
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA

ESCUELA DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA



**Análisis de factibilidad para climatización de edificaciones
con energía geotérmica de baja entalpia en el ejido "Bonfil"**

Santa Rosalía B.C.S

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO EN ENERGÍAS RENOVABLES

PRESENTA:

JUAN RÍOS ARRIOLA

Resumen

En este trabajo de investigación se muestran los resultados de la evaluación y modelación del comportamiento de las temperaturas del subsuelo en función de las condiciones estacionales en superficie y con ello se realizó un análisis teórico-numérico riguroso del desempeño de un intercambiador de calor tierra-aire (EAHE) como una alternativa viable de uso directo de la energía geotérmica en el Ejido Bonfil, ubicado en el complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV), BCS. Es conocido que el perfil de temperatura del subsuelo puede estimarse a partir de la temperatura y los diferentes mecanismos de transferencia de calor que se llevan a cabo en la superficie, utilizando un modelo matemático basado en la ecuación diferencial de transferencia de calor por conducción en estado transitorio (1-3 D). Este balance, considera el efecto de variables meteorológicas como: temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa, velocidad de viento, entre otros factores. El objetivo principal fue evaluar un EAHE a partir de la información obtenida de pozos perforados en la caldera La Reforma ubicada en el CVLTV, considerando dos escenarios (en ambos escenarios con clima seco desértico, temperatura anual entre 12 °C y 37 °C, radiación solar incidente promedio de $650 \frac{W}{m^2}$, humedad relativa promedio de 46 % y una velocidad de viento promedio de 2.8 m/s). El primero, sin considerar el efecto o presencia de un gradiente térmico (común en zonas volcánicas), evaluando la transferencia de calor a una profundidad de 6 m para el día más cálido (verano) y el día más frío (invierno) del año 2016, utilizando diferentes números de Reynolds (Re), el mejor modelo para el día cálido corresponde a un $Re=500$, presentando una $T_{in} = 38.5^{\circ}C$ y una $T_{out} = 34.53^{\circ}C$ obteniéndose una reducción de temperatura $\Delta T = -3.97^{\circ}C$ y, para el día más frío corresponde a un $Re=1500$, presentando $T_{in} = 12.3^{\circ}C$ y $T_{out} = 13.22^{\circ}C$ obteniéndose un aumento de temperatura $\Delta T = 0.92^{\circ}C$. El segundo escenario, considera el efecto de un gradiente térmico ($0.43^{\circ}C/m$), evaluando la transferencia de calor a una profundidad de 6 m para el día más cálido (verano) y el día más frío (invierno) del año 2016, utilizando diferentes números de Reynolds, donde el mejor modelo para el día más cálido corresponde a un $Re = 500$, una $T_{in} = 38.5^{\circ}C$ y una $T_{out} = 36.29^{\circ}C$ obteniéndose una reducción de temperatura $\Delta T = -2.21^{\circ}C$ y, para el día más frío corresponde a una $Re=500$, una $T_{in} = 12.3^{\circ}C$ y una $T_{out} = 15.11^{\circ}C$ obteniendo un aumento de temperatura $\Delta T = 2.81^{\circ}C$.

Dedicatoria

*Le dedico todas y cada una de las páginas de este trabajo a mi mejor amigo,
quien me a acompañado en todas las etapas de mi vida
viendome cumplir objetivos y alcanzar metas,
al igual que me a visto cometer errores una y otra vez.
Más nunca a dejado de confiar en mi..*

*Para quien es biológicamente mi abuelo y legalmente mi padre.
TE AMO Juan Ríos Pérez.*

Agradecimientos

Primeramente quiero agradecer a la Dra. Ivett Zavala Guillen, por sus valiosas enseñanzas y buenas practicas como mi profesora durante mi etapa de licenciatura en la UABC, y tiempo después darme la oportunidad de colaborar con ella en CICESE mediante este proyecto. Por compartirme su experiencia, y por todo el tiempo dedicado a la construcción y revisión de este trabajo principalmente en su parte numérica y las metodologías que la describen. Gracias totales.

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) por darme la oportunidad de realizar mi tesis de Licenciatura.

Al proyecto PN2016-2188 “Estimación y Evaluación del Potencial Geotérmico de Sistemas de Baja y Mediana Entalpía para usos Directos y Generación de Energía Eléctrica con Tecnología de Ciclo Binario: El Caso de las Calderas La Reforma y el Aguajito del Complejo Volcánico las Tres Vírgenes, Baja California Sur” (responsable técnico Dr. Efraín Gómez Arias) por su apoyo como becario en la modalidad de asistente de proyecto (con número de registro 28363) para realizar la presente tesis de Licenciatura.

Al M.I Eric Villanueva y la Dra. Cristina Castañon por sus enseñanzas y constante apoyo durante mi etapa de licenciatura en el programa Educativo Ingenieria en Energias Renovables de la UABC unidad valle de las Palmas.

A los Dres. Alexis Acuña, Emilio Hernandez y Rene Delgado también al M.I. Jesús Ruvalcaba e Ing. Jammin Quintana por su apoyo moral y técnico en mi primer acercamiento al área de la geotermia de baja entalpia.

A mis compañeros de carrera en UABC Valle de las Palmas; Alejandro, Angel, Alonso, Brianda, Carlos, Erik, Esteban, Francisco, Gabriel y Jhonattan. Por brindarme su amistad ante todo.

Índice

1. Introducción	9
1.1. Introducción a la energía geotérmica	9
1.1.1. Clasificación de sistemas geotérmicos	9
1.1.2. Calor	10
1.1.3. Entalpia	10
1.1.4. Geotermia de baja entalpia	11
1.2. Técnicas pasivas para climatización de edificaciones	11
1.3. Técnicas geotérmicas pasivas para climatización de edificaciones	12
1.3.1. Bombas de calor	12
1.3.2. Bombas de calor geotérmicas	14
1.3.3. Intercambiador de calor tierra-aire	15
1.3.4. Viviendas integradas al subsuelo	16
1.4. Antecedentes	17
1.4.1. Historia de la energía geotérmica	17
1.4.2. Escenario mundial de la Geotermia de baja entalpia	18
1.4.3. Climatización de edificaciones con EAHE	22
1.4.4. Cálculo de temperaturas del subsuelo	28
1.5. Objetivos	30
1.5.1. Objetivo general	30
1.5.2. Objetivos específicos	30
1.5.3. Hipótesis	30
2. Área de estudio	32
2.1. Condiciones meteorológicas	33
2.1.1. Temperatura ambiente	33
2.1.2. Radiación solar	34
2.1.3. Velocidad de viento	34

2.1.4. Humedad relativa	35
3. Metodología	36
3.1. Perfil de temperatura	36
3.1.1. Modelo físico	36
3.1.2. Modelo matemático	39
3.1.3. Método numérico	42
3.2. Intercambiador de calor tierra-aire	52
3.2.1. Modelo físico	52
3.2.2. Modelo matemático	53
3.3. Método de solución	55
4. Resultados y discusiones	56
4.1. Perfil de temperatura del subsuelo	56
4.1.1. Perfil de temperatura del subsuelo sin gradiente	56
4.1.2. Perfil de temperatura del subsuelo con gradiente	60
4.2. Intercambiador de calor tierra-aire	63
4.2.1. Modelado EAHE sin gradiente	63
4.2.2. Modelado EAHE con gradiente	70
5. Conclusiones	77
6. Recomendaciones	78

Índice de figuras

1.	Ciclo de refrigeración geotérmico.	14
2.	Termas de caracalla en Roma.	17
3.	Campo geotérmico Larderello, Italia.	18
4.	Campo geotérmico Los Geysers, California.	19
5.	Usos directos de la energía geotérmica.	21
6.	Tuneles de viento.	23
7.	Complejo volcánico Las Tres Vírgenes. El recuadro blanco muestra la localización de los pozos P1 y P2 perforados (tomado y modificado de Sena-Lozoya, 2019).	32
8.	Gráfica de temperatura ambiente obtenida de la estación meteorológica Santa Rosalía.	33
9.	Gráfica de radiación solar obtenida de la estación meteorológica Santa Rosalía.	34
10.	Gráfica de velocidad de viento obtenida de la estación meteorológica Santa Rosalía.	35
11.	Gráfica de humedad relativa obtenida de la estación meteorológica Santa Rosalía.	36
12.	a) Modelo físico b) Dominio computacional.	37
13.	Caracterización litologica del medio físico en estudio	38
14.	División del sistema bajo estudio.	43
15.	Representación física del nodo frontera en $y = 0$	49
16.	Diagrama de flujo para cálculo de temperaturas del subsuelo.	51
17.	Modelo físico EAHE.	52
18.	Perfil de temperatura sin gradiente geotérmico para el día más frío (03/02/2016) en la zona de estudio.	56
19.	Perfil de temperatura sin gradiente geotérmico para el día más cálido (05/06/2016).	58
20.	Perfil de temperatura con gradiente geotérmico para el día más frío (03/02/2016).	60
21.	Perfil de temperatura con gradiente geotérmico para el día más cálido (05/06/2016).	61
22.	Campo de temperatura EAHE (día frío 24:00 h) $Re = 100$, $T_{in} = 12.3^{\circ}C$, $T_{out} = 11.4^{\circ}C$	63
23.	Campo de temperatura EAHE (día frío 24:00 h) $Re = 500$, $T_{in} = 12.3^{\circ}C$, $T_{out} = 12.98^{\circ}C$	64
24.	Campo de temperatura (día frío 24:00 h) $Re = 1500$, $T_{in} = 12.3^{\circ}C$, $T_{out} = 13.22^{\circ}C$	65
25.	Campo de temperatura (día cálido 12:00 h) $Re = 100$, $T_{in} = 38.5^{\circ}C$, $T_{out} = 38.43^{\circ}C$	66

26.	Campo de temperatura (día cálido 12:00 h) $Re = 500, T_{in} = 38.5^{\circ}C, T_{out} = 34.53^{\circ}C$	67
27.	Campo de temperatura (día cálido 12:00 h) $Re = 1500, T_{in} = 38.5^{\circ}C, T_{out} = 35.23^{\circ}C$. . .	68
28.	Campo de temperatura con gradiente (día frío 24:00 h)	70
29.	Campo de temperatura EAHE con gradiente (Día frío 24:00 h)	71
30.	Campo de temperatura EAHE con efecto de gradiente (Día frío 24:00 h)	72
31.	Campo de temperatura EAHE con efecto de gradiente (Día cálido 12:00 h)	73
32.	Campo de temperatura EAHE con efecto de gradiente (Día cálido 12:00 h)	74
33.	Campo de temperatura EAHE con efecto de gradiente (Día cálido 12:00 h)	75

Índice de tablas

1.	Propiedades termofísicas de los pozos.	38
2.	Valores típicos de f	41
3.	Dimensiones del EAHE en estudio.	53
4.	Flujos de calor para el día mas frío.	57
5.	Flujos de calor para el día mas cálido.	59
6.	Efecto del gradiente térmico en la temperatura a 6 m	62
7.	Modelado del EAHE sin gradiente térmico.	69
8.	Modelado del EAHE con gradiente térmico.	76
9.	Funciones de temperatura para día cálido (05/06/16) sin gradiente térmico.	79
10.	Funciones de temperatura para día frío (03/02/16) sin gradiente térmico.	80
11.	Funciones de temperatura para día cálido (05/06/16) con gradiente térmico.	81
12.	Funciones de temperatura para día frío (03/02/16) con gradiente térmico.	82

1. Introducción

1.1. Introducción a la energía geotérmica

La energía geotérmica es la energía almacenada en forma de calor por debajo de la superficie sólida de la Tierra. Sus aplicaciones varían según la temperatura y las condiciones que presente el subsuelo en un punto comercialmente atractivo, como permeabilidad, porosidad, saturación entre otros factores. Los sistemas geotérmicos convencionales pueden clasificarse comúnmente en cuatro categorías.

