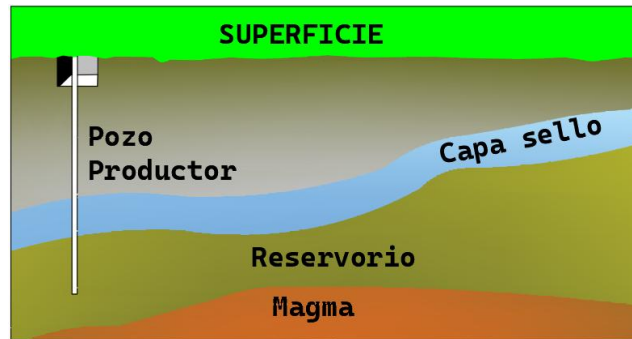
4.2 Características del sistema geotérmico

La geotermia consiste en el estudio y utilización de la energía calorífica, por medio de mecanismos de control, ya sea por rocas o por transporte de fluidos, se desplaza desde el interior hasta el área más superficial de la corteza, que al almacenarse en las rocas y acuíferos localizados a profundidades susceptibles forman los reservorios geotérmicos representando el medio que almacena el vapor.

Los campos geotérmicos, se identifican, con elementos principales como fuente de calor, reservorio, recarga y capa sello, a continuación, procederemos describir brevemente, las características de estos:

Figura 46

Composición de Campo Geotérmico



Nota: Esquemático de estructura interna del planeta (José Luis Chavarría Guerra, 2001; Por et al., 2013)

4.2.1 Fuente de calor:

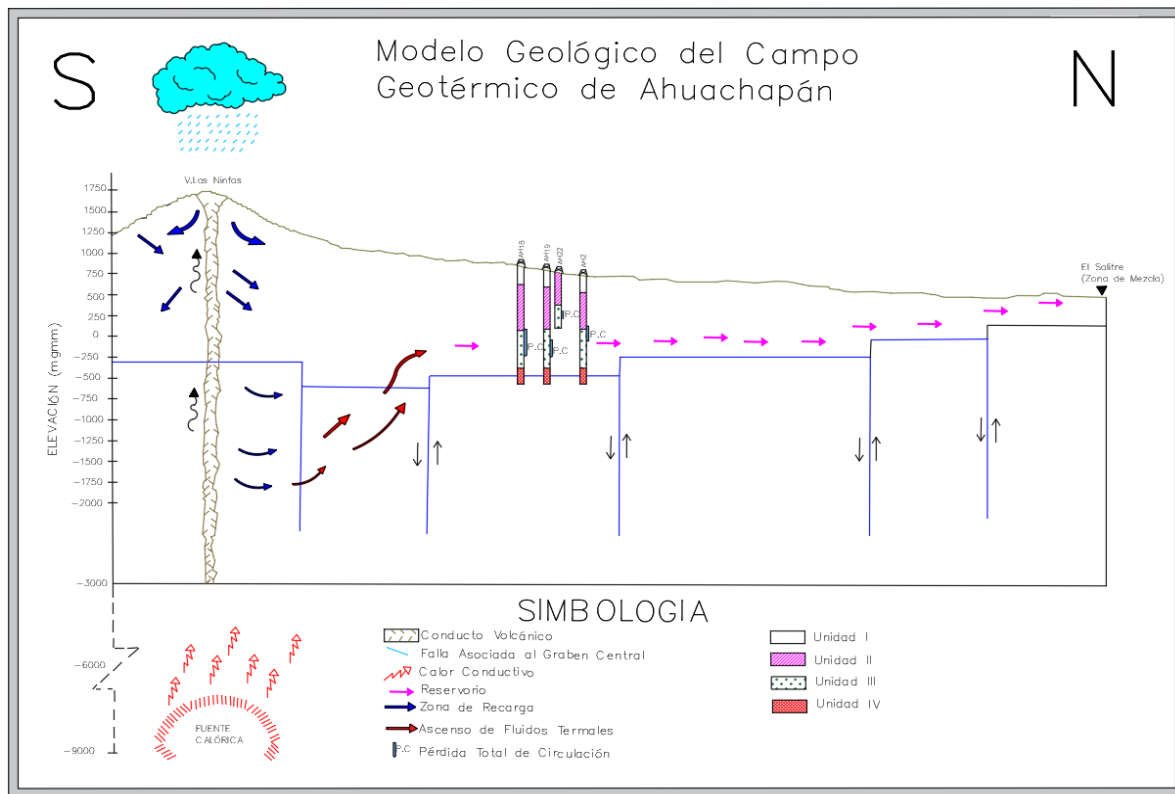
Dentro de un sistema geotérmico, la producción a través de intrusiones magmáticas cerca de la superficie de la corteza terrestre (5-15 kms) cuya temperatura puede oscilar entre los 600 °C y 900 °C, hacen posible la transferencia de calor necesaria para la existencia de características de alta presión y temperatura en el reservorio.

Las intrusiones o cámaras magmáticas son fragmentos de roca fundida del manto o magma que se introducen a la corteza debido a la fracturación que producen las zonas de subducción de placas, y dorsales medio-oceánicas de los cuales algunos alcanzan la superficie para formar volcanes entre otros, quedan formando las intrusiones magmáticas, que transfieren su calor hasta el reservorio, la magnitud del flujo de calor presenta un aumento en cuanto más reciente sea la actividad eruptiva o movimiento tectónico que dio origen a la intrusión, debido a esto es importante identificar el fenómeno del vulcanismo reciente.

En el campo Geotérmico de Ahuachapán, la fuente de calor del sistema geotérmico se relaciona principalmente con una cámara magmática, que alimenta al complejo volcánico Laguna Las Ninfas, Hoyo de Cuajusto y Laguna Verde, localizado aproximadamente 3 Kilómetros al sureste del campo en explotación e inmediatamente al noreste de la Caldera de Concepción de Ataco. El calor producido por esta cámara, que se encuentra a una profundidad aproximada de 9 Kilómetros, se agrega al calor residual asociado con la actividad explosiva que produjo la Caldera de Concepción de Ataco.(Lucha & Moran, 2003; Roger Isaacc Castellón Rios & Carlos Eduardo Garcia Antezana, 2018)

Figura 47

Modelo Geológico del Campo Geotérmico de Ahuachapán



Nota: Esquemático de modelo geológico del campo geotérmico de la central geotérmica de Ahuachapán (Lucha & Moran, 2003; Roger Isaacc Castellón Rios & Carlos Eduardo Garcia Antezana, 2018)

4.2.2 Reservorio:

El reservorio geotérmico generalmente está conformado por un volumen de rocas calientes y permeables, las cuales permiten el almacenamiento y circulación de los fluidos geotérmicos (agua y/o gases) a alta temperatura y presión. Debe estar ubicado dentro de un sistema hidrológico que permita la recarga hidráulica del área de explotación.

Este estrato es la parte más importante debido a que es el encargado de almacenar el fluido de trabajo (vapor) que posteriormente es utilizado para la producción de energía eléctrica. Para efectos de la generación de energía eléctrica, los fluidos dentro de un reservorio geotérmico deben contener una temperatura mayor de 200 °C y una presión hidrostática, medida a nivel del mar, del orden de los 30-40 atm.

En el estudio del reservorio se requiere del conocimiento del marco geológico general y en particular, el de los espesores, profundidades y permeabilidad de las rocas que se encuentran por debajo de la cubierta superficial. Para la exploración geotérmica de los mayores inconvenientes que se presentan es la delimitación del reservorio, debido a que en la superficie existe de manera recurrente una cubierta de roca impidiendo el estudio de los substratos que se encuentran más profundos.

Es importante identificar las áreas de mayor permeabilidad primaria, secundaria y del modelo de distribución del fracturamiento tectónico. En la mayoría de los acontecimientos la permeabilidad es de tipo secundario ya que el reservorio se encuentra ubicado sobre rocas volcánicas, que tienen baja porosidad primaria, por lo tanto, si el reservorio geotérmico se encuentra sobre rocas sedimentarias, la permeabilidad primaria suele ser escasa y solo es posible que lleguen a ser productores de fluidos geotérmicos gracias a la incorporación de la permeabilidad secundaria de origen tectónico. En el caso de la actividad tectónica activa contribuirá a mantener abiertas las fracturas o reactivar fracturas previas que podrían estar selladas por alteración hidrotermal.

En el Campo Geotérmico de Ahuachapán, el reservorio corresponde a un nivel propilitización, donde se presentan diferentes tipos de minerales, relacionado con las andesitas de Ahuachapán y en forma parcial con los aglomerados antiguos.

La construcción del reservorio se ha realizado en forma de una capa subhorizontal, con un espesor estimado entre 300 y 400 metros y una elevación del techo de 300 a 400 msnm en la parte central del campo geotérmico, bajando a 100 y 0 msnm en dirección al este y sur, se calcula que su área es de 10 Km².

Recarga:

Las pérdidas de fluidos geotérmicos ocasionados en las diferentes manifestaciones o emanaciones de la naturaleza en forma de fumarolas, géiseres, etc. o de manera artificial mediante la perforación de pozos, pueden ser reemplazadas por una fuente de alimentación o recarga, manteniendo el balance hidrológico del sistema, generalmente esta fuente de alimentación es el agua lluvia, que se infiltra en el campo como en zonas aledañas al mismo, a través de fallas geológicas, chimeneas de volcanes y cualquier otro tipo de permeabilidad que exista dentro del área.

El agua lluvia infiltrada circula por circuitos hidrológicos complejos, alcanzando grandes profundidades que le permiten adquirir temperaturas altas, estas al ser transportadas hacia y a través del reservorio, es almacenada, formando los reservorios geotérmicos, en los cuales circulan de forma horizontal, a través de pasos preferenciales de alta permeabilidad generando celdas convectivas que uniformizan las temperaturas y las condiciones termodinámicas de los fluidos geotérmicos del reservorio.

En el campo geotérmico de Ahuachapán la distribución y circulación de los fluidos hidrotermales ésta controlado por el horizonte pro politizado y por el patrón de fallas y fracturas que existen en el campo, principalmente por el sistema neotectónico noroeste – sureste, que es el que permite el movimiento preferencial de los fluidos.

Capa sello:

Es el estrato más superficial del sistema, conformado por formaciones prácticamente impermeables, que actúan herméticamente impidiendo el escape, hacia la superficie, tanto del calor como de los fluidos geotérmicos por debajo de ella.

El escape de fluidos hacia la superficie existe en lugares donde esta formación se encuentra fracturada, dando lugar a la formación de manifestaciones hidrotermales (manantiales de agua caliente, suelos alterados, fumarolas, etc.) que representan las primeras identificaciones de áreas geotérmicas. Sin embargo, pueden existir manifestaciones o emanaciones calientes que no tienen relación con fluidos de alta entalpía.