1.1.1. Clasificación de sistemas geotérmicos

- **Alta temperatura: $T > 150\text{ °C}$** Una temperatura superior a 150 °C permite transformar directamente el vapor de agua en energía eléctrica.
- **Media temperatura: $90\text{ °C} < T < 150\text{ °C}$** Permite producir energía eléctrica mediante ciclos binarios, el calor del fluido geotérmico se transfiere a un fluido con bajo punto de ebullición generalmente de carácter orgánico derivado de hidrocarburos, el cual es vaporizado, turbinado y condensado posteriormente.
- **Baja temperatura: $30\text{ °C} < T < 90\text{ °C}$** Su poder calorífico es insuficiente para producir energía eléctrica, pero es adecuado para climatización de edificaciones, también para algunos procesos industriales, acuícolas y agrícolas.
- **Muy baja temperatura: $T < 30\text{ °C}$** Este recurso puede ser utilizado para climatización de edificaciones, generalmente utilizando bombas de calor.

Nota: En las zonas donde el subsuelo presenta temperaturas de baja o muy baja entalpia puede existir o no presencia de fluido. Estos dos intervalos de temperatura son destinados a usos directos de la energía geotérmica.

1.1.2. Calor

En la vida cotidiana es común llamar “calor” a las formas de energía interna en un sistema, como la energía cinética de las moléculas. Sin embargo, en termodinámica se hace referencia a esa forma de energía como energía térmica para evitar cualquier confusión con la transferencia de calor, por lo tanto, el calor se puede definir como la forma de energía transferible de un sistema a otro como resultado de una diferencia de temperaturas. Las únicas dos formas de interacción de energía en un sistema son el calor y el trabajo, un área de aplicación importante de la termodinámica es la conversión de calor en trabajo (Cengel, 2011).

1.1.3. Entalpia

Otro concepto importante en termodinámica es la entalpia que se define como la cantidad de energía térmica que un fluido o un sistema puede intercambiar con su entorno, se expresa en términos de unidad de energía por unidad de masa, usualmente en kJ/kg o kcal/kg. Al no existir instrumentos para medir directamente la entalpia, se requiere del uso de calorímetros y de la medición directa o indirecta de propiedades termofísicas del sistema en cuestión (sólido, líquido o gas).

En el caso de aplicaciones geotérmicas, se utilizan métodos de exploración térmicos que permitan medir o estimar la temperatura del fluido almacenado en el yacimiento, y para el caso donde existen anomalías térmicas y/o ausencia de saturación (fluido) se requiere medir o estimar la temperatura del subsuelo y las propiedades termofísicas de las rocas para poder inferir la entalpia del sistema, en donde es común hacer referencia a la entalpia como el estado térmico del sistema.

Los yacimientos geotérmicos de alta y mediana entalpia (sistemas hidrotermales convencionales o comerciales) se utilizan en su mayoría para la generación de energía eléctrica. Los sistemas de baja y muy baja temperatura pueden ser utilizados para usos directos de la geotermia, siendo el interés de este proyecto evaluar este tipo de sistemas ubicados en el complejo volcánico Las Tres Vírgenes.

1.1.4. Geotermia de baja entalpia

Desde los inicios de la vida en la tierra humanos y diferentes especies animales se resguardan del frío en invierno y del calor en verano excavando madrigueras en tierra. Antes de aprender a utilizar el fuego y construir cabañas, buscaron protección de las inclemencias meteorológicas en cavernas y cuevas subterráneas, donde la inercia térmica de rocas y suelos contribuye a que los aumentos y descensos de la temperatura ambiente sean menores y mas lentos.

Esta energía térmica almacenada a poca profundidad recibe en la bibliografía diferentes denominaciones: geotermia somera, geotermia solar, energía geotérmica de baja entalpia, usos directos de la geotermia, etc (Trillo, 2010).

La energía geotérmica de baja entalpia es aquella que aprovecha la inercia térmica del subsuelo a profundidades someras, donde por lo general la temperatura no es suficiente para llevar un fluido a su fase de vapor, pero es apta para aplicaciones como: climatización de edificaciones, secado de alimentos, etc.

Esta inercia térmica del subsuelo se presenta en cualquier parte de la plataforma terrestre, pero sus características varían en función de diferentes factores, como la composición del suelo y las condiciones meteorológicas de la zona. En algunas zonas con condiciones térmicas anómalas como las zonas volcánicas, el perfil de temperatura puede ser afectado por gradientes térmicos.

1.2. Técnicas pasivas para climatización de edificaciones

En diferentes zonas geográficas del mundo, principalmente en zonas áridas o desérticas, se vuelve necesaria la implementación de diferentes tipos de técnicas para alcanzar un confort térmico, por lo general estas corresponden a sistemas de acondicionamiento de aire por compresión de vapor operados mediante motores eléctricos. Este tipo de sistemas constituyen una parte considerable del consumo energético de la edificación, además de que liberan clorofluorocarbonos (CFC) a la atmósfera, contribuyendo con esto a la contaminación global.

Las técnicas pasivas utilizan fuentes naturales de energía y en algunas ocasiones una pequeña cantidad de energía convencional (generalmente para hacer circular un fluido) con el propósito de establecer un confort térmico en edificaciones, generando ahorros en su consumo energético y por ende un menor impacto ambiental.

1.3. Técnicas geotérmicas pasivas para climatización de edificaciones

En las últimas décadas los usos directos de la energía geotérmica se han vuelto una opción cada vez más atractiva como técnica pasiva para climatización de edificaciones, principalmente tres tipos de aplicaciones: Bomba de calor geotérmica (GSHP, por sus siglas en ingles), Intercambiador de calor tierra aire (EAHE, por sus siglas en ingles) y la integración directa de viviendas a la tierra (Singh, et al, 2016).

Un panorama favorable para el desarrollo y la instalación de estos sistemas surge debido al establecimiento de regulaciones y lineamientos sobre el desempeño termo energético en nuevas construcciones o remodelación de edificaciones principalmente en Estados Unidos y Europa. De igual forma existen diferentes tipos de apoyos, certificaciones e incentivos a edificaciones que cuentan con consumos bajos o nulos de energía convencional.

1.3.1. Bombas de calor

Una bomba de calor es una maquina térmica basada en el ciclo termodinámico de Carnot, su principio de funcionamiento consiste en transferir calor de una fuente con baja temperatura a otra con una temperatura mayor, siendo necesario el suministro de energía (comúnmente eléctrica) desde el exterior para realizar una transferencia de calor en sentido inverso, la cantidad de energía necesaria para realizar el transporte de calor (bombeo) estará determinada según el nivel de energía térmica disponible en su fuente de calor (Cengel, 2011).

Las bombas de calor pueden ser suministradas por los siguientes tipos de energía:

-
- Energía eléctrica (electro-compresor)
 - Energía mecánica (compresión mecánica con turbinas de expansión)
 - Energía termomecánica (sistema de eyectores de vapor)
 - Energía térmica (ciclo de absorción)
 - Energía termoeléctrica (efecto Peltier)

La principal ventaja que presenta frente a otros sistemas convencionales de climatización es su capacidad para aprovechar la energía térmica existente en un medio (fuente de calor) como:

- **Aire:** Aire ambiente, aire caliente de procesos de ventilación, gases calientes de procesos industriales.
- **Agua:** Agua superficial (lago, océano o río); agua subterránea, descargas de agua caliente (doméstica, tecnológica y la recirculada en torres de enfriamiento).
- **Tierra:** El subsuelo por medio de excavaciones y/o perforaciones a diferentes profundidades.

Dependiendo de la fuente de calor que utilice la bomba puede ser denominada como: geotérmica, aerotérmica o hidrotérmica. Por lo tanto, podemos clasificar a las bombas de calor según su fuente (aire, agua o tierra) así como al fluido al que se transfiere el calor del medio (aire o agua):

- Bomba de calor aire-aire
- Bomba de calor aire-agua
- Bomba de calor agua-aire
- Bomba de calor agua-agua
- Bomba de calor tierra-aire
- Bomba de calor tierra-agua

NOTA: Las últimas dos corresponden a las denominadas geotérmicas.

Los usos de las bombas de calor en el sector residencial son: climatización de espacios (calefacción y refrigeración); generación de agua caliente sanitaria (ACS); climatización de piscinas (balneología).

Mientras que en el sector industrial se pueden encontrar aplicaciones de secado y destilación, desalinización de agua, calentamiento de agua, entre otros.

1.3.2. Bombas de calor geotérmicas

Una bomba de calor geotérmica (BCG) aprovecha la diferencia de temperatura entre el aire interior de la edificación y el subsuelo para bombear energía térmica desde o hacia este, de forma que extrae energía térmica del suelo en invierno transfiriéndola al interior de la edificación, mientras que en verano extrae el calor del interior de la edificación y lo disipa en el subsuelo. Es decir, utiliza el subsuelo como fuente o sumidero de calor según la estación del año (ATECYR, 2010). El transporte de calor se realiza a través de un fluido de trabajo que circula dentro de una tubería enterrada (sonda geotérmica) para posteriormente incorporarse al ciclo de la bomba de calor tal como lo muestra la Figura 1.

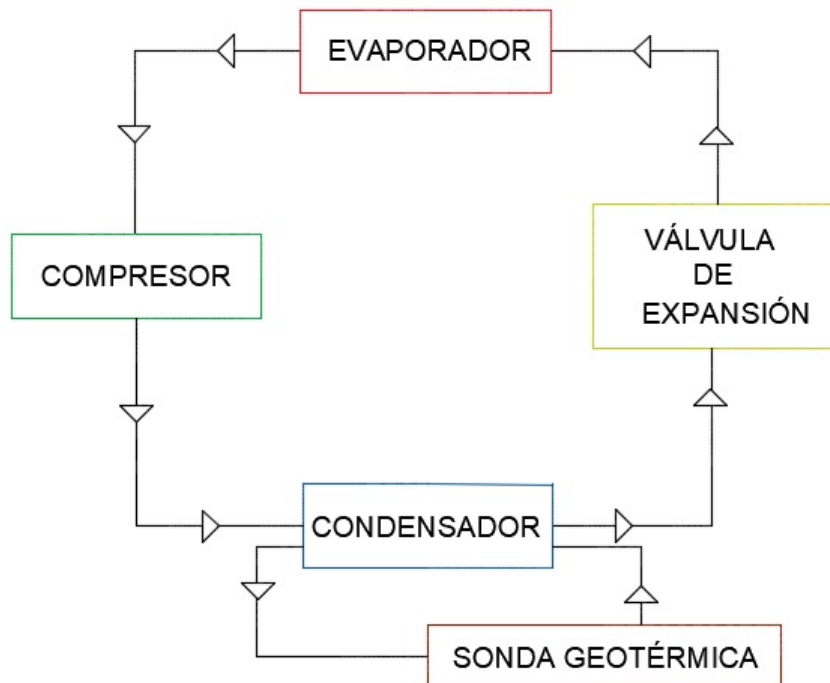


Figura 1: Ciclo de refrigeración geotérmico.