Para el Campo Geotérmico de Ahuachapán, la capa sello corresponde a la unidad denominada aglomerados jóvenes (YA), que presenta una fuerte alteración hidrotermal, que conduce a la formación de filosilicatos, los cuales pertenecen al grupo de las cloritas (facies filítica y filítica – propilítica). La cual forma una barrera de permeabilidad entre el acuífero saturado regional y salino o reservorio

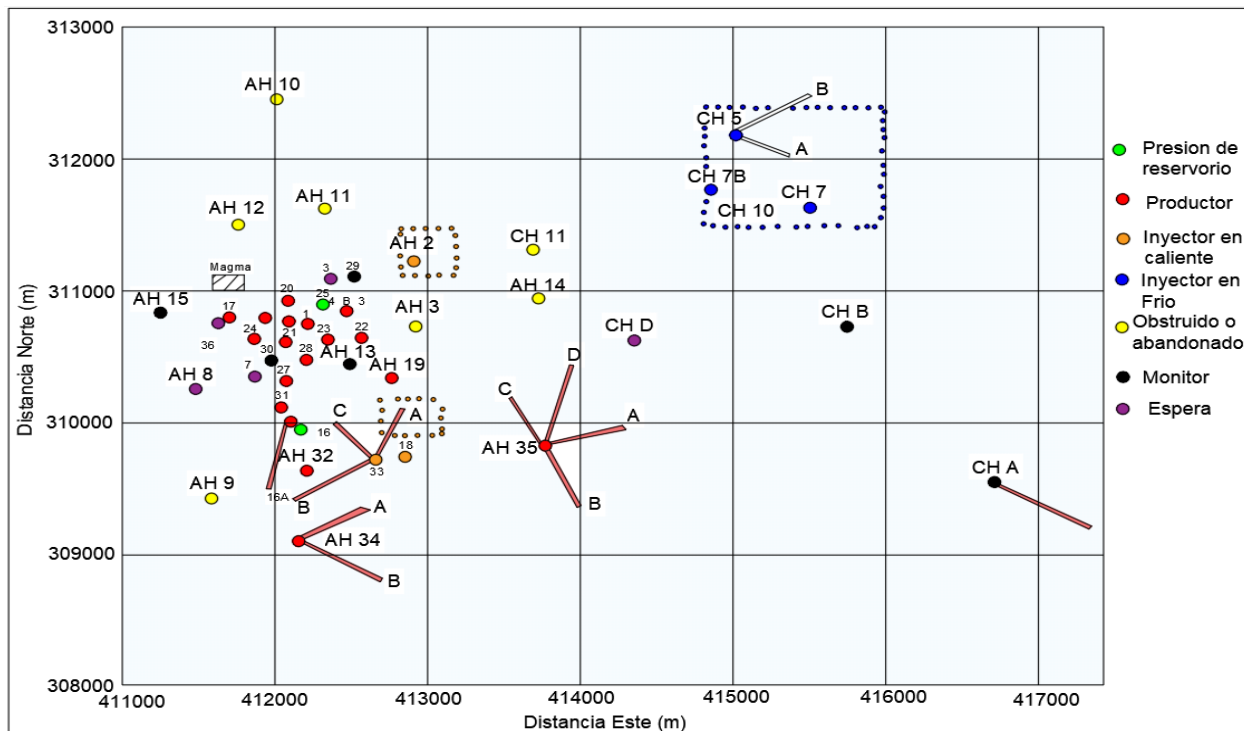
4.3 Ubicación de los pozos geotérmicos:

El área en la que se encuentran los pozos productores es de aproximadamente 2.5 Km², con una temperatura del reservorio líquido de 200 °C a 250 °C, fracción de vapor del 0.13-1.0, concentración inicial de 4000-1000 ppm, gases no condensables con un porcentaje de 0.2% a 1.4% y una entalpía de 1050 KJ/Kg.

Actualmente se han perforado 56 pozos, con profundidades entre los 600 y 2750 metros, de los cuales, 23 son pozos productores, 9 reinyectores, 17 de monitoreo y 5 en observación. (LUCHA & MORAN, 2003)

Figura 48

Distribución de Pozos Geotérmicos Central Geotérmica Ahuachapán



Nota: Distribución geográfica de pozos geotérmicos inyectoros, productores, monitoreos ubicados en campo geotérmico de Ahuachapán. (LUCHA & MORAN, 2003)

En la siguiente tabla se presentan datos de los pozos, en el campo geotérmico de Ahuachapán:

Tabla 40

Valores de producción de pozos geotérmicos

Pozo	Agua (Kg/s)	vapor (Kg/s)	total (Kg/s) 1	potencia (MWe)	eficiencia (%)
AH-17	0	16.4	16.4	6.6	100
AH-6	3.51	12.27	15.78	5.0	72.5
AH-26	11.1	8.30	19.90	3.6	45.0
AH-22	11.95	6.07	18.02	2.8	37.5
AH-27	43.55	14.6	58.15	7.0	30.0
AH-23	27.43	7.76	35.39	3.9	27.5
AH-20	49.18	12.07	61.25	6.2	25.0
AH-21	73.15	12.90	86.05	7.2	20.7
AH-24	30.54	5.20	35.74	2.9	20.5
AH-19	40.36	6.44	46.80	3.7	19.7
AH-31	68.40	10.70	79.1	6.1	19.5
AH-28	50.40	7.72	58.12	4.5	19.2
AH-32	60.00	13.10	73.10	5.3	19.0
AH-7	34.47	5.12	39.59	3.0	19.0
AH-1	49.59	5.61	55.20	3.5	16.3

4.4 Ubicación y origen

El reservorio del campo geotérmico se encuentra ubicado a 103 km al occidente de la ciudad capital, en el sector norte de la cordillera de Apaneca conocido como cantón santa rosa acacalco y 18 km al este del río paz, municipio y departamento de Ahuachapán. (LaGEO, 1999a; LaGeo, 2009)

La construcción del reservorio se ha hecho en forma de una capa subhorizontal, con un espesor estimado entre 300 a 400 mts y una elevación promedio del campo geotérmico que oscila entre los 700 a 900 msnm y sus coordenadas geográficas aproximadas son: 3°55' al N y 89°49" al O. Al costado Sur de la zona, se encuentran cumbres volcánicas que alcanzan alturas de 1,500 hasta 2,000 metros sobre el nivel del mar, mientras que la parte central está representada por llanuras que inclinan suavemente hacia el Norte desde unos 800 metros, hasta unos 400 metros sobre el nivel del mar y pertenecen a una cordillera volcánica cuaternaria (el grupo de Laguna Verde).

Figura 49

Planta Geotérmica de Ahuachapán



NOTA: Vista aérea de la planta geotermica de Ahuachapán (LaGEO, 1999a)

4.5 Descripción del funcionamiento de la planta geotérmica de Ahuachapán.

Por medio de pozos geotérmicos perforados entre profundidades de 1,000 y 3,000 metros que sirven para canalizar el fluido geotérmico desde el reservorio hasta la superficie compuestos por una parte externa localizada en la superficie por un conjunto de válvulas con el propósito de controlar en forma segura la extracción del fluido y otra interna ubicada en el subsuelo elaborada de acero y diferentes medidas de diámetro ancladas en la formación y revestidas con cemento de alta resistencia, se extrae el fluido bifásico (agua-vapor) provenientes del subsuelo a una presión de 5 bares y con una temperatura de 150 grados. (LaGEO, 1999b)

A medida que el fluido geotérmico asciende por el pozo presenta una disminución, en donde debido a esta disminución parte del agua se evapora, obteniendo en la parte superficial del pozo una mezcla de agua y vapor. A la salida del pozo se encuentra un equipo interconectado denominado separador ciclónico.

El separador ciclónico se encarga de separar la mezcla bifásica (agua-vapor), que entra de forma tangencial y por el efecto centrífugo, el vapor asciende e ingresa al tubo central por la parte superior y luego sale por la base hacia la línea de vapor a una temperatura de 152 °C. Por un tanque nivelador, hacia la maleta de desechos de aguas residuales, avanzando hacia un silenciador de torres gemelas tipo vertical, diseñado para reducir el ruido producido por la descarga a la atmósfera

El fluido ingresa de forma tangencial permitiendo que la fase líquida se adhiera a las paredes por efecto de la fuerza centrífuga y baje por efecto gravitatorio hacia un conducto vertedor. El vapor al ser menos denso que el agua asciende por la parte superior del cilindro hacia la atmósfera, en donde parte del agua se evapora por efecto de una baja considerable de presión, al ponerse en contacto con la atmósfera (efecto flasheo).

El vapor emana de los separadores con un porcentaje de 0.1% de humedad y es transportado a través de tuberías hasta el colector principal de vapor (existe un colector para cada unidad generadora instalada). Estos colectores principales de vapor también están interconectados a un silenciador de tipo vertical, por donde se mandan al ambiente excedentes en el caudal de vapor, manteniendo así una presión constante en ellos.

El vapor dentro de los colectores principales pasa a un segundo separador de humedad, encargado de separar los remanentes de agua que pueda llevar el vapor, de donde sale con 0.085% de humedad y siempre mezclado con los gases no condensables (96% CO₂; 4% SH₂).

Figura 50

Tuberías de Transporte Vapor -Agua



NOTA: Vista aérea de distribución de tuberías. (LaGEO, 1999a)

Este vapor es transportado a la unidad generadora instalada en donde ambas presiones de vapor impulsan los álabes de las turbinas de doble entrada que giran alrededor de las 3,600 revoluciones por minuto, haciendo girar el rotor que está acoplado mecánicamente al rotor del generador eléctrico, produciendo en este punto la energía eléctrica.

Figura 51

Vista Lateral de Alavés de Turbina



Nota: Alavés de turbina, la cual se acopla al generador (LaGEO, 1999a)

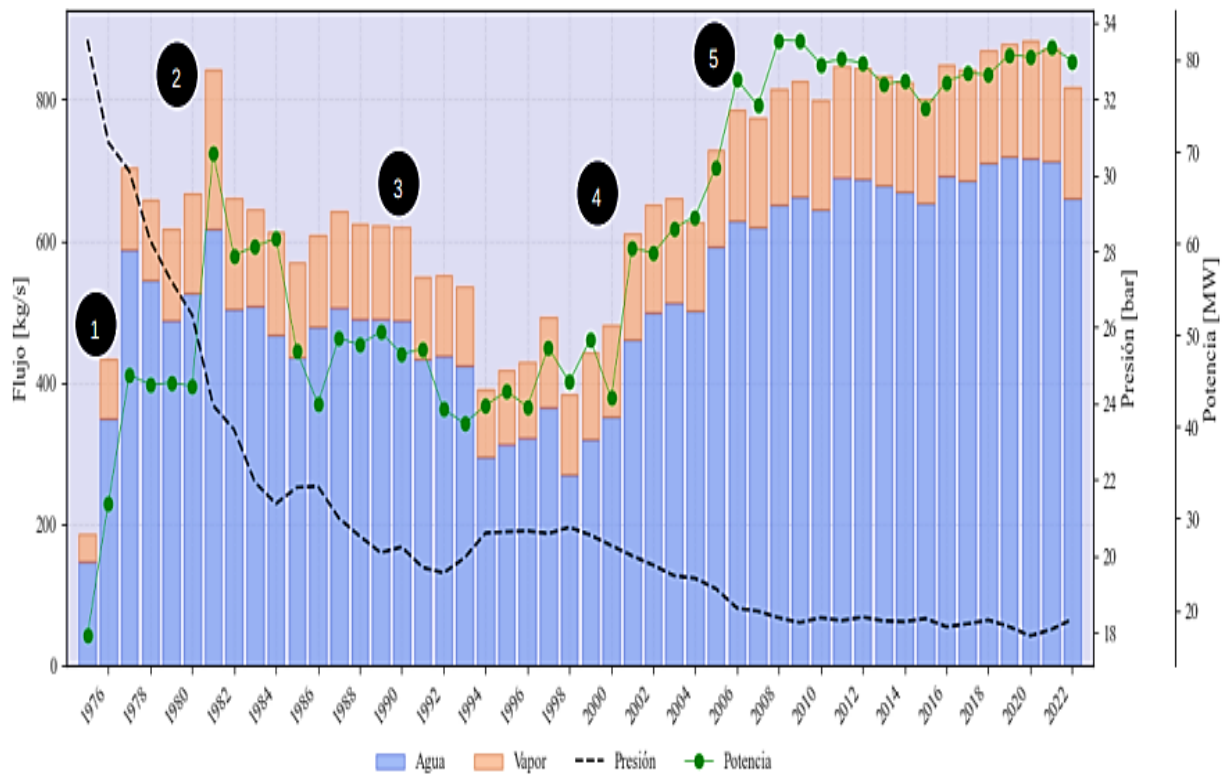
La energía eléctrica producida que sale del generador eléctrico es transportada hacia un transformador, donde 13,800 voltios son convertidos a 115,000 voltios, ampliándose a la potencia del sistema eléctrico nacional para ser trasladados a las subestaciones de energía eléctrica siendo proporcionada a la red nacional.

El vapor geotérmico después de haber cumplido con la función de mover la turbina pasa a un condensador donde es convertido nuevamente en agua por medio de unos cilindros internos que inyectan agua para que el vapor sea condensado, ya el vapor convertido en agua es trasladado a las torres de enfriamiento para bajar la temperatura de este, una parte del agua es utilizada para el sistema de enfriamiento de equipos de la central y el resto es inyectada al subsuelo.

El agua geotérmica derivada del separador ciclónico es conducida a una planta de ciclo binario, en esta planta se aprovecha la alta temperatura del agua geotérmica antes de ser reinyectada para calentar y evaporar un fluido orgánico denominado isopentano el cual logra su punto de ebullición a una temperatura menor a las del agua en condiciones normales ya convertido en vapor este se utiliza para impulsar una turbina y generar energía eléctrica. En la siguiente gráfica se hace una comparación acerca de la extracción y producción de energía, desde su inicio de operación:

Figura 52

Grafica Anual de Producción Eléctrica de la Central Geotérmica de Ahuachapán.



Nota: Producción anual de la central geotérmica de Ahuachapán, basado en porcentaje de extracción de agua, vapor y la presión, para el 2020 se estimó una producción de 33 MW. (Roberto Enrique Renderos & LaGeo, 2023)

Como datos importantes que podemos mencionar, partir de los resultados mostrados en la gráfica, son:

- En 1981 con la entrada en operación de la tercera unidad se logra obtener una potencia de 80 MW.
- En 1991 la energía producida fue de 400 GWh. Así mismo se cierran pozos de baja calidad y se conectan pozos de mayor entalpía.
- En la década de los 90's inicia el período de recuperación. Proyecto de estabilización 1995-1999 y se perforan pozos en el sector Sur.
- 2000-2008: proyecto optimización. Reinyección total (2004) se alcanza una producción de 600 GWh con una extracción de 800 kg/s (2006)
- Actualmente la producción es de 650 GWh al año.

CAPÍTULO 5. MODELADO DEL RESERVORIO

5.1 Antecedentes

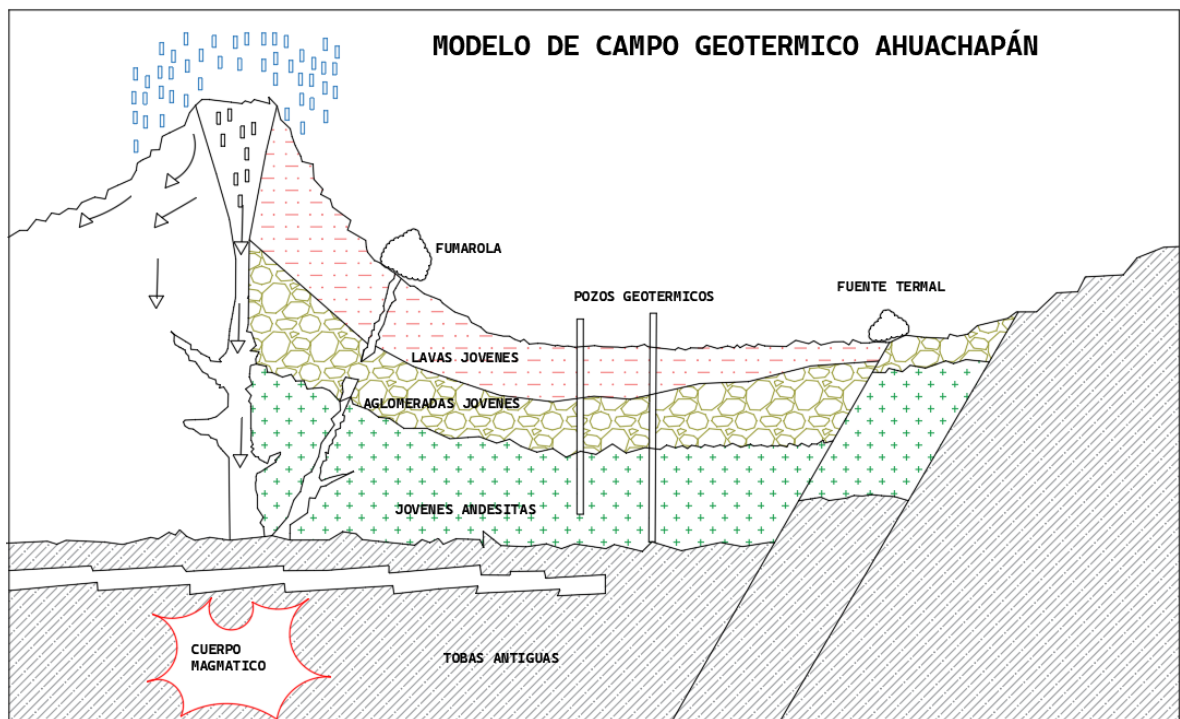
Los primeros modelos conceptuales del reservorio geotérmico de Ahuachapán se propusieron en el año de 1976 y 1982 en donde se utilizaron datos limitados, debido a que no se tenían estudios previos, los resultados de estos modelos concluyó con la conclusión que tanto el campo geotérmico de Ahuachapán como el campo de chipilapa eran sistemas geotérmicos separados , No obstante en el periodo comprendido de 1988 y 1989 el laboratorio Nacional de Berkeley realizó un estudio del yacimiento en el cual se desarrolló un modelo hidrológico además del modelo geotérmico , esto con la finalidad de realizar un análisis de historial de presión ,temperatura y realizar una simulación numérica, basados en estos datos se construyó un modelo conceptual con información más reciente en la cual se llegó a la planteamiento de que ambos campos geotérmicos forman parte del mismo sistema geotérmico.

5.2 Modelo base

Al embarcarnos en el desarrollo del modelo, es necesario familiarizarse con las características geográficas, geológicas y químicas del área de estudio, Además, se recomienda revisar la literatura relacionada con el software de simulación de acuíferos HYDROTHERM para obtener una comprensión más sólida de los pasos a seguir .Siendo importante tener en cuenta las particularidades topográficas y composición interna específica del área, así como comprender como el software procesa los datos ingresados en la realización del modelo. Para facilitar este proceso, usaremos la siguiente ilustración que muestra el relieve del terreno en la zona de estudio, junto con datos de investigaciones previas para enriquecer nuestro análisis.

Figura 53

Modelo de Campo Geotérmico de Ahuachapán



Nota: Esquemático del Modelo de campo geotérmico de Ahuachapán (Geological Recognizemen of Ahuachapán (Septmeber 19, 2015), 2022)

Conociendo la geografía de la zona, será fundamental determinar la distribución de las capas de rocas que emplearemos en nuestro modelo geológico. En el cual se definió una composición de cuatro capas, que consisten en sedimentos volcánicos, andesita, aglomerado y escoria. Cabe destacar que estas últimas se clasifican como rocas ígneas, ya que se originan a partir del enfriamiento o solidificación de magma mezclada con minerales silicatos. La distribución de estas capas se detalla a continuación.

Además de establecer la disposición es crucial definir las propiedades específicas de cada tipo de roca que componen nuestro modelo.

Sedimentos volcánicos propiedades:

Densidad: Esta influenciada por la composición mineral y de la cantidad de vacío presente en la roca, su valor suele oscilar entre 1.5 y 2.5 gr/cm³.

Porosidad: Puede varía entre el 1% y el 60%, dependiendo del tipo de material (pómez, ceniza, lapilli, etc.)y su grado de compactación.

Conductividad térmica: Se ve afectada por la función de la porosidad, la saturación de agua y la mineralogía del lugar, generalmente se encuentra en el rango de 0.1 a 1.6 W/(mK).

Permeabilidad: Depende del tamaño de los granos, la porosidad y la densidad de la cimentación, generalmente suele encontrarse en el rango de 10⁻²⁰ a 10⁻⁶ m².

Calor específico: Se verá afectado por la composición de la roca variando este de 800 a 900 J/(kg. K)

Roca andesita propiedades:

Densidad: La cual se estima en 2.64 gr/cm³. Aunque dependiendo de su composición su valor se ronda entre 2.5 a 2.8 Tm/m³.

Porosidad: Se ve afectada por varios factores, como su origen, proceso de formación y la compactación. Generalmente presenta una porosidad relativamente baja de 5% a 15%. Algunas andesitas pueden tener porosidad ligeramente más alta si contienen vesículas o burbujas de gas atrapadas durante su formación

Conductividad térmica: La termo-conductividad puede variar según su composición mineral, densidad y grado de compactación. Generalmente oscila entre 1.5 y 2.5 W/(mK). Este rango puede verse afectado por factores como la presencia de agua, que puede aumentar la conductividad térmica, o la cantidad de minerales conductores presentes.

Permeabilidad: La permeabilidad debido a la composición que puede tener este tipo de roca oscila entre 10⁻¹⁶ a 10⁻¹⁸ m².

Calor específico: El calor específico puede variar dependiendo de su composición mineral específica. Se estima que el calor específico de la andesita está en el rango de aproximadamente 800 a 900 J/(kg. K).

Roca aglomerada propiedades:

Densidad: Suele estar en el rango de 1.80 a 2.5 g/cm³ dependiendo de su mineralogía y contenido de poros.