De acuerdo con la Agencia de Protección al Ambiente (EPA, por sus siglas en inglés) las bombas de calor geotérmicas pueden reducir el consumo de energía y sus emisiones correspondientes cerca de un 44 % con respecto a las bombas de calor aerotérmicas y 72 % comparado con un sistema de climatización convencional. Este sistema de climatización está compuesto básicamente por los mismos dispositivos de un sistema de climatización convencional, pero en este caso una parte del sistema se encuentra dentro de la edificación (bomba de calor) y otra enterrada bajo tierra (sonda geotérmica) ambas partes son duraderas y seguras, se estima que la vida útil de la bomba de calor ronda los 20 años y la tubería enterrada (PVC, Polietileno) es de 25 a 50 años.

1.3.3. Intercambiador de calor tierra-aire

Un intercambiador de calor tierra aire está formado por una o más tuberías integradas al subsuelo en diferentes configuraciones, el objetivo de este sistema es circular aire a través de la tubería (utilizando un dispositivo impulsor) para ser calentado o enfriado según la temporada del año y posteriormente introducirse en una edificación con propósitos de climatización. La aplicación de esta tecnología ha mostrado un crecimiento en diferentes zonas geográficas durante las últimas décadas, debido principalmente a los casos de éxito que han surgido con su aplicación. Este tipo de sistemas pueden operar de forma independiente o en modo híbrido, es decir, acoplados a un sistema de climatización convencional para reducir su consumo energético.

Las propiedades termofísicas del subsuelo juegan un papel fundamental dentro del diseño de un intercambiador de calor tierra-aire. La conductividad térmica es el factor más importante que se debe tener en cuenta, por lo tanto es conveniente identificar el tipo de suelo y rocas presentes en la zona, y la variación de estas en función de la profundidad.

Una vez realizada la instalación, los factores más influyentes en el desempeño del intercambiador de calor son: contenido de humedad del subsuelo, dispositivo impulsor de aire y material de la tubería.

Uno de los primeros factores a considerar en la instalación de un intercambiador de calor tierra-aire es la caracterización geológica del subsuelo en el sitio de interés. La presencia de acuíferos y/o cuerpos rocosos a profundidades someras podría llevar al diseñador a considerar la instalación de

otros sistemas como las bombas de calor geotérmicas (Ozgener, 2011).

Los intercambiadores de calor tierra aire tienen varias ventajas sobre otros sistemas de climatización convencional y no convencional, por ejemplo:

- Menor costo inicial
- Menor mantenimiento
- Menor consumo de energía
- Menor emisión de contaminantes
- No usan compresor ni refrigerantes
- El único fluido de trabajo es aire
- Cuentan un diseño más sencillo
- No requieren disponibilidad de espacio dentro de la edificación

Es conocido que este tipo de sistemas tienen un menor rendimiento en zonas áridas, donde comúnmente se vuelve necesario instalar tuberías largas para alcanzar la temperatura de salida deseada.

1.3.4. Viviendas integradas al subsuelo

Este tipo de viviendas aprovechan directamente la inercia térmica del subsuelo para proveer confort térmico en su interior en cualquier temporada del año, disminuyendo el consumo energía en la edificación. Este de ahorro de energía resulta del hecho que el ambiente inmediato que rodea a este tipo de viviendas (suelo) es más cálido en invierno y más fresco en verano que el aire ambiente que rodea a las edificaciones expuestas.

Algunos autores han reportado datos de estudios correspondientes al tratamiento de la tierra que rodea a la edificación (Jayashankar, et al, 1989; Ho Lee, et al, 2006) tales como acristalamiento, humedecimiento, oscurecimiento y sombreado los cuales tienen un efecto significativo sobre el desempeño térmico de una edificación parcialmente enterrada.

La utilización de la geotermia como fuente de energía para sistemas de climatización de espacios es una opción eficiente debido a la temperatura constante que presenta el subsuelo a cierta profundidad en comparación con aire o agua (Jayashankar, et al, 1989).

1.4. Antecedentes

1.4.1. Historia de la energía geotérmica

La energía geotérmica es considerada una fuente de energía limpia y renovable, la cual se obtiene a través del aprovechamiento del calor interno de la tierra. El uso de esta energía tiene su origen varios siglos atrás, se sabe que algunas poblaciones utilizaban aguas termales con propósitos de balneología. Posteriormente fue la civilización romana entre el año 212 y 217 quienes dejaron ejemplos de la aplicación de la energía geotérmica con sus tradicionales termas (baños públicos), se estima que las termas de Caracola en Roma (Figura 2) podían albergar alrededor de 1600 personas. Los usos directos de la energía geotérmica continuaron aplicándose en diferentes partes del mundo, en 1330 ya existía una red de distribución de agua caliente en algunas casas en Chaudes-Aigues, Francia para lavar lana y pieles (Trillo, 2010).



Figura 2: Termas de caracalla en Roma.

En el siglo XIX el descubrimiento de sales de Boro en Larderello, Toscana (Italia) marcó el inicio de la utilización industrial de los recursos geotérmicos, que se dio finalmente en el año de 1827 con François Larderel, quien desarrolló un sistema para aprovechar el calor de los fluidos durante el proceso de evaporación para suplir la quema de madera y frenar la creciente deforestación. Fue hasta el siglo XX (1904) donde la industria del ácido Bórico abrió paso a la primera planta generadora de energía eléctrica mediante un yacimiento de vapor geotérmico (Figura 3). Para el

año 1913 dicha planta geotérmica registró una capacidad instalada de 250 kW. La expansión de la tecnología se dio a ritmo lento durante la primera mitad del siglo, a partir de 1950 países como Nueva Zelanda (1958), Estados Unidos (1960) y Japón (1961) pusieron en operación sus primeras plantas geotermoeléctricas (Harsh Gupta, 2007).



Figura 3: Campo geotérmico Larderello, Italia.

Las primeras aplicaciones de geotermia en el continente americano se reportan en E.E.U.U. donde se implementó una red local de calefacción urbana, la cual entró en funcionamiento en 1892 en Boise, Idaho. La primera instalación de climatización con bomba de calor geotérmica entró en funcionamiento en 1945 en Indianápolis en la casa de Robert C. Webber empleado de Indianápolis Power and Light Company. En la actualidad E.E.U.U. es el líder a nivel mundial en generación geotermoeléctrica con una capacidad instalada de 3,450 MW (Bertani, 2016). California es el estado con mayor aportación a la generación nacional con una capacidad instalada de 2,719 MW, cabe mencionar que cuenta con el campo geotérmico más grande del mundo, Los Geysers (Figura 4) con 1,548 MW.

1.4.2. Escenario mundial de la Geotermia de baja entalpia

La energía geotérmica de baja entalpia actualmente es utilizada alrededor del mundo para diferentes propósitos como: acuicultura, balneología, climatización de edificaciones, desalinización de



Figura 4: Campo geotérmico Los Geysers, California.

agua, secado agrícola, etc. (Lund y Boyd, 2016). La geotermia como fuente de energía renovable, produce bajas emisiones de CO_2 a la atmósfera (en promedio 95 % de las emisiones de una planta geotermoeléctrica es vapor de agua), generando bajo impacto negativo al medio ambiente. A nivel global, el aprovechamiento actual de la geotermia de baja entalpia equivale a reducir el consumo de 352 millones de barriles de petróleo anuales (comparado con procesos convencionales para generar energía eléctrica) y la emisión de 149.1 millones de toneladas de CO_2 (Lund y Boyd, 2016).

El crecimiento de los usos directos de la geotermia a nivel mundial tiene una tendencia de aumento en los últimos 10 años (2005-2015). En el año 2005 la capacidad instalada a nivel mundial fue de 28,269 MWt y para el año 2015 se reportó una capacidad de 70,885 MWt, lo que representa un aumento de aproximadamente 150 % en los últimos 10 años (Lund y Boyd, 2016).

En México, la energía geotérmica es destinada principalmente a generación de energía eléctrica. Hasta el año 2017 la capacidad total reportada fue de 982.3 MW, que equivale aproximadamente al 2 % del consumo de energía eléctrica del país, la cual se genera en 5 campos geotérmicos: Cerro prieto (BC) con 570 MW; Los Azufres (Michoacán) con 247.9 MW; Los Humeros (Puebla) con 118.9 MW y; Las Tres Vírgenes (BCS) con 10 MW. El quinto campo es de la iniciativa privada del Grupo Dragón, conocido como Domo San Pedro (Nayarit) con una capacidad de 35.5 MW. Los usos directos de energía geotérmica en el país se encuentran en desarrollo, hasta la fecha se ha

registrado una capacidad total instalada de 148.6 MWt (energía térmica del subsuelo) principalmente con propósitos de balneología (recreacional, terapéutica) (Romo-Jones et al, 2018).

En las últimas décadas se han desarrollado diferentes técnicas para aprovechar la energía térmica del subsuelo a profundidades someras, principalmente intercambiadores de calor, como el tipo tierra-aire (EAHE, por sus siglas en inglés) y las bombas de calor geotérmicas (GSHP, por sus siglas en inglés) ambas tecnologías tienen su principio de funcionamiento basado en una tubería enterrada (intercambiador de calor geotérmico) que hace circular dentro de ella un fluido de trabajo (aire, agua). En este tipo de sistemas la transferencia de calor se da entre el subsuelo y el fluido de trabajo, ya sea para disipar calor hacia el medio (subsuelo) o retirar calor de este. El propósito es climatizar una edificación ya sea aumentando o disminuyendo la temperatura interior según la temperatura ambiente exterior y las necesidades térmicas del inmueble.

Las bombas de calor geotérmicas son la tecnología más utilizada en diferentes países y regiones del mundo para usos directos (principalmente para climatización de edificaciones) y representa el 70 % (50,258 MWt) de la capacidad mundial instalada (70,885 MWt) (Figura 5), el 30 % restante se utiliza para: balneología (13 %), calentamiento de espacios (11 %), calentamiento de invernaderos (3 %), acuicultura (1 %), usos industriales (1 %), deshielo (0.5 %), otros (0.5 %) (Lund y Boyd, 2016).