Porosidad: Generalmente varía entre el 5% y el 25%. Este valor dependerá de la cantidad de vacíos en los fragmentos de la roca y el tipo de cemento que los une.

Conductividad térmica: Los valores de la conductividad térmica puede variar, pero usualmente se encuentra en el rango de 0.5 a 2.0 W/(mK). Esta propiedad dependerá de la porosidad y de la saturación de agua en la roca.

Permeabilidad: La permeabilidad podría variar significativamente dependiendo de su composición, estructura y grado de compactación valores típicos de permeabilidad pueden oscilar entre $2.5 \cdot 10^{-16}$ a 10^{-6} m². El aglomerado puede ser considerado como una roca con baja a moderada permeabilidad, lo cual afecta su comportamiento como reservorio de agua o hidrocarburos.

Calor específico: El valor del calor específico usualmente puede encontrarse en el rango de 800 a 900 J/(Kg. K).

Roca escoria:

Densidad: La densidad de la escoria suele estar en el rango de 800 a 1,500 kg/m³. Este rango se debe a la naturaleza porosa y ligera de la escoria, que a menudo se utiliza como un material de construcción ligero.

Porosidad: La porosidad de la escoria puede ser bastante alta, típicamente del 15% al 80%. Esta alta porosidad contribuye a su ligereza y a sus propiedades de aislamiento

Conductividad térmica: La conductividad térmica de la escoria generalmente se encuentra en el rango de 0.1 a 1.5 W/(mK). La porosidad y el contenido de humedad pueden influir en este valor.

Permeabilidad: Los valores de la permeabilidad generalmente oscilan entre 10^{-15} a 10^{-3} m/s, aunque esto puede cambiar según la densidad y la porosidad de la escoria.

Calor específico: El calor específico de la escoria suele oscilar entre 800 y 1200 J/ (Kg. K), aunque este valor puede variar dependiendo de la composición específica del material.

Por lo tanto, al comprender la distribución y propiedades de estas capas, podremos desarrollar un modelo más preciso y funcional que refleje adecuadamente la geología del área estudiada. Siendo también necesario conocer otros datos claves para la creación de nuestro modelo como a continuación se describen:

Tabla 41

Parámetros para simulación

Parámetro	Valor
Gravedad	9.8 m/s ²
Gradiente de Temperatura	170 °C/km
Temperatura Máxima del Reservorio	250 °C
Profundidad máxima del Reservorio	1800 metros
Profundidad de los pozos	600 a 2750 metros
Área de campo pozos productores	4 Km ²
Temperatura del Reservorio liquido	200 °C a 250 °C

Para iniciar con el desarrollo de nuestro modelo, es necesario considerar varios aspectos:

En primer lugar, definiremos “zona” como el conjunto de celdas que comparten las mismas características del medio poroso, tal como se especifica en el archivo de entrada de nuestro modelo. Así mismo, una celda se entenderá como un volumen dentro de la región de simulación, representando como un prisma rectangular en coordenadas cartesianas y siendo un anillo transversal rectangular si se considera en coordenadas cilíndricas.

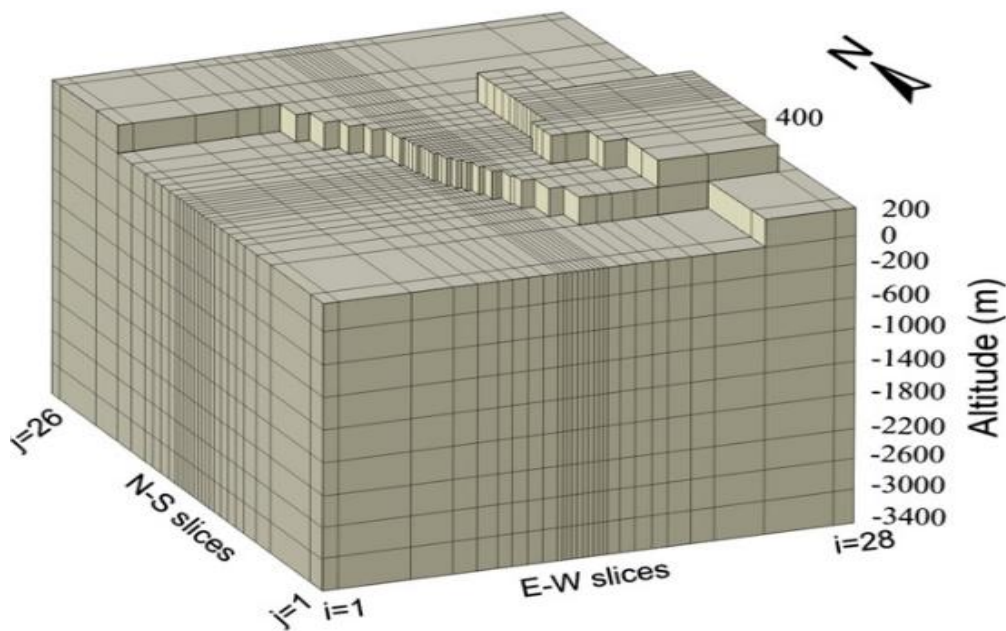
La malla de todas las celdas ocupa un prisma de espacio rectangular o un volumen cilíndrico, conocido como región de malla global. Es importante mencionar que esta región de malla global incluye en su totalidad la región simulada. Dé modo que para definir la forma de la región de

simulación será necesario seleccionar el conjunto de caras que limitan las celdas dentro de la malla, siendo aquellas celdas ubicadas en las caras las cuales denominaremos celdas con limite.

Las celdas con limite, celdas de la región de simulación y nodos asociados a ellas conforman lo que conoceremos como conjunto de celdas activas. Estas celdas representan la malla y se conforman por un conjunto de caras de celdas que deben ser perpendiculares al menos una de las direcciones de flujo. Para asegurar que las simulaciones sean más precisas y relevantes para el análisis del medio poroso en cuestión. Además, es necesario considerar que la correcta parametrización y definición de estas celdas influirán en la calidad de los resultados de la simulación.

Figura 54

Modelo Tridimensional



Nota: Representación gráfica de modelo tridimensional (Abdel Zaher et al., 2011)

Los pozos dentro del modelo representaran una fuente lineal que penetra una columna de celdas en la región discretizada. La discretización del pozo proporciona un conjunto de celdas, cada una de las cuales contiene un segmento de pozo o pantalla de pozo. En esta discretización los términos intervalo de pozo abierto e intervalo protegido son sinónimos, por lo cual el pozo puede estar revestido a través de algunas celdas y, por lo tanto, no comunicarse con el acuífero allí, siendo el

segmento del pozo en una celda determinada debe representarse como apantallado o entubado en todo el espesor de la celda.

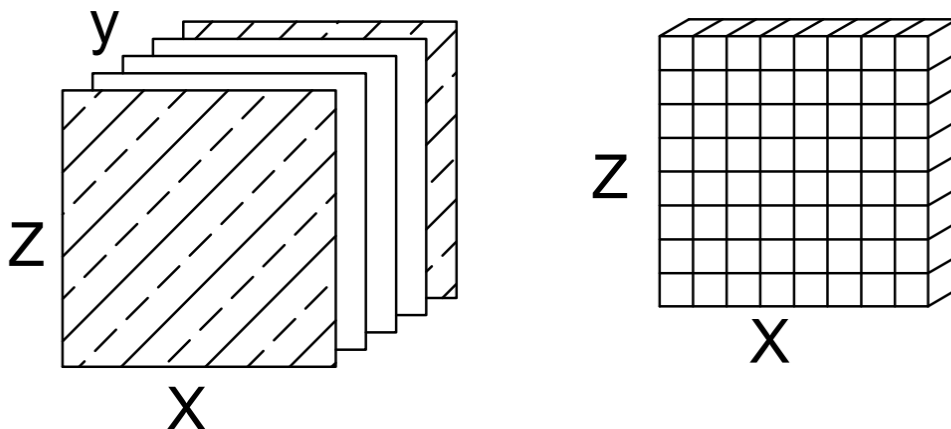
Las células parcialmente seleccionadas no se pueden representar. Debido a que el pozo a menudo se criba sobre las zonas más permeables de las formaciones de la región, los intervalos de cribado se pueden especificar mediante conjuntos de celdas.

En el simulador HYDROTHERM, sólo puede existir un pozo en una columna centro a particular de celdas de la malla. Varios pocillos en una columna de celdas deben representarse mediante un único pocillo equivalente o se debe refinar la cuadrícula espacial para separarlos. Esta restricción también se aplica a pocillos separados que están ubicados en la misma columna de celdas pero que se analizan en diferentes intervalos verticales.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, procederemos a crear el modelo tridimensional basándose en el siguiente esquema.

Figura 55

Representación Gráfica de Composición Modelo



Para realizar un modelo nos basaremos en crear un cubo tridimensional el cual está compuesto por muchas láminas unidas las cuales se llaman Slice cada Slice contiene una cantidad de NxM cubos los cuales forman la SLICE estos cubos poseen propiedades físicas dependiendo de qué variable

represente en el caso de las rocas posee valor asociado de permeabilidad, densidad, calor específico entre otras.

Teniendo presente esto comenzaremos creando un bosquejo del modelo geológico al cual seleccionaremos dependiendo del tamaño deseado por el usuario, se le asignan las propiedades de cada cubo que conforma el SLICE asimismo se le asignará un número el cual servirá para diferenciar las zonas de rocas, así como tener una idea de cómo se distribuye.

El cubo tridimensional que se encuentra conformado por un mucho cubo pequeño en las tres coordenadas (x,y,z) se identificaran de manera numérica dependiendo de la coordenada su orden será distinto, teniendo para el eje x una numeración que iniciara de izquierda a derecha, para el eje z su numeración iniciara en la parte inferior del modelo hasta llegar a la parte superior mientras que para el eje y se iniciara desde la cara frontal del modelo hasta la cara posterior del mismo.

Comprendiendo esto lo único que faltaría sería iniciar la parametrización de nuestro archivo de entrada con extensión .in, resumiendo en la siguiente tabla de propiedades físicas de las rocas que componen nuestro modelo.