En la clasificación realizada por John W. Lund (2015) sobre los países con mayor capacidad instalada MW_t con usos directos de la energía geotérmica China está ubicado en el primer lugar con 17,870 MW_t . El rápido crecimiento de la instalación de bombas de calor geotérmicas hizo que aumentara el área climatizada de 100 a 330 hectáreas del 2009 al 2014. Según datos reportados, China permanece como líder en usos directos aun sin considerar las bombas de calor geotérmicas, ya que su mayor aplicación es la balneología (terapéutica) (Lund y Boyd, 2016).

En segundo lugar, se encuentra Estados Unidos muy cercano a China con una capacidad de 17,416

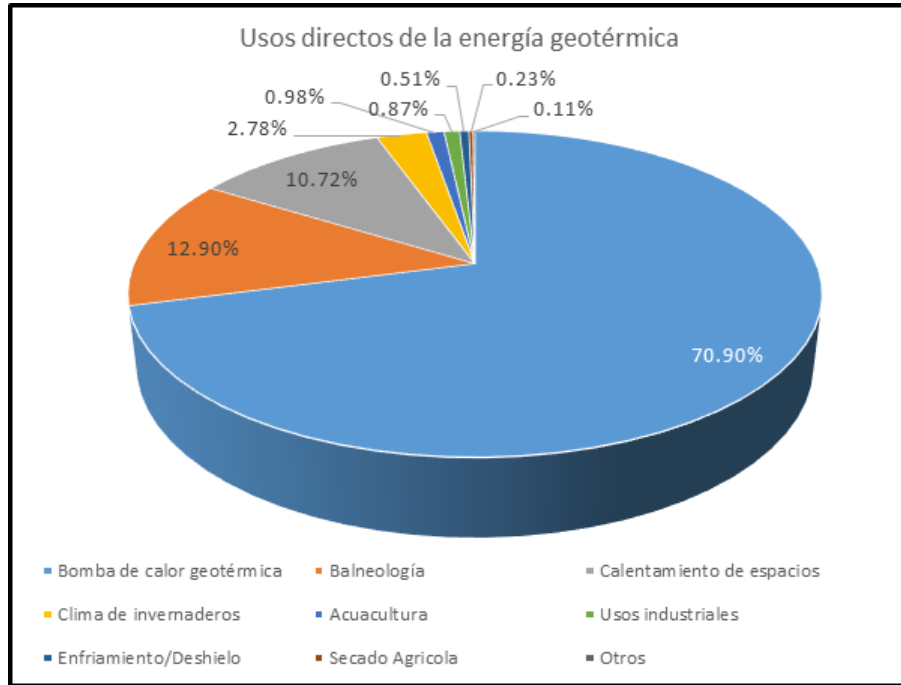


Figura 5: Usos directos de la energía geotérmica.

MW_t , de los cuales $16,800 MW_t$ (96 %) corresponden a bombas de calor geotérmicas. Actualmente continúan con el desarrollo y aplicación de diferentes tecnologías para aprovechar la geotermia de baja entalpia. Sin considerar la instalación de bombas de calor geotérmicas en el país, la distribución de usos directos es la siguiente: cultivo de peces (34 %); balneología (28 %); calefacción de espacios individuales (9 %); climatización de invernaderos (9 %); calefacción urbana (9 %); secado agrícola (2 %); procesos industriales (2 %); enfriamiento (<1 %) y; deshielo (<1 %).

El tercer lugar lo ocupa Suecia con una capacidad instalada de $5,600 MW_t$. La energía geotérmica en el país en su mayor parte es de baja entalpia. El 20 % de las edificaciones en Suecia usan bomba de calor geotérmica para climatización de edificaciones y obtención de agua caliente sanitaria, principalmente sistemas verticales perforados sobre roca dura. Se reporta que existen cerca de 500,000 bombas de calor geotérmicas instaladas en el país, de las cuales 10,000 son de circuito abierto (agua del subsuelo como fluido de trabajo).

Turquía ocupa el cuarto lugar con una capacidad instalada de $2,937 MW_t$. Estudios han reportado

que el país cuenta con más de 227 campos geotérmicos y cerca de 2000 fuentes de agua caliente y mineral (reservorios y pozos) los cuales presentan un rango de temperaturas entre 20 y 287 °C. Actualmente el país cuenta con 17 sistemas de calefacción urbana en operación usando agua del subsuelo con una temperatura entre 40 y 45 °C sin el uso de bombas de calor geotérmicas. Ese sistema suministra a 80,453 residencias.

Alemania es el quinto país con mayor capacidad instalada a nivel mundial con 2,849 MW_t . El uso más común de la geotermia en el país son las plantas de calefacción urbana y plantas combinadas (calor y potencia) suministradas por agua subterránea con temperaturas arriba de los 20 °C obtenida de pozos con profundidad cercana a los 400 m. En el año 2013 se reportaron cerca de 550,000 bombas de calor instaladas en el país (incluyendo las de tipo agua-aire).

Estas cinco naciones líderes en usos directos de la geotermia representan el 68.5% de la capacidad mundial instalada 70,885 MW_t .

1.4.3. Climatización de edificaciones con EAHE

Aproximadamente en el año 3000 a.c. en distintas regiones del medio oriente se utilizaron torres y túneles de viento subterráneos con propósitos de refrigeración para edificaciones ubicadas en climas áridos y cálidos. Esta aplicación tiene su origen en la antigua arquitectura iraní, consiste en crear ventilación natural hacia la edificación a través de un captador de aire ubicado en el exterior Figura 6.

En 1875, J. Wilkinson un arquitecto rural de Baltimore, comenzó la construcción de un granero que concluyó en 1878. Este granero contaba con un túnel subterráneo con 150 metros de longitud para regular la temperatura de los establos para vacas lecheras en temporada de verano, manteniéndolos a 17°C (USDA, 1960).

Debido al auge de la revolución industrial este tipo de técnicas pasivas fueron sustituidas por sistemas de climatización convencionales como aires acondicionados y coolers. Desde finales del siglo



Figura 6: Tuneles de viento.

XX con el surgimiento de una problemática ambiental y energética, un gran número de investigadores comenzaron a estudiar nuevamente el potencial de este tipo de técnicas pasivas que tienen como finalidad proporcionar confort térmico y ahorro energético en edificaciones.

En las últimas décadas ha aumentado la instalación de sistemas de climatización que utilizan como fuente algún tipo de energía renovable, y a su vez el número de estudios realizados con la finalidad de mejorar la eficiencia de este tipo de sistemas.

Para el caso de los sistemas de climatización de espacios que utilizan intercambiadores de calor geotérmicos, existen diversos estudios para determinar los factores más relevantes en este tipo de sistemas y analizar su sensibilidad. Algunos se limitan a estimar el perfil de temperatura en el subsuelo de forma numérica para posteriormente validarla experimentalmente con el fin de desarrollar modelos de predicción. Otros reportan resultados del análisis numérico y/o experimental sobre flujo de calor del intercambiador de calor con el medio (subsuelo), y algunos otros reportan el análisis termo energético de edificaciones con intercambiadores de calor geotérmicos acoplados como sistemas de climatización de espacios, otros a la revisión de costos, ventajas y desventajas de este tipo de sistemas.

Lee et al. (2006) realizaron un estudio del potencial de calefacción y refrigeración de un intercambiador de calor tierra-aire en cuatro ciudades de Estados Unidos de América con condiciones climatológicas diferentes: Spokane, Washington (templado seco); Peoria, Illinois (templado húmedo); Phoenix, Arizona (caluroso y seco) y Key West, Florida (caluroso y húmedo). En sus resultados obtuvieron una reducción en la carga de refrigeración de 6.6 y 8.8 kWh las cuales representan un ahorro energético del 31 y 52% para los casos de Peoria y Spokane, respectivamente. Los autores destacan la influencia que tiene la longitud y la profundidad de la tubería enterrada, así como la velocidad del aire en el desempeño de este tipo de sistemas, descartando que el desempeño del intercambiador de calor dependa intensamente del radio de la tubería enterrada.

Ramírez Dávila et al. (2011) reportan datos de simulaciones correspondientes a un intercambiador de calor tierra-aire realizadas durante un periodo de un año en tres ciudades de México con la finalidad de comparar su desempeño en un clima extremo (Ciudad Juárez, Chihuahua); un clima templado (Ciudad de México, México) y un clima húmedo caluroso (Mérida, Yucatán) teniendo como tipos de suelo arena, limo y arcilla respectivamente. Los resultados indican que para Ciudad Juárez y Ciudad de México el intercambiador de calor tierra-aire tiene un mejor desempeño en verano que en invierno, los datos obtenidos reportan una disminución en la temperatura interior de la edificación de 6.6°C (Ciudad Juárez) y 3.2°C (Ciudad de México) en los meses de verano y un incremento de 2.1°C y 2.7°C respectivamente en los meses correspondientes al periodo de invierno. Por otro lado, en Mérida presentó un mejor comportamiento en el periodo de invierno incrementando la temperatura del aire interior en 3.8°C. Concluyendo que el uso de un intercambiador de calor tierra-aire es apropiado en zonas donde la inercia térmica del subsuelo es alta.

Posteriormente, Xaman et al. (2014) reporta los efectos de la aplicación de un aislamiento en la salida del intercambiador de calor tierra-aire (sección vertical), esto para evitar las pérdidas o ganancias de calor no deseadas en la parte final del intercambiador de calor. Para estudiar el efecto del aislante, se realizaron pruebas con diferentes espesores (0.025, 0.05 y 0.075 m) en las mismas tres ciudades anteriores (Cd. Juárez, Cd. de México y Mérida) donde se obtuvieron resultados

en general favorables para la temperatura de salida del aire con un aumento de 2°C y 1.3°C para propósitos de calefacción y refrigeración respectivamente, se llegó a la conclusión que el aislamiento de 0.05 m de espesor es el óptimo, poniendo en evidencia que un gran incremento en el espesor del aislante no representa un efecto significativo en la temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor.

De igual forma Ralegaonkar et al. (2014) elaboraron una metodología para el diseño de un sistema de climatización con energía geotérmica, la cual fue aplicada para un caso de estudio en una edificación educativa localizada en Nagpur, India. El estudio consistió en comparar el consumo energético del sistema propuesto con un sistema de aire acondicionado, para una demanda térmica de dos toneladas de refrigeración operando 8 horas diarias (10 a.m.- 6 p.m.) durante tres meses (abril-junio). El sistema geotérmico estaba formado por un serpentín hecho mediante tubería de polietileno de alta densidad con diámetro de 4" pulgadas, con una longitud de 84 metros. Ellos encontraron que el ahorro de energía eléctrica en comparación con el sistema de aire acondicionado es del 90 %.

Choudury et al. (2013) llevaron a cabo un estudio experimental sobre el diseño de un intercambiador de calor tierra-aire utilizando materiales de bajo costo; como bambú y una mezcla de cemento y yeso para reducir el consumo energético en el sector agrícola y residencial. El estudio fue realizado en la parte noreste de la India. El bambú se utilizó para la construcción de la tubería del intercambiador de calor y la mezcla de cemento y tierra para mejorar su conductividad térmica. Ellos realizaron el experimento de forma continua durante 7 días, del 1 al 7 de mayo de 2007 donde la temperatura máxima y mínima observada fue de 37°C y 21°C respectivamente. Los resultados muestran que independientemente el rango de la temperatura de entrada ($35\text{-}40^{\circ}\text{C}$) la temperatura de salida se mantuvo entre los 25 y 26°C .

En 2016, Serageldin et al. presentaron un estudio numérico validado experimentalmente sobre el desempeño térmico de un intercambiador de calor tierra-aire en Egipto, el estudio se enfoca en analizar los efectos generados por el espacio de separación entre la tubería del intercambiador de

calor (serpentín), la longitud de la tubería y el material por el que está constituida. Ellos concluyeron que la diferencia en la temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor hecho de tubería PVC (19.7°C) es despreciable comparada con una de acero (19.8°C) o cobre (19.8°C), principalmente por sus precios.

Mohamed Khabbaz et al. (2016) realizaron un estudio experimental y numérico del desempeño de un intercambiador de calor tierra-aire con 6 pulgadas de diámetro y 77.7 metros de longitud para propósitos de refrigeración en una edificación durante el verano en un clima calido semi-árido en Marrakech, Marruecos. Sus resultados fueron exitosos al observar que el sistema suministra una temperatura casi constante de 25°C con aproximadamente 40 % de humedad, mientras la temperatura ambiente exterior alcanza los 40°C .

Ascione et al. (2016) reportaron el estudio del efecto que tiene un intercambiador de calor tierra-aire sobre la disminución del consumo energético en una edificación bajo un clima mediterráneo en la ciudad de Palermo, Italia. Los autores compararon el intercambiador de calor tierra-aire con un sistema de ventilación mecánica convencional, también realizaron un estudio paramétrico sobre el desempeño del intercambiador de calor en función de la variación del flujo volumétrico de aire. En el periodo de invierno, ellos reportan una reducción del 29 % en el consumo energético de la edificación comparado con el sistema de ventilación mecánica y recomiendan operar con el mínimo flujo de aire requerido. Bajo condiciones de verano, reportaron reducciones energéticas entre el 36 y 46 %, lo cual es un ahorro significativo debido a los altos requerimientos energéticos que caracterizan a la estación de verano en climas mediterráneos, el mejor escenario de ahorro energético en verano resulto utilizando el máximo flujo de aire requerido.

Ese mismo año, Belatrache et al. (2016) reportaron los resultados de su análisis numérico para un intercambiador de calor tierra-aire en climas áridos de Algeria. Donde estudiaron la influencia que tienen la profundidad y la longitud de la tubería sobre la temperatura del aire a la salida del intercambiador, los autores encontraron que el óptimo desempeño del intercambiador de calor es utilizando una tubería enterrada a 3 metros de profundidad con una longitud de 45 metros donde

la temperatura del aire cae desde los 46°C del ambiente hasta 26°C. Cabe mencionar que el aire alcanza los 26°C habiendo recorrido 30 metros de longitud por lo que se puede inferir que una tubería un poco más corta tendría el mismo desempeño.

En 2017 Cuny et al. probaron diferentes tipos de revestimiento sobre el suelo (arena, arena con bentonita y tierra del sitio) para cuantificar el impacto que tienen sobre el desempeño energético de un EAHE, utilizando un nuevo modelo numérico basado en el método del elemento finito (MEF) validado experimentalmente con mediciones de temperatura para intercambiador de calor y el subsuelo en la universidad de Strasbourg, Francia. Ellos encontraron que un revestimiento con la capacidad de almacenar agua, como el caso de la mezcla arena-bentonita, es la mejor opción para mejorar el desempeño de un intercambiador de calor tierra aire.

Shojaee et al. (2017) estudiaron el comportamiento de un EAHE para cuatro climas diferentes (desértico, estepa, nevado y templado) de Irán. Basándose en un modelo transitorio tridimensional, validado experimentalmente con datos de otra investigación. Este estudio analiza la disminución de la carga térmica en una edificación con un sistema EAHE acoplado. Ellos reportan resultados favorables para los cuatro escenarios. El mejor desempeño fue en la ciudad de Hamadan (clima nevado), con una reducción de carga térmica de aproximadamente 45%. El desempeño menos favorable corresponde a la ciudad de Ahvaz (clima desértico) donde las reducciones de carga térmica están cerca del 25%.

Yusof et al. (2018) desarrollaron un laboratorio simulador de EAHE formado por una tubería de PVC con diámetro de cuatro pulgadas y longitud de 8.7 metros. Ellos estudiaron el comportamiento de este simulador bajo diferentes condiciones estacionarias; flujo de aire (0.03, 0.05 y 0.07 kg/s) y temperatura del suelo (23, 24 y 25°C). Sus resultados indican que las condiciones óptimas para la operación del EAHE corresponden al flujo mínimo (0.03 kg/s) y la temperatura más baja (23°C), donde las reducciones de temperatura fueron de 27.5% en comparación con la temperatura del aire en la entrada del intercambiador de calor.

Li et al. (2018) realizaron un estudio experimental para analizar la factibilidad de implementar un EAHE como sistema de calefacción en climas helados. Ellos propusieron un sistema formado por tubería de acero con 10 pulgadas de diámetro y 36 metros de longitud. Este sistema fue diseñado con una sección superior (enterrada a dos metros) y una sección inferior (enterrada a 5 metros) conectadas en forma de “U”, esto con la finalidad de ahorrar espacio y mejorar la transferencia de calor. Sus resultados mostraron un aumento de 14°C en la temperatura del aire a la salida del intercambiador de calor.

Kumar et al. (2019) realizaron un estudio enfocado en la comparación de dos sistemas EAHE con las mismas características (tubería de PVC con un diámetro de 4 pulgadas y 60 metros de longitud) para un suelo seco y uno húmedo. Para mantener la humedad del suelo constante durante el tiempo de operación del EAHE los autores construyeron e implementaron un sistema de impregnación de agua, formado por tubería PVC de 1” introducida verticalmente, a lo largo de la cual se hicieron pequeños agujeros de 0.1” por los que fluye el agua hacia las diferentes capas del subsuelo. Ellos encontraron que el COP del EAHE puede mejorarse desde un 15.8 % hasta un 26.1 % aplicándole un contenido de humedad del 5 y 15 % respectivamente.

1.4.4. Cálculo de temperaturas del subsuelo

Para poder analizar el desempeño térmico del EAHE es imprescindible conocer la variación de temperatura en función de la profundidad y la temporada del año; en ese sentido existen estudios numéricos y experimentales en los que se considera el efecto de las variables climáticas sobre el comportamiento térmico del subsuelo. Por ejemplo, Krarti et al. (1995) desarrollaron una solución analítica para predecir la temperatura del suelo a diferentes profundidades, utilizando como datos de entrada las condiciones meteorológicas y propiedades del suelo en el sitio de interés; considerando estas últimas constantes. Ellos consideran que el flujo radiativo de onda larga es un valor constante de 63 W/m^2 . Los resultados que encontraron fueron validados correctamente con mediciones experimentales.

Ozgener et al. (2013) implementaron un modelo mas accesible para realizar aproximaciones de

la variación diaria de temperatura en el subsuelo, este modelo analítico utiliza únicamente datos calculados a partir de la temperatura ambiente; como la temperatura media anual T_m y la amplitud de onda de temperatura A_s . Los resultados obtenidos fueron comparados con mediciones experimentales reportando un porcentaje de error cercano al 10%, por lo que los autores afirman que este método simplificado de transferencia de calor puede ser utilizado como una herramienta útil para aplicaciones de ahorro energético en agricultura e ingeniería.

Más tarde, Singh et al. (2017) desarrollaron un estudio numérico para predecir la temperatura del subsuelo en función de la profundidad y el tiempo, utilizando el método de diferencias finitas. Ellos consideraron despreciable el flujo de calor latente de evaporación CL . Asimismo, sus resultados fueron validados con mediciones experimentales de la temperatura del subsuelo para el día más cálido y frío de acuerdo a los datos meteorológicos de la estación de Jamshedpur, India.

Todos los estudios para el cálculo de temperatura del subsuelo mencionados anteriormente parten de la solución para la ecuación unidimensional de transferencia de calor por conducción en estado transitorio (1), ya sea analítica o numéricamente. El perfil de temperatura obtenido puede ser utilizado para calcular las pérdidas o ganancias de un intercambiador de calor integrado al subsuelo. Para obtener el perfil de temperatura de la zona de interés, en el presente estudio se considera la conducción de calor unidimensional en estado transitorio a través del subsuelo, el cual se encuentra sujeto a pérdidas convectivas, radiativas y de evaporación en la superficie. La discretización de la ecuación diferencial de transferencia de calor por conducción unidimensional (1D) en estado transitorio sin generación de calor, se realizó con el método de volumen finito (MVF) descrito más adelante. La solución de la ecuación considera el cambio en las propiedades termofísicas del subsuelo en función de la profundidad, basado en información litológica reportada por (Sena, 2019). De igual forma el flujo radiativo de onda larga no se considera constante. Para el balance de energía en la superficie se utilizaron datos climáticos de la estación meteorológica Santa Rosalía, medidos cada diez minutos, los cuales corresponden al año 2016.

En acuerdo con resultados y conclusiones reportados en párrafos anteriores, el desempeño de un

EAHE no se ve afectado por el material de la tubería enterrada, siendo el costo y la vida útil los factores a considerar para la selección del material (Serageldin, et al, 2016). En cambio las propiedades del subsuelo impactan significativamente el desempeño de este tipo de sistemas, algunos autores (Kumar, et al, 2019) han concluido que un suelo mojado y/o húmedo es óptimo para un correcto desempeño. Algunos estudios reportan que la eficiencia puede mejorarse disminuyendo el diámetro y el flujo másico de la tubería (Yusof, et al, 2018) o aumentando la longitud y profundidad del sistema (Ho Lee, et al, 2006).

Basado en las conclusiones o estudios anteriores, este proyecto de investigación analizará el comportamiento térmico de un intercambiador de calor tierra-aire formado por tubería de policloruro de vinilo (PVC) con 4 pulgadas de diámetro enterrada a 4 metros de profundidad.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Evaluar la factibilidad de un intercambiador de calor geotérmico para usos directos utilizando pozos someros perforados en el complejo volcánico Las Tres Vírgenes para climatización de edificaciones.

1.5.2. Objetivos específicos

- Evaluar y estimar la variación de temperaturas del subsuelo en pozos someros perforados en el área de estudio.
- Evaluar teóricamente el desempeño de un intercambiador de calor geotérmico.

1.5.3. Hipótesis

La temperatura del subsuelo a profundidades someras depende de la variación periódica de la radiación solar, temperatura estacional y de la velocidad del aire en contacto con la superficie. Estos factores definen el ritmo con el que se transfiere calor entre la atmósfera y el subsuelo. Para el caso del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, a partir del registro de temperatura en pozos someros y de la información de datos meteorológicos, se espera encontrar estabilidad térmica a

una profundidad mayor a 20 m, lo que representa condiciones térmicas atípicas a las comúnmente encontradas o reportadas en la literatura para profundidades entre 10 y 15 m. Estas anomalías térmicas que caracterizan el subsuelo de esta zona caldérica, representarían un escenario favorable a la hora de evaluar teóricamente el desempeño térmico de un intercambiador de calor (circuito cerrado), para posteriormente determinar la factibilidad de diferentes aplicaciones de uso directo de la energía geotérmica de baja entalpia.