Tabla 42

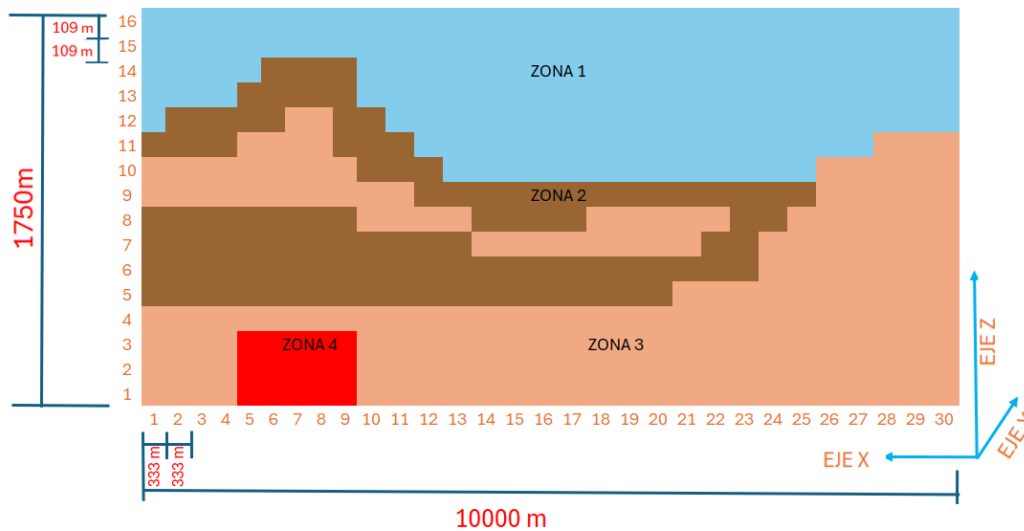
Parametros de Simulación

	Porosidad	Densidad G/Cm ³	Calor Especifico (J/(Kg K))	Permeabilidad m ²	Termo Conductividad (W/M K)
SEDIMENTO	1% a 60%	1.5 a 2.5	800 a 900	1 D-20 a 1 D-2	0.1 a 1.7
ANDESITA	5% a 15%	1.5 a 2.64	800 a 900	1 D-16 a 1 D-18	1.5 a 2.5
AGLOMERA DO	5% a 25%	1.8 a 2.5	800 a 900	2.5 D-16 a 1 D-6	0.5 a 2.0
ESCOREA	15% a 80%	800 a 1500	800 a 1200	1 D-15 a 1 D-3	0.1 a 1.5

Seguidamente continuando con la elaboración del modelado numérico del reservorio geotérmico de Ahuachapán, basándonos en el modelo de la ilustración 65, en la cual se iniciará sustituyendo las zonas rocosas por números que servirán para poder asociar las propiedades físicas del conjunto de rocas.

Figura 56

Distribución de Zonas para Modelo Tridimensional.



El número de cubos que conforman el modelo dependerá del usuario, así como de la zona de interés a realizar el estudio, esto se debe a que el software permite tener cubos de distinto tamaño con la finalidad de realizar un análisis más preciso.

Cada zona tendrá un número representativo con el cual asignaremos la propiedad de roca perteneciente a la composición del suelo, lo cual servirá para poder establecer límites entre ellas, límite entre el modelo y la atmósfera y límite de frontera del modelo.

La distribución que se consideró en esta investigación será la siguiente:

- La zona numerada con el cero corresponde a la atmósfera.
- La zona numerada con uno corresponde a sedimento volcánico.
- La zona numerada con tres corresponde a la andesita.

Podemos observar los cambios anteriormente mencionados, así mismo podemos notar que aún se encuentran unos límites en el modelo estos representan el límite entre el modelo y la atmósfera y los límites laterales del modelo que nos limitan la zona de estudio.

De la misma manera en que se analizaron estas laminas se procedió a crear las demás, teniendo como criterio propio la creación de un modelo con dimensiones 30 x 20 x 16. Cabe recalcar que entre más grande el modelo se puede obtener un mejor análisis, pero como consecuencia el tiempo en que se desarrolla la corrida de la simulación se extenderá, este tiempo aumenta o disminuye dependiendo de las capacidades del ordenador en el cual se realiza la ejecución de HYDROTHERM. Siendo las características del ordenador que se utilizó en esta investigación las siguientes: Tarjeta gráfica RTX 2060, Disco solido de 500 Gb, 32 Gb de memoria RAM, Motherboard AMD A520 M, Procesador AMD Ryzen 5 3600, Distribución Windows 11 Pro. Con estas características la simulación tuvo un total de duración de dos horas, se realizaron pruebas en las cuales se diseñó modelos con un número mayor de cubos llegando a tardarse hasta cuatro días en la ejecución de la simulación, debido a que el software procesa cubo por cubo y de haber un problema respecto a la simulación será necesario comenzar desde cero la simulación la con la corrección realizada, hasta lograr obtener los resultados esperados.

Los parámetros para el análisis del modelo numérico del reservorio geotérmico de Ahuachapán se consideraron

Número máximo de iteraciones: 10

Tiempo de paso: 10,000 años

Dimensiones: eje x = 30, eje y = 20, eje z = 16

Intervalo de impresión: 10000, 20000, 30000, 40000 años

Zona de estudio: 10 Km²

Profundidad de reservorio: 1,757 m.

Conductividad de calor a lo largo de la base: 200 °C

Presión: 1.013 bar

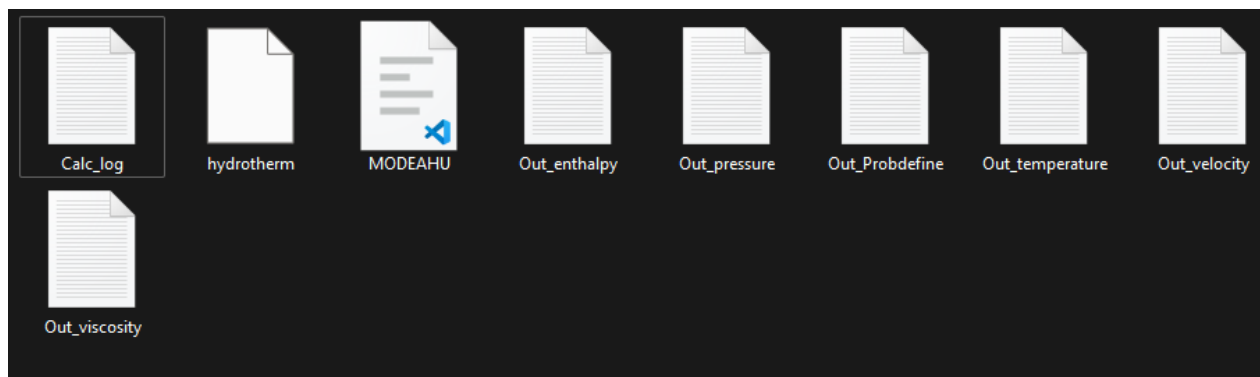
Se consideraron como fuentes de calor dos pozos cuya presión es de 7.2 y 7 kg/seg

Para el cálculo de tamaño de cubo se realiza mediante una división en la cual se divide el área de estudio entre el número de cubos. Por ejemplo, para el eje z el cálculo será los 1757 m /16 cubos dando como resultado que el cubo tendrá un tamaño de 109.8 m en dirección del eje Z. para las otras direcciones se realiza el mismo proceso. El código fuente se encuentra anexado al final del documento como anexo 2.

Teniendo ya especificado los parámetros a utilizar y haber comprendido la breve explicación de cómo funciona HYDROTHERM. Se crea el archivo de entrada y se procede a ejecutar (como se muestra en el capítulo 3) para obtener los archivos de salida, en este caso se obtuvieron.

Figura 60

Archivos de Salida de Modelo Numérico



Con los resultados obtenidos procedemos a graficar los archivos de temperatura y velocidad, ya que son los datos relevantes que nos permitirán visualizar, a través de la representación gráfica, una aproximación del estado actual del reservorio en cuestión, así como las variaciones que podría experimentar en periodos futuros.(Darmawan et al., 2023)

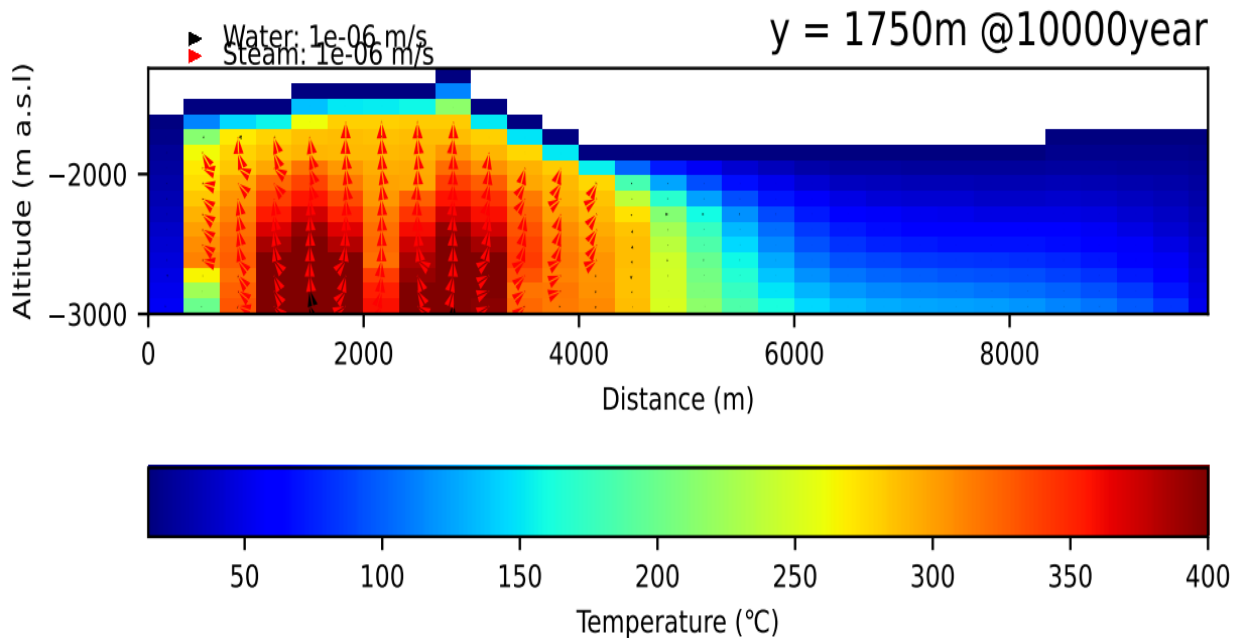
RESULTADOS

Al obtener los archivos ya procesados por medio de los scripts desarrollados por el PHD. Kazuki Sawayama, tal como se presenta en el capítulo 3, procedemos a obtener el resultado gráfico en el cual observaremos el cambio de temperatura que el reservorio podría experimentar durante un periodo de tiempo. Para poder analizar este cambio se ejecutó la simulación demostrativa para 10000, 20000 años.