2. Área de estudio

El área de estudio del proyecto de investigación se localiza en la caldera La Reforma ubicado dentro del complejo volcánico Las Tres Vírgenes (dentro del cual se encuentra el campo geotérmico Las Tres Vírgenes), ubicado en la parte noreste del estado de Baja California Sur, aproximadamente a 33 km de la ciudad de Santa Rosalía (Figura 7).

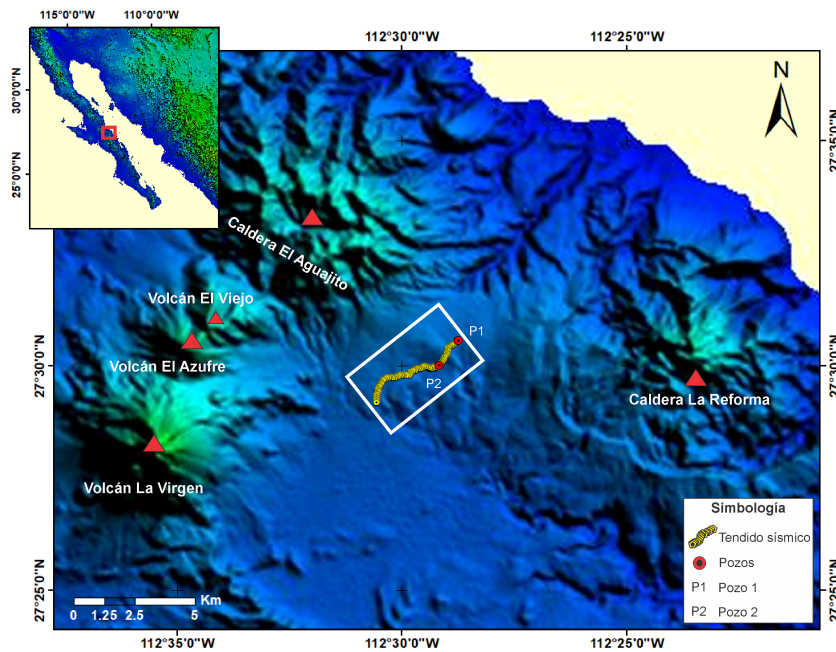


Figura 7: Complejo volcánico Las Tres Vírgenes. El recuadro blanco muestra la localización de los pozos P1 y P2 perforados (tomado y modificado de Sena-Lozoya, 2019).

Dentro de esta área se perforaron dos pozos someros de 55 metros de profundidad, separados por una distancia de aproximadamente 1.4 km (Figura 7), con recuperación de núcleos geológicos y registros de temperaturas in-situ. Las perforaciones se realizaron utilizando la perforadora Drilling 2800 HS (HT), propiedad del CICESE-CeMIE-Geo, equipada para perforar hasta 70 m.

2.1. Condiciones meteorológicas

Para el análisis de temperaturas y las demás condiciones meteorológicas que inferen en la perturbación del perfil de temperatura a profundidades someras, se utilizaron los datos promedio calculados para el año 2017 de la estación meteorológica Santa Rosalía, generados por (Gómez-Ávila, 2018) con información proporcionada por el Laboratorio de pronósticos meteorológicos del CICESE y CONAGUA.

2.1.1. Temperatura ambiente

La temperatura ambiente promedio (anual) del lugar es de 25.14°C, para el periodo de verano la temperatura 36.65°C e invierno 11°C. La Figura 8 muestra los valores máximos, mínimos y promedio de las temperaturas superficiales.

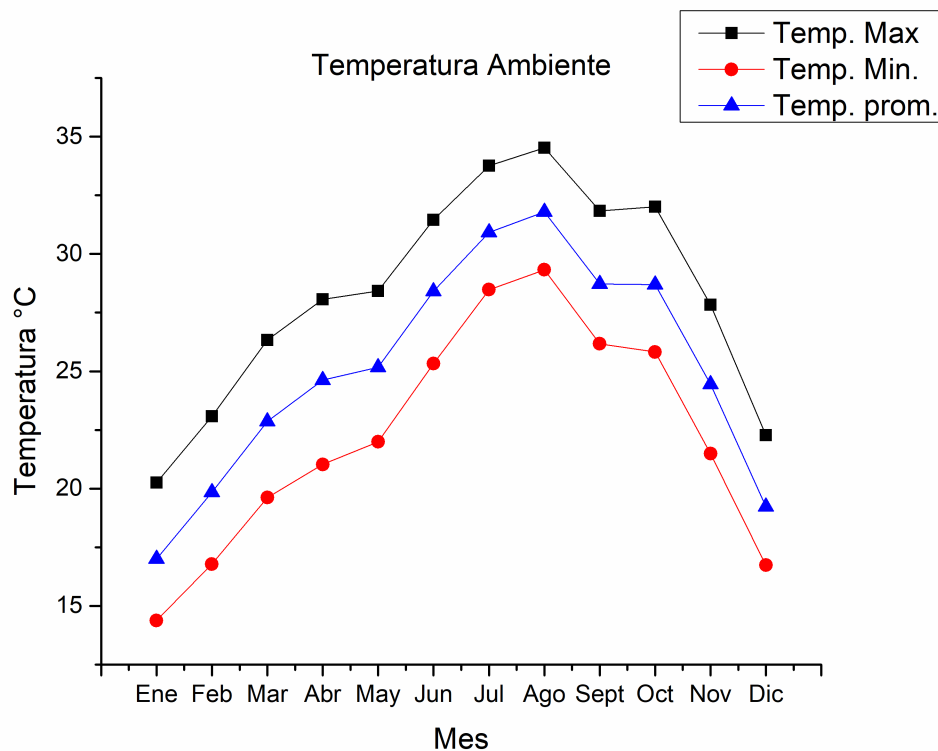


Figura 8: Gráfica de temperatura ambiente obtenida de la estación meteorológica Santa Rosalía.

2.1.2. Radiación solar

La radiación solar alcanza sus valores máximos (1000 W/m^2) en la temporada de verano (Mayo-Septiembre). En promedio la radiación solar de la zona tiene valores considerables como un factor influyente en la perturbación de las temperaturas en el subsuelo, sumado a la escasa vegetación y sombreados durante la mayor parte del día (Figura 9).

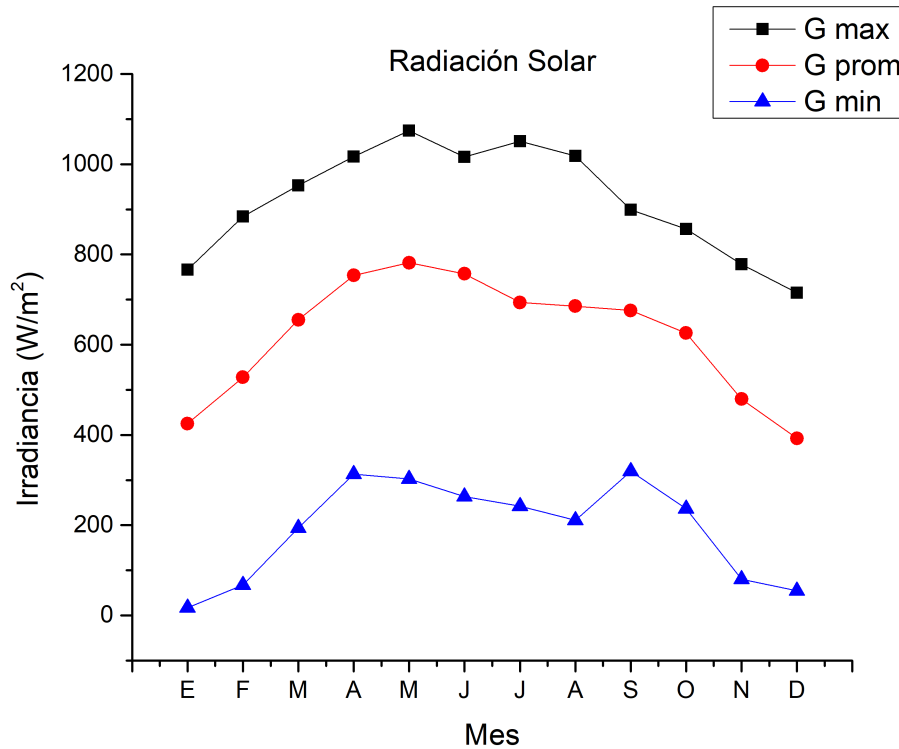


Figura 9: Gráfica de radiación solar obtenida de la estación meteorológica Santa Rosalía.

2.1.3. Velocidad de viento

La velocidad de viento presenta valores máximos de 3.5 m/s en los meses de invierno, principalmente enero y diciembre (meses con temperatura mínima). Los meses correspondientes a la temporada de verano tienen valores de (2.3 m/s) (Figura 10).

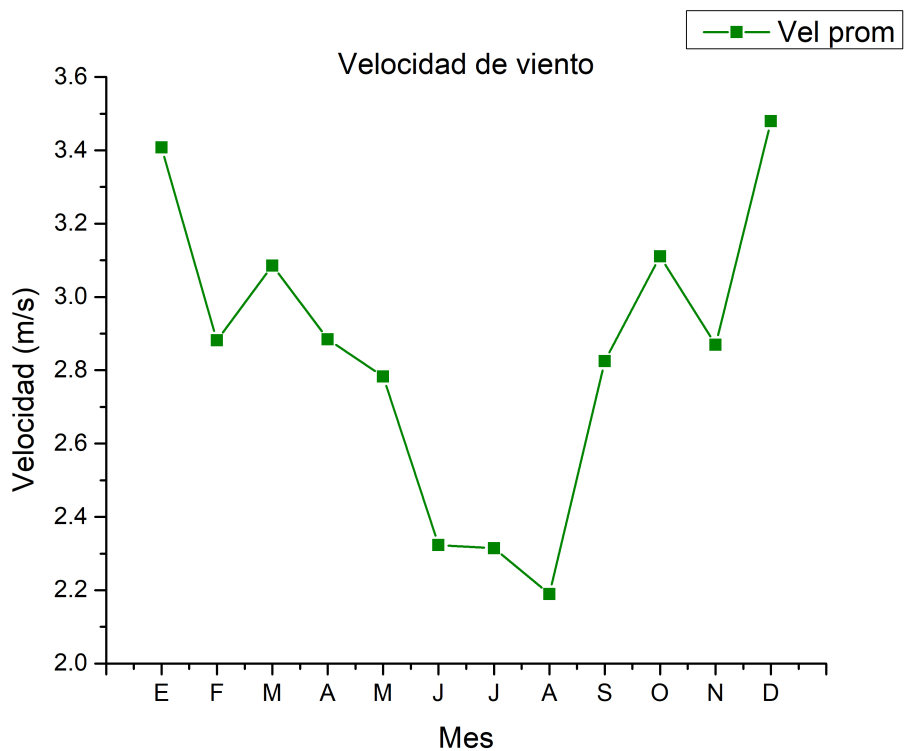


Figura 10: Gráfica de velocidad de viento obtenida de la estación meteorológica Santa Rosalía.