SLICE 4

Figura 61

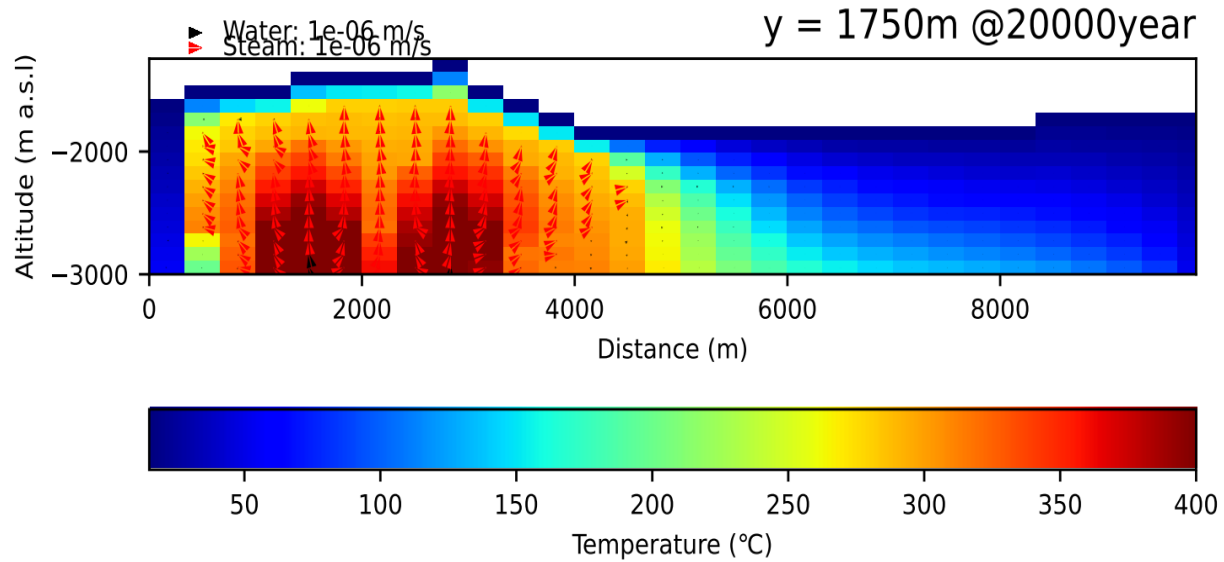
Respuesta Grafica para 10000 Años



Podemos observar una respuesta de cómo reacciona el reservorio para un periodo de 10,000 años, a una profundidad de 1750 m, en el cual podemos ver como variando la temperatura en cada una de las celdas dentro del modelo, las cuales se ven afectas por influencia de temperatura de los pozos geotérmicos, así como el cambio en sus propiedades físicas.

Figura 62

Respuesta Grafica para 20000 Años



A una profundidad estimada de 2500 m a.s.l y una distancia de 4120 m se comienzan a notar cambios en las ciertas zonas en las cuales la temperatura varia de 300 $^{\circ}\text{C}$ a un aproximado de 270 $^{\circ}\text{C}$.

Figura 63

Respuesta Grafica para 30000 Años

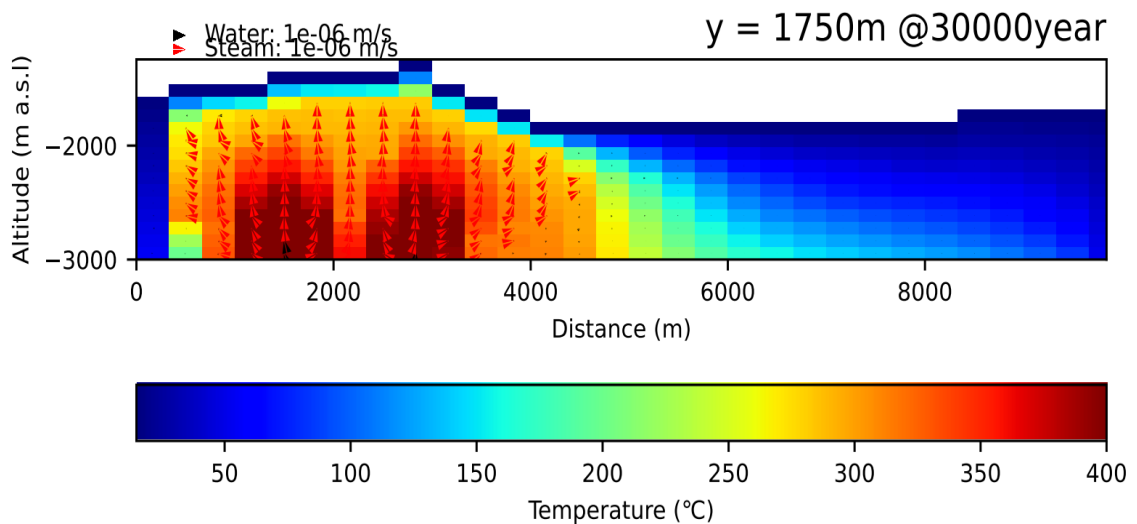
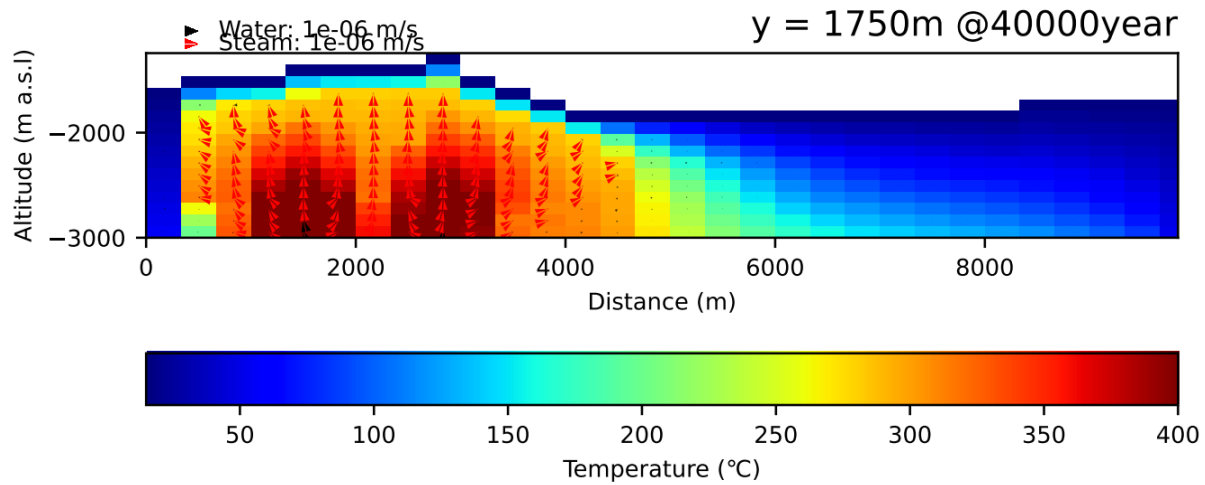


Figura 64

Respuesta Grafica para 40000 Años.

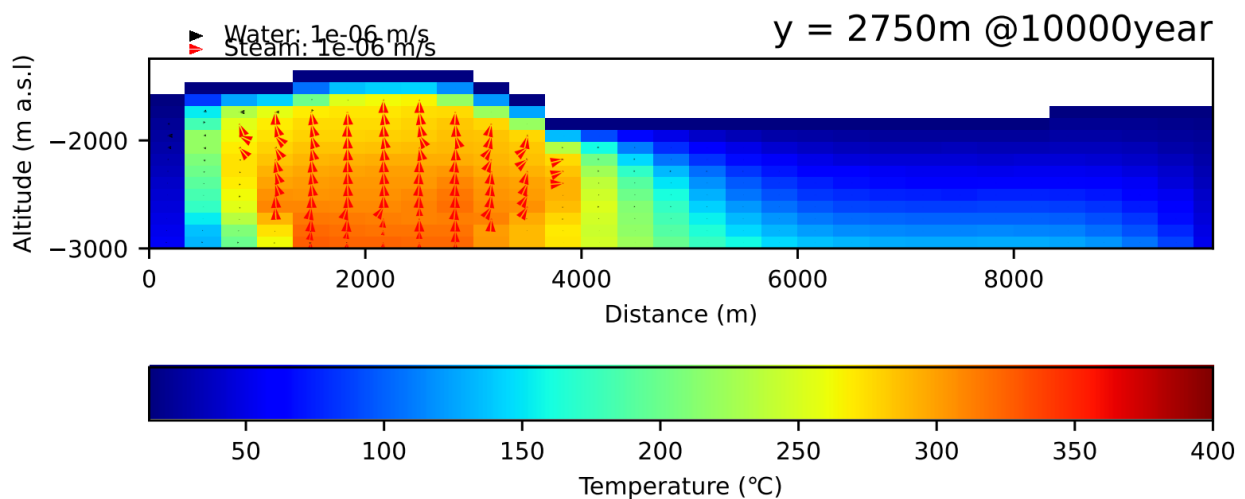


Comparando las figuras 63 y 64 ,podemos notar una leve reducción en la variación de la temperatura de las celdas las oscilan entre el rango de 300 a 250 °C a una distancia aproximada de 5000 m, en donde las celdas cambian de color indicando una reducción en la fuente de calor, debido a su influencia zona, haciendo notar el desgaste que esta posee debido al efecto del tiempo y a la explotación del recurso.

SLICE 10

Figura 65

Respuesta Grafica para 10000 Años Lamina 10



Al realizar un análisis cambiando de profundidad en horizontal del modelo realizado se nota más el cambio de temperatura la cual ha disminuido ,esto sucede debido a que la fuente calor establecida

se encuentra a una mayor distancia por lo que el calor transportado por conducción. siendo notable un cambio de temperatura 350° C a 275 °C si comparamos las figuras 61 y 65 las cuales se encuentran analizadas a una distancia de 1750 m con la diferencia de ubicación del pozo parametrizado.

Figura 66

Respuesta Grafica para 20000 Años Lamina 10

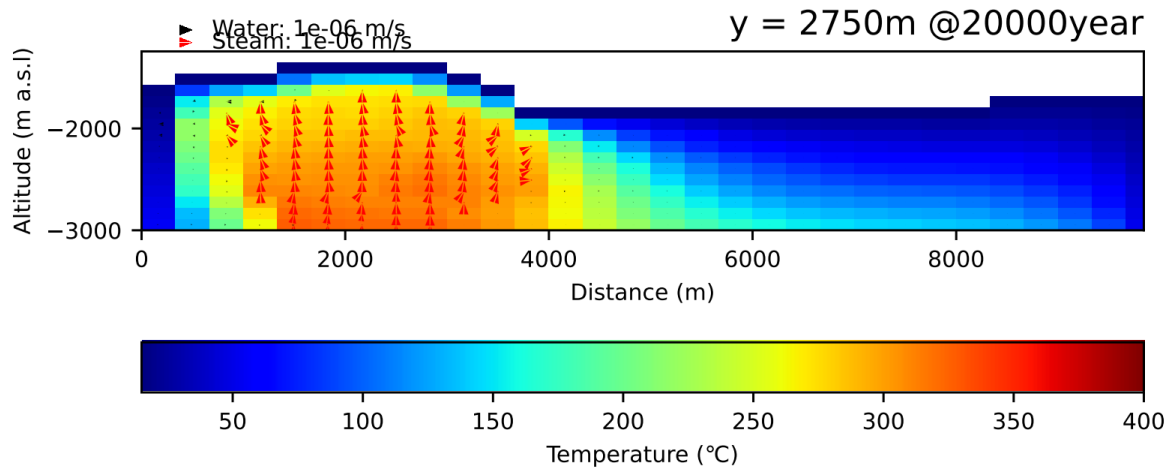


Figura 67

Respuesta Grafica para 30000 Años Lamina 10

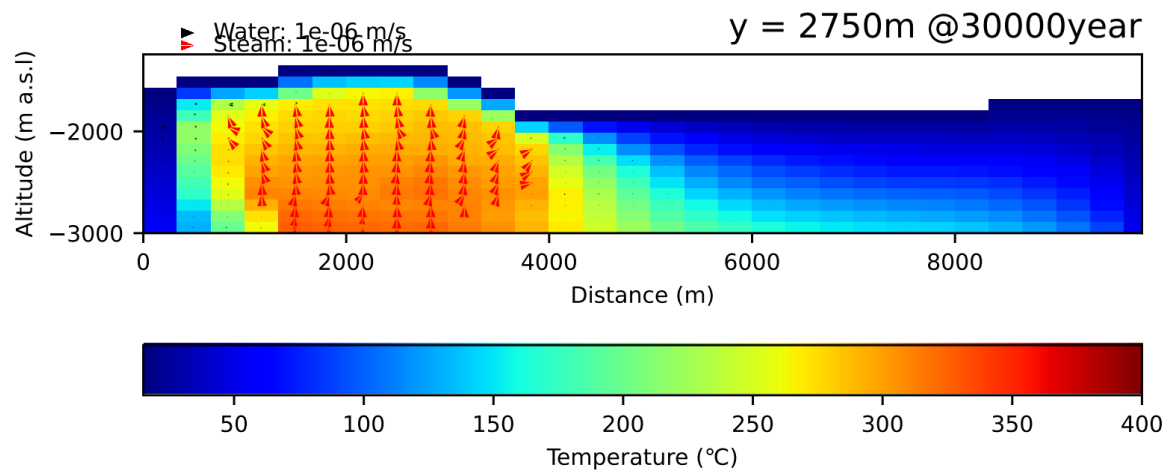
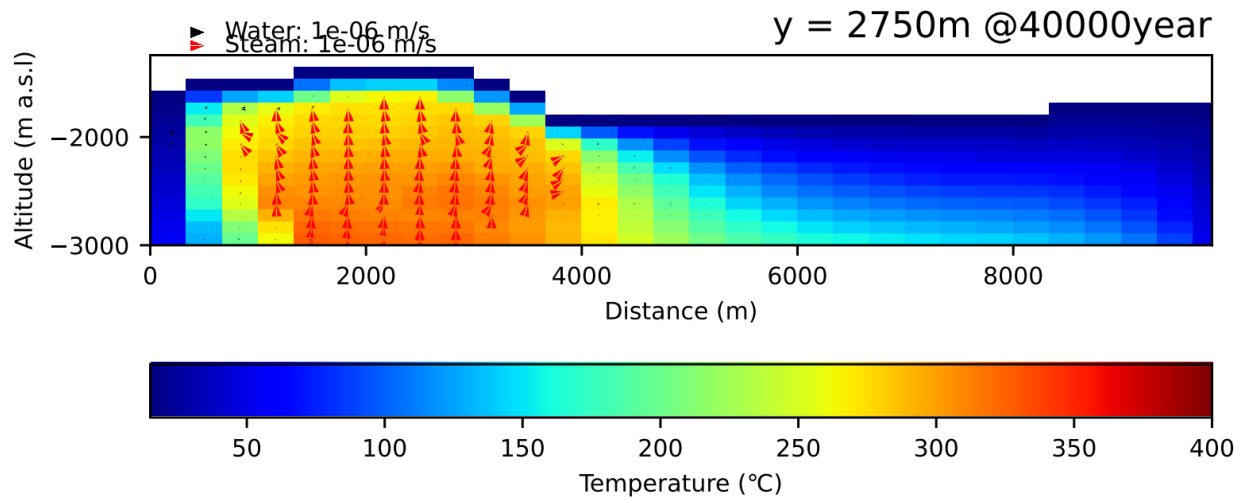


Figura 68

Respuesta Grafica para 40000 Años Lamina 10



De igual manera que en los otros resultados gráficos en los cuales las temperaturas decaen con el paso de tiempo en las figuras 66,67,68 podemos observar los resultados obtenidos de la simulación en la cual notamos que la fuente de calor va disminuyendo , afectando su nivel producción y con ello la presión utilizada para la generación , estos resultados podrían variar dependiendo del tipo de análisis y de los parametros ingresados , asi mismo depende del grado de error que se escoja.

CONCLUSIÓN

Para la obtención de resultados más precisos es recomendable obtener datos más recientes de estudios geofísicos y geográficos del área a ser analizada.

El uso de software de uso libre presenta una manera económica de realizar estudios de evolución geológica, presentando el único inconveniente de que es necesario ingresar los datos en archivos de entrada ,así mismo de unos script para obtener resultados gráficos en el estudio de los diferentes reservorios geotérmicos entendiendo el comportamiento de las manifestaciones superficiales a través del paso del tiempo pudiendo así prever o anticipar soluciones futuras mejorando tanto el aprovechamiento de los recursos para el mejoramiento en la calidad de la energía.

Durante el estudio se pudo apreciar los diversos cambios que ocurren en el transcurso de periodos de tiempo como resultado de la parametrización de la zona de estudio, visualizando las variantes de temperatura en cada celda y cómo éstas son afectadas dependiendo de las fuentes puntuales de energía cómo lo son los pozos geotérmicos con su característica presión, temperatura y profundidad. Dándonos una idea de cómo se encuentra actualmente el reservorio.

Dentro del proceso de desarrollo para lograr obtener los resultados, se debe tener sumo cuidado en cómo se representa el modelo físico a modelo numérico, dependiendo de la zona de estudio a analizar se puede optar por un análisis enfocado a la zona o un análisis general, en el cual van variando cantidad de bloques en el área de estudio. Esto afectara el tiempo de análisis del software, parametrización del archivo *input* y obtención de los archivos *output*, con la finalidad de agilizar el proceso de análisis se creó este trabajo de investigación en el cual se muestra paso a paso, desde la instalación hasta la obtención grafica del modelo siendo esto un abstracto de lo que indica el manual del software y de la guía básica de gráfica. A pesar de ello se recomienda leer los manuales para tener una idea del procesamiento que hace internamente el software y así obtener una mejor respuesta de él se anexa el código utilizado en este trabajo.

GLOSARIO

Agua subterránea

Se refiere a los sedimentos o rocas permeables cuyo interior contiene agua subterránea explotable, la cual se circula a diferentes velocidades.

Subsuelo

Se conoce como subsuelo a la capa ubicada por debajo de la superficie de la tierra, también la podemos definir como la capa que se encuentra por debajo de la superficie cultivable.

U.S.G.S

United States Geological Survey (Servicio Meteorológico de Estados Unidos)

Entalpía

Se define como el proceso de transformación en el cual se recibe o aporta energía(calor) en un sistema sometido a presión constante.

Nivel freático

Superficie en donde la presión de agua y presión atmosférica son iguales

Región advecta

Región geográfica que se caracteriza por tener una alta movilidad de masa de aire, debido a factores como lo es la topografía del lugar, presión atmosférica, entre otros.

Proceso de extracción de energía geotérmica

El punto de partida para iniciar el proceso de extracción geotérmica es realizar una identificación de las áreas geotérmicas potenciales en las cuales las temperaturas del subsuelo son lo suficientemente altas para generar vapor o agua caliente y así poder utilizar para generar energía eléctrica, esto se realiza por medio de la identificación de las áreas, en las cuales se hace un estudio realizando perforaciones en determinados puntos en los cuales los geólogos, geoquímicos y geofísicos delimitan el área y ubicación del reservorio al finalizar las pruebas y poder montar el equipamiento y componentes necesario los cuales se describirán a continuación.

Pozo geotérmico

Son estructuras perforadas en la corteza terrestre, está constituido por un orificio profundo ubicado en la superficie terrestre la cual se perfora para acceder al calor que se encuentra almacenado en el interior de la tierra, en su parte externa(sobre la superficie terrestre) se instala un dispositivo de control conformado por válvulas las cuales se utilizan para extraer de manera segura los fluidos y en su parte interna se constituye por un conjunto de tuberías especiales de diferentes diámetros ancladas y revestidas con concreto de alta resistencia. Siendo diseñada para soportar las variaciones de presión y temperatura que el flujo del fluido geotérmico y formación rocosa pueda tener.

Plataforma

Es la superficie de tierra en la cual se realizan perforaciones para acceder a fuentes de calor subterráneas y utilizarlas como energía geotermia, al contorno se construye un sistema de canalizaciones de aguas lluvias cuya finalidad es proteger el suelo, cercanas a ellas se construyen estanques cuya dimensiones van desde 800 a 2000 metros cúbicos los cuales están impermeabilizados con suelo cubierto de cemento y estructura mallada, con la finalidad de poder utilizar los líquidos obtenidos de la perforación de pozo, este tipo de estructuras requiere de un cuidadoso monitoreo ambiental y de seguridad para obtener un rendimiento optimo y que su operación sea segura y eficiente.

Evaporadores

También conocidos como Flasher su funcionamiento consiste en aprovechar las características de termodinámicas del líquido separado y provocar una evaporación en forma de subida al existir una discrepancia de presión de agua de entrada y presión de trabajo, produciendo un vapor de baja presión el cual representa el 10% del total de agua ingresada .Este vapor puede ser usado para generar electricidad y el líquido restante puede ser reinyectado en el ambiente geotérmico para mantener la sostenibilidad del recurso.

Colector de vapor

Su función es recoger el vapor de agua caliente proveniente de las líneas de procedentes del pozo y canalizarlo hacia una turbina, en la cual se convertirá en energía mecánica para producir energía eléctrica, el vapor que no se alcanza a utilizar se recoge en un condensador y se vuelve a convertir en agua para ser reciclado en el sistema.

Separador ciclónico

Es un dispositivo cuya función es separar el fluido compuesto de agua y vapor para transportar el vapor hacia ubicación de las turbinas donde será utilizado y el agua para los sistemas reinyectares, este dispositivo está compuesto por un cilindro vertical cerrado en su interior tiene instalado un tubo central cuyo diámetro vario de 60 a 66 cm, la estructura está compuesta de acero de carbono.

Silenciador atmosférico

El silenciador es un equipo cuya función es reducir el ruido producido por la liberación de vapor y gases atmosféricos, mitigando el ruido ambiental generado por las operaciones de generación cumpliendo con los estándares de ruido ambiental.

Está constituido por dos cilindros cuyo material puede ser concreto o metal, abierto en la parte superior, el fluido entra de forma tangencial lo que con lleva a que la fase liquida se adhiera a las paredes por efecto de la fuerza de inercia, posteriormente descendiendo por la gravedad y se dirija al canal vertedor.

Tuberías de conducción

El calor obtenido en el separador ciclónico es conducido por tuberías de acera recubiertas con fibra de vidrio y láminas de aluminio con la finalidad de reducir las pérdidas de temperatura, durante su funcionamiento se dan efectos de dilatación térmica productos de las presiones t cambios de temperatura estos efectos son controlados mediante dispositivos de compensación, además de ello cuentan con un sistema de válvulas de drenaje de agua remanente.