2.1.4. Humedad relativa

La humedad relativa alcanza sus valores máximos (50-60 %) durante los meses de Junio a Septiembre. Los valores mínimos se presentan en la temporada Febrero-Abril. La Figura 11 muestra el comportamiento promedio anual de la humedad relativa en la zona.

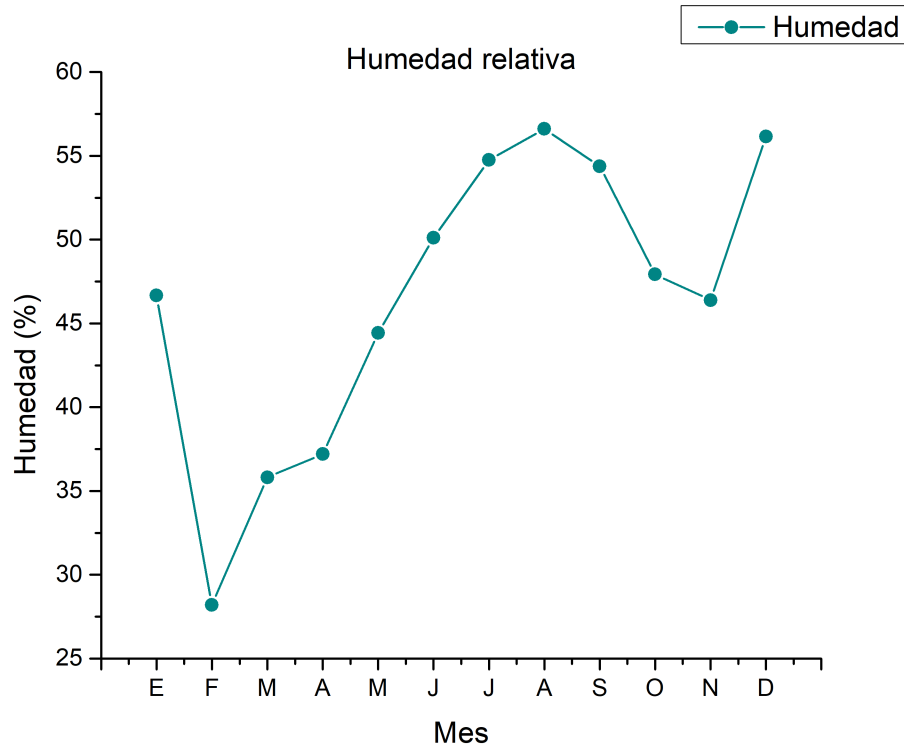


Figura 11: Gráfica de humedad relativa obtenida de la estación meteorológica Santa Rosalía.

3. Metodología

El presente proyecto de investigación considera:

- Estimar la variación de temperaturas en el subsuelo basado en las condiciones estacionales o meteorológicas en superficie.
- Realizar un análisis riguroso de transferencia de calor para intercambiadores de calor geotérmicos

3.1. Perfil de temperatura

3.1.1. Modelo físico

El modelo físico en estudio corresponde al subsuelo del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, el cual se considera un medio finito no homogéneo con propiedades conocidas Figura 12.

Las propiedades termofísicas del modelo físico en estudio (subsuelo) son parámetros importantes que influyen en la variación de temperaturas. En el trabajo de (Sena, 2019) se obtuvieron muestras de roca (núcleos geológicos) recuperadas en los pozos perforados con la finalidad de conocer las columnas litológicas que componen el suelo de este área y sus profundidades (Figura 13).

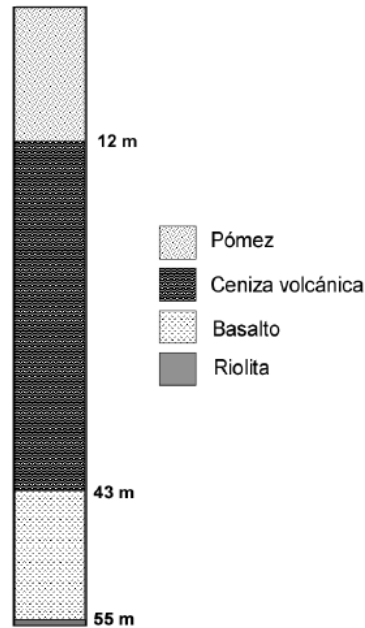


Figura 13: Caracterización litologica del medio físico en estudio

Los valores de conductividad térmica, k , densidad, ρ , calor específico, C_p , y difusividad térmica, α , correspondientes a los tipos de rocas encontradas en los pozos, fueron tomados de los valores reportados en la literatura los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Propiedades termofísicas de los pozos.

Roca	$k \frac{W}{m^{\circ}C}$	$C_p \frac{J}{kg^{\circ}C}$	$\rho \frac{kg}{m^3}$
Pomex (0-12 m)	1.768	885	2360
Ceniza (12-43 m)	1.535	920	2180
Basalto (43-53 m)	2.2	880	2700

3.1.2. Modelo matemático

El perfil de temperatura del subsuelo puede ser modelado de manera precisa mediante la ecuación unidimensional de transferencia de calor por conducción en estado transitorio.

$$\frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

donde α es la difusividad térmica del subsuelo (m^2/s), t representa el tiempo (h) y z la profundidad bajo la superficie (m).

Una solución analítica de la ecuación (1) para un suelo homogéneo con propiedades físicas constantes es reportada por Carslaw y Jaeger (1980). De acuerdo con esos autores la temperatura de la superficie puede ser estimada mediante la siguiente expresión:

$$T_{sup}(t) = T_m + A_s Re[exp(iwt)] \quad (2)$$

donde T_m es la temperatura media anual de la superficie ($^{\circ}C$), A_s es la amplitud de onda de temperatura en la superficie ($^{\circ}C$), Re es la parte real de un número complejo, i corresponde a la parte imaginaria, w representa la frecuencia en la variación de temperatura y la variable t representa un tiempo determinado a lo largo del año (h).

Para resolver la ecuación (2) se considera como condición de frontera la siguiente ecuación que corresponde al balance de energía en la superficie.

$$-K \frac{\partial T_{sup}}{\partial y} \Big|_{y=0} = EC - RL + RC - CL \quad (3)$$

donde K es la conductividad térmica del subsuelo ($W/m * K$), el término EC representa la energía convectiva intercambiada debido a la diferencia de temperatura entre el aire y la superficie en contacto (W/m^2), RL la radiación de onda larga emitida por el suelo (W/m^2), RS la radiación solar absorbida por la superficie (W/m^2) y CL el calor latente de evaporación (W/m^2) (cuando existe presencia de humedad en el subsuelo). El termino EC se calcula mediante la siguiente expresión:

$$EC = h_{sup}(T_{air} - T_{sup}) \quad (4)$$

donde T_{sup} es la temperatura en la superficie ($^{\circ}C$), T_{air} es la temperatura ambiente ($^{\circ}C$) y h_{sup} es el coeficiente convectivo de transferencia de calor por convección entre la superficie y el aire en contacto con ella ($W/m^2 * K$), el cual puede calcularse de la siguiente forma:

$$h_{sup} = 5.7 + 3.8(u) \quad (5)$$

donde u es la velocidad del viento en contacto con la superficie (m/s).

La radiación solar de onda corta absorbida por la superficie puede calcularse de acuerdo al análisis de radiación solar de Kreith y Bohn (1993) mediante la siguiente ecuación:

$$RC = \beta S \quad (6)$$

donde β representa el coeficiente de absortividad del suelo y S la radiación incidente sobre la superficie (W/m^2).

La radiación de onda larga emitida del suelo a la atmósfera se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$RL = \varepsilon \Delta R \quad (7)$$

Donde ε es la emisividad del suelo. El término ΔR representa la radiación térmica de onda larga que depende directamente de la temperatura ambiente y la temperatura de la bóveda celeste (W/m^2), y puede ser calculado por la correlación empírica reportada por (Singh, et al, 2016):

$$\Delta R = \sigma[(T_a + 273.15)^4 - (T_{sky} + 273.15)^4] \quad (8)$$

donde σ representa la constante de Stefan-Boltzmann y T_{sky} la temperatura de la bóveda celeste ($^{\circ}C$), que puede calcularse de la siguiente manera:

$$T_{sky} = T_{air} - 12 \quad (9)$$

El calor latente de evaporación en la superficie puede ser calculado por la siguiente ecuación (Penman, 1963):

$$CL = 0.0168fh_{sup}[(aT_{sup} + b) - r_{air}(aT_{air} + b)] \quad (10)$$

donde f es una fracción que depende principalmente del nivel de humedad y de algún tipo de cubierta en el suelo (en caso que exista; la Tabla 2 muestra valores típicos para f), y r_{air} es la humedad relativa del aire en contacto con la superficie.

Tabla 2: Valores típicos de f

Tipo de suelo	f
Saturado	1
Húmedo	0.6-0.8
Seco	0.4-0.5
Árido	0.1-0.2

NOTA: Para suelos cubiertos por pasto el valor de f puede calcularse multiplicando los valores de la tabla por un coeficiente de 0.7.

La temperatura de la superficie $T_{sup}(t)$ puede ser calculada desde la ecuación (2) usando como condición de frontera la ecuación (3). Por este motivo los valores de EC , RL , RS y CL son calculados de las ecuaciones (4), (6), (8) y (10), respectivamente. Por lo tanto, es posible obtener la temperatura media anual mediante la siguiente expresión:

$$T_m = \frac{1}{h_e} [h_r T_{ma} - \varepsilon \Delta R + \beta S_m - 0.0168 h_{sup} f b (1 - r_a)] \quad (11)$$

y

$$A_s = \frac{[h_r A_{sa} - \beta S_a \exp(i\phi_1 - \phi_a)]}{(h_e + K_s)} \quad (12)$$

Donde T_{ma} es la temperatura media anual medida ($^{\circ}C$), S_m la radiación promedio anual (W/m^2), A_{sa} la amplitud de la onda de temperatura y k_s la conductividad térmica del suelo ($W/m \cdot K$). Para suelos secos y áridos la capacidad de almacenamiento de calor del suelo es mucho menor y la temperatura de la superficie es cercana a la del aire:

$$h_e = h_{sup} (1 + 0.0168 a f) \quad (13)$$

y

$$h_r = h_{sup} (1 + 0.0168 a r_a f) \quad (14)$$

Cabe mencionar que las ecuaciones reportadas en esta sección corresponden a la solución analítica de la ec. (1) solución utilizada en la mayoría de los trabajos teóricos para análisis del subsuelo (Krarti, 1995) (Mihalakakaou,1997) (Ozgener, 2013); este tipo de estudios son obtenidos a partir del comportamiento anual promedio de las variables y se asume un comportamiento senoidal para la variación de variables dependientes como la temperatura ambiente y la radiación solar.