Separador de humedad

Este dispositivo es el encargado de separar y eliminar la humedad que aún se encuentra en el vapor proveniente de los colectores, siendo este vapor que se dirige hacia la turbina lo más seco que se pueda evitando así problemas de corrosión y deterioro de los componentes, así mismo contribuye manteniendo al sistema permitiendo un funcionamiento efectivo y prolongando su vida útil.

Roca andesita

Se forma a partir del enfriamiento y solidificación del magma en el interior de la tierra, es una roca considerada intrusiva, se caracteriza por su composición intermedia entre basalto y granito, mientras que su composición mineral se encuentra comprendida generalmente por plagioclasa, hornblenda, piroxeno. Dentro de las características físicas podemos mencionar

Sedimento volcánico

Estos sedimentos se encuentran compuestos por materiales fragmentados expulsados durante una erupción volcánica que se depositan en la superficie terrestre. Incluyen componentes como cenizas, lapilli y bloques. Las propiedades físicas varían dependiendo de su composición mineral, grado de compactación y condiciones de formación.

Roca escoria

Es una roca volcánica de composición basáltica o andesítica, su composición es densa y sus colores son oscuros y llamativos. Uno de sus principales usos es en la construcción en la cual se utiliza para la creación de concreto.

Roca aglomerada

Se formada mediante la acumulación y cementación de fragmentos gruesos de diferentes tamaños. Se caracteriza por la presencia de clastos (fragmentos de rocas) redondeados o angulares que están unidos por un material de grano más fino, afectando sus propiedades como se muestra a continuación.

BIBLIOGRAFÍA:

- Abdel Zaher, M., Saibi, H., Nouby, M. El, Ghamry, E., & Ehara, S. (2011). A preliminary regional geothermal assessment of the Gulf of Suez, Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 60(3), 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2011.02.006>
- Andres Portugal Bellido. (2023, January 24). LOS PRIMEROS PASOS DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA EN EL MUNDO. Andres Portugal Bellido. <https://es.linkedin.com/pulse/los-primeros-pasos-de-la-energ%C3%ADa-geot%C3%A9rmica-en-el-portugal-bellido>
- apparenovables. (2023). ¿Qué es la Energía Geotérmica de Alta Entalpía? <https://www.appa.es/appa-geotermica-de-alta-entalpia/que-es-la-energia-geotermica-de-alta-entalpia/>
- Autodesk. (2023). Software de análisis de elementos finitos. <https://www.autodesk.com/latam/solutions/finite-element-analysis#:~:text=El%20an%C3%A1lisis%20de%20elementos%20finitos,o%20funcionar%C3%A1%20como%20se%20espera.>
- Br. Nelson E. Colmenares Leal. (2017). IMPLEMENTACIÓN DEL MÉTODO DE ELEMENTO FRONTERA PARA EL ESTUDIO DE LA DEFORMACIÓN DE UNA PLACA EN L.
- Central geotérmica Ahuachapán. (2000).
- cidecame. (2023). Sistema de Realidad Virtual. http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro39/33_modelado_fsico.html
- CIENCIAUANL. (2022). MODELADO COMPUTACIONAL: UNA HERRAMIENTA PARA COMPRENDER LA CIENCIA DE LOS MATERIALES. <https://cienciauanl.uanl.mx/?p=12160>
- Cristina Ortega. (2005). Método analítico: Qué es, para qué sirve y cómo realizarlo. <https://www.questionpro.com/blog/es/metodo-analitico/>
- Darmawan, I. G. B., Rustadi, & Karyanto. (2023). Hydrothermal fluid flow modeling using numerical simulation to identify potential reservoir zones in the Mount Rajabasa geothermal field. *Kuwait Journal of Science*, 50(3), 376–386. <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2023.02.025>
- Devon Kearns. (2013, March 13). Kali Linux. <https://www.kali.org/>
- Dirección General de Industria, E. y M. (2008). Guía de la Energía Geotérmica.
- Edgar Santoyo, & Rosa Maria. (2010). *EnergiaGeotermica*.
- ENEL. (1993). The history of Larderello. Public Relations and Communications Dept., Ente Nazionale per L'Energia Elettrica.
- ENERGIA EVOLUCIONA. (2023). ENERGIA GEOTERMICA. <https://energiaevolucionaria.org/energias-renovables/geotermica/>

- Fao.org. (2023). MODELOS Y SU USO. <https://www.fao.org/4/w7452s/w7452s01.htm>
- Fortran Community. (2023). Instalación de GFortran. https://fortran-lang.org/en/learn/os_setup/install_gfortran/
- Gaceta UNAM. (2023). Primer deshidratador geotérmico de alimentos. <https://www.gaceta.unam.mx/primer-deshidratador-geotermico-de-alimentos/>
- Geological Recognizemen of Ahuachapán (Septmeber 19, 2015). (2022).
- GEOTERMIA VERTICAL. (2023). ¿Qué es la Energía Geotérmica de Baja Entalpía? <https://www.geotermiavertical.es/energia-geotermica-baja-entalpia/>
- GeotermiaOnline. (2023). La geotermia se consolida como energía básica en los invernaderos. <https://geotermiaonline.com/5805/5805-2/>
- Guido van Rossum. (1989). Python. Guido van Rossum. <https://www.python.org/>
- Ingeniosos. (2024). MÉTODO de los ELEMENTOS FINITOS [Video recording]. <https://www.youtube.com/watch?v=pZbxGKBsSnQ>
- José Luis Chavarría Guerra. (2001). Propuesta de un Modelo para el Análisis Energético del Sistema Geotérmico Campo.
- José Ramón Sánchez Abardia. (2017). Modelacion Matematica en Sistemas Geotermicos.
- LA GEO. (1999). ¿Qué es la Geotermia? http://www.lageo.com.sv/index.html_cat=9&title=Que%20es%20la%20Geotermia_&lang=es.html
- LaGEO. (1999a). Central Geotérmica Ahuachapán. LaGEO. <http://www.lageo.com.sv/CentralAhuachapan.html>
- LaGEO. (1999b). ¿Cómo funciona una central geotérmica? LaGEO. <http://www.lageo.com.sv/ComoFuncionaUnaCentralGeotermica.html>
- LaGeo. (2005). Desarrollo Geotérmico en EL Salvador.
- LaGeo. (2009). GRAVITY SURVEYS CONTRIBUTION TO GEOTHERMAL berlin ahuachapan san vicente.
- Learn Makefiles. (2023). Makefiles. <https://makefiletutorial.com/#top>
- Lucha, G., & Moran, L. (2003). pORSPECTO DE FLUJO DE CALOR EN EL AREA SUR ESTE DEL CAMPO GEOTERMICO DE AHUACHAPAN.
- LUCHA, G., & MORAN, L. (2003). PROSPECCIÓN DE FLUJO DE CALOR EN EL ÁREA SUR – ESTE DEL CAMPO GEOTÉRMICO DE AHUACHAPÁN.
- Mendoza, C., Aguilera, ; Gonzales, Campos Cortez, ;, & Pocasangre, C. (2023). Informe Nacional Sobre Energía Geotermica: El Salvador 2023 Geothermal Country Report: El Salvador 2023.

- Microsoft. (204 C.E.). Instalación de Linux en Windows con WSL. Microsoft.
<https://learn.microsoft.com/es-es/windows/wsl/install>
- Microsoft. (2015, April 29). Visual Studio Code. Visual Studio Code.
<https://code.visualstudio.com/>
- Ministerio de Defenza. (2024). Recursos geotérmicos de alta entalpía para la generación de energía eléctrica. <https://www.ign.gob.ar/odc-13-condeserra>
- Moreira, L., Marcia.Sandra, Castañeda, C., & Bolaños, N. (1980). Evaluación del Potencial Aprovechable de los Fluidos Geotérmicos y otras Consideraciones de Importancia.
- Muller, H. C., & Cruz, S. (2007). Programando en Fortran.
- NATIONAL GEOGRAPHIC. (2023). ¿Qué es la energía geotérmica?
<https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/que-es-la-energia-geotermica>
- National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. (2022). Modelado Computacional.
<https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/modelado-computacional>
- notepad-plus-plus.org. (2023). What is Notepad++. <https://notepad-plus-plus.org/>
- NumPy team. (2005). NumPy. NumPy Team. <https://numpy.org/>
- OLANDE. (1978). Vision del Estado Actual de la Geotermia En America Latina.
- PANSOGAL. (2023). Cómo instalar energía geotérmica en casa. <https://pansogal.com/energia-geotermica-en-casa/>
- Peter Woolf et al. (2023). Modelado verbal.
[https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_\(Woolf\)/02%3A_Fundamentos_de_Modelado/2.01%3A_Modelado_verbal](https://espanol.libretexts.org/Ingenieria/Ingenier%C3%ADa_Industrial_y_de_Sistemas/Libro%3A_Din%C3%A1mica_y_Control_de_Procesos_Qu%C3%ADmicos_(Woolf)/02%3A_Fundamentos_de_Modelado/2.01%3A_Modelado_verbal)
- PHP Simplex. (2006). Interpretación gráfica del Método Simplex.
https://www.phpsimplex.com/teoria_metodo_grafico.htm
- Por La, F., Salvador, S., & José, S. (2009). ESTADO ACTUAL Y DESARROLLO DE LOS RECURSOS GEOTÉRMICOS EN CENTROAMÉRICA.
- Por, P., Francisco, I., Figueroa, Z., Carlos, G., Esteban, L., & Santos, L. P. (2013). MODELO GEOFISICO CONCEPTUAL DEL CAMPO GEOTERMICO AHUACHAPAN A PARTIR DE DATOS GRAVIMETRICOS Y ELECTROMAGNETICOS (MT-TDEM).
- Roberto Enrique Renderos, & LaGeo. (2023). SUSTENTABILIDAD Y SOSTENIBILIDAD DEL RECURSO GEOTÉRMICO EN EL SALVADOR CASO DE AHUCHAPÁN IV TALLER REGIONAL SOBRE GEOTERMIA.
- Roger Isaacc Castellón Rios, & Carlos Eduardo Garcia Antezana. (2018). Estudio de Manifestacion superficiales en plataforma de pozos geotérmicos.

The Decision Lab. (2023). Modelos Mentales. <https://thedecisionlab.com/reference-guide/design/mental-models>

The Matplotlib development team. (2012). Matplotlib: Visualization with Python. The Matplotlib Development Team. <https://matplotlib.org/>

Universidad de la Laguna. (2022). El sistema geotérmico.
<https://fjarabo.webs.ull.es/TER/GEOTE/GEOTE03.HTM#:~:text=Los%20sistemas%20geopresurizados%20son%20acu%C3%A9licos,grandes%20cantidades%20de%20gas%20natural>

Universidad Industrial. (2010). Métodos Numéricos.

USGS. (2012). HYDROTHERM. USGS. <https://volcanoes.usgs.gov/software/hydrotherm/>