Sin embargo, para estudio del EAHE es necesario tomar en cuenta la variación transitoria de la temperatura del subsuelo considerando los datos meteorológicos de la zona de interés, lo cual permite observar el efecto real de variables como; humedad relativa, radiación solar, temperatura ambiente y velocidad de viento sobre el subsuelo; por lo anterior, en este proyecto de tesis se llevó a cabo el modelado de la conducción de calor en el subsuelo considerando el efecto de las variables climatológicas anteriormente mencionadas correspondientes a la zona de estudio; con la finalidad de aportar mayor robustez y aproximación a la solución. En la sección anterior se describe el modelo matemático utilizado para la solución analítica de la ec (1) únicamente para indicar al lector el camino a seguir, sin embargo, en este proyecto se realizo una solución numérica de dicha ecuación, el cual se describe a detalle en la siguiente sección.

3.1.3. Método numérico

La solución numérica de la ecuación (1) requiere como datos de entrada; temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar y velocidad de viento para cada paso de tiempo Δt . Estos datos comúnmente se obtienen de estaciones meteorológicas, cabe mencionar que entre mas cercanas sean estas a la zona de estudio los modelos de predicción de la perturbación térmica en el subsuelo adquieren mayor precision por ende sus resultados serán mas realistas.

Para modelar el perfil de temperatura del subsuelo se utilizó la ecuación de difusión en una dimensión en estado transitorio la cual fue obtenida de la ecuación generalizada de transporte de la variable " ϕ ".

$$\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) \quad (15)$$

Para este caso la variable " ϕ " representa la temperatura, por lo tanto se sustituye por nuestra variable de interés " T " en la ec (1). La solución de la ecuación se realizó utilizando el método de volumen finito (MVF).

Para este método de discretización se requiere dividir el sistema en estudio (en este caso el subsuelo) en un número finito de volúmenes de control sin traslape, de tal manera que a cada volumen de control pueda asignarse un punto (nodo) de la malla. El volumen total del dominio resulta igual a la suma de los volúmenes de control considerados (Figura 14).

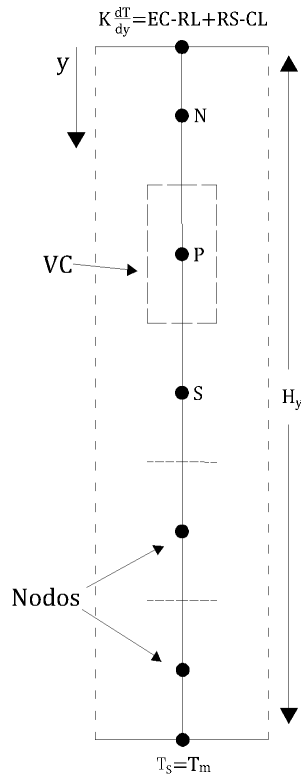


Figura 14: División del sistema bajo estudio.

Posteriormente, se integra la ecuación (1) sobre cada volumen de control, lo cual es posible debido a que se utiliza el teorema de divergencia de Gauss; con el fin de sustituir una integral de volumen por una integral de superficie y, posteriormente, la regla de medio punto para expresar el flujo en el centro de la interface (Xaman, 2015); lo cual se expresa como sigue:

$$\int_{t_0}^{t+\Delta t} \int_N^S \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dt dy = \int_{t_0}^{t+\Delta t} \int_N^S \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial y} \right) dt dy \quad (16)$$

Para obtener la forma discretizada de la ec. (16) es necesario realizar la integración espacial sobre el VC, utilizado como limites sus interfaces; para representarlas se utilizó la notación "N" (Norte) para representar la interfaz superior y "S" (Sur) para la interfaz inferior.

$$\int_{t_0}^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dt \Delta y = \int_{t_0}^{t+\Delta t} \left[\Gamma_S \frac{\phi_S - \phi_P}{\partial y_{PS}} - \Gamma_N \frac{\phi_P - \phi_N}{\partial y_{NP}} \right] dt \quad (17)$$

Una vez integrada espacialmente, la ecuación debe integrarse en el tiempo. De modo que se evalué desde el tiempo t_0 hasta $t + \Delta t$, para esto es necesario hacer una consideración acerca de como varían ϕ_N, ϕ_S y ϕ_P en el intervalo de tiempo; a esa consideracion se le conoce como esquema de discretización temporal. Por lo tanto se considera la siguiente expresión:

$$\int_{t_0}^{t+\Delta t} [\phi] dt = [f \phi + (1 - f) \phi^0] \Delta t \quad (18)$$

Donde f denota un factor de peso ponderado que varia entre 0 y 1 según el esquema de discretización temporal que se utilice.

Aplicando la relación integral (18) a la parte derecha (termino difusivo) de la ec. (17), se obtiene:

$$\int_{t_0}^{t+\Delta t} \left[\Gamma_S \frac{\phi_S - \phi_P}{\partial y_{PS}} - \Gamma_N \frac{\phi_P - \phi_N}{\partial y_{NP}} \right] dt = f \left[\Gamma_S \frac{\phi_S - \phi_P}{\partial y_{PS}} - \Gamma_N \frac{\phi_P - \phi_N}{\partial y_{NP}} \right] + (1 - f) \left[\Gamma_S \frac{\phi_S^0 - \phi_P^0}{\partial y_{PS}} - \Gamma_N \frac{\phi_P^0 - \phi_N^0}{\partial y_{NP}} \right] \Delta t \quad (19)$$

Reescribiendo nuevamente la ecuación (17) integrada en el tiempo, tenemos que:

$$(\rho_P \phi_P - \rho_P^0 \phi_P^0) = \left[f \left[\Gamma_S \frac{\phi_S - \phi_P}{\partial y_{PS}} - \Gamma_N \frac{\phi_P - \phi_N}{\partial y_{NP}} \right] + (1 - f) \left[\Gamma_S \frac{\phi_S^0 - \phi_P^0}{\partial y_{PS}} - \Gamma_N \frac{\phi_P^0 - \phi_N^0}{\partial y_{NP}} \right] \right] \Delta t \quad (20)$$

Arreglando términos se obtiene:

$$\left[\rho_P \frac{\Delta y}{\Delta t} + f \left(\frac{\Gamma_S}{\partial y_{PS}} + \frac{\Gamma_N}{\partial y_{NP}} \right) \right] \phi_P = f \left(\frac{\Gamma_S}{\partial y_{PS}} \phi_S + \frac{\Gamma_N}{\partial y_{NP}} \phi_N \right) + (1-f) \left[\frac{\Gamma_S}{\partial y_{PS}} \phi_S^0 + \frac{\Gamma_N}{\partial y_{NP}} \phi_N^0 - \left(\frac{\Gamma_S}{\partial y_{PS}} + \frac{\Gamma_N}{\partial y_{NP}} \right) \phi_P^0 \right] \quad (21)$$

Identificando los coeficientes de la variable ϕ en diferentes posiciones, se puede escribir la ecuación anterior como:

$$\left[\rho_P \frac{\Delta y}{\Delta t} + f (a_S + a_N) \right] \phi_P = f (a_S \phi_S + a_N \phi_N) + (1-f) [a_S \phi_S^0 + a_N \phi_N^0 - (a_S + a_N) \phi_P^0] \quad (22)$$

Finalmente,

$$a_P \phi_P = a_N [f \phi_N + (1-f) \phi_N^0] + a_S [f \phi_S + (1-f) \phi_S^0] + [a_P^0 - (1-f)(a_S + a_N)] \phi_P^0 + b \quad (23)$$

La forma exacta de la ecuación discretizada depende del valor de f . Distintos valores de f pueden ser interpretados en términos de la variación de ϕ_P en el intervalo de tiempo entre t_0 y $t + \Delta t$. Para este caso se utilizó un esquema totalmente implícito, el cual considera $f = 1$, por lo tanto la ec. (23) se reduce a:

$$a_P \phi_P = a_N [\phi_N] + a_S [\phi_S] + b \quad (24)$$

Donde

$$a_P = \rho_P \frac{\Delta y}{\Delta t} + (a_S + a_N)$$

$$b = a_P^0 \phi_P^0$$

$$a_N = \frac{\Gamma_N}{\partial y_{NP}} \quad , \quad a_S = \frac{\Gamma_S}{\partial y_{PS}} \quad , \quad a_P^0 = \rho_P^0 \frac{\Delta y}{\Delta t}$$

Como resultado de la integración se obtiene una expresión algebraica de la ecuación generalizada de transporte de la variable para cada VC, lo cual resulta en un conjunto de ecuaciones algebraicas.

Cabe mencionar que el sistema de ecuaciones obtenido puede ser representado por una matriz de coeficientes A , un vector solución ϕ y un vector resultante b . Donde la matriz de coeficientes A es tridiagonalmente bandeada y diagonalmente dominante.

$$\begin{bmatrix} a_P & -a_S & 0 & 0 & 0 \\ -a_N & a_P & -a_S & 0 & 0 \\ 0 & -a_N & a_P & -a_S & 0 \\ 0 & 0 & -a_N & a_P & -a_S \\ 0 & 0 & 0 & -a_N & a_P \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \phi_2 \\ \phi_3 \\ \phi_4 \\ \phi_5 \\ \phi_{Ny-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} b_2 + a_N \phi_1 \\ b_3 \\ b_4 \\ b_5 \\ b_{Ny-1} + a_S \phi_{Ny} \end{pmatrix}$$

Como ultimo paso, debe resolverse el sistema de ecuaciones algebraicas con algún método de solución disponible, para este caso se utilizó el algoritmo de Thomas (TDMA).

Para la descripción del algoritmo de Thomas, considere que los punto discretos (nodos) de la malla numérica fueron enumerados como: $i = 1, 2, \dots, Ny$, donde los puntos $i = 1$ e $i = Nx$ corresponden a los puntos discretos de la frontera. Por lo tanto, ecuaciones discretizadas en una dimension (1-D) pueden ser escritas como:

$$a_P(i) \phi_P(i) = a_N(i) [\phi_N(i)] + a_S(i) [\phi_S(i)] + b(i) \quad i = 1, 2, \dots, Ny \quad (25)$$

Los pasos para desarrollar el algoritmo TDMA inician al considerar un proceso de sustitución hacia adelante, que se puede expresar con la relación:

$$\phi_P(i) = P(i) \phi_B(i+1) + Q(i) \quad (26)$$

Si se evalúa la relación anterior para el punto $i - 1$, la ecuación se puede escribir como:

$$\phi_T(i-1) = P(i-1)\phi_P(i) + Q(i-1) \quad (27)$$

Sustituyendo la ec.(27) en la ec. (25) se llega a:

$$a_P(i) \phi_P(i) = a_N(i) [P(i-1)\phi_P(i) + Q(i-1)] + a_S(i)\phi_s(i+1) + b(i) \quad (28)$$

Arreglando se obtiene:

$$\phi_P(i) = \frac{a_S(i)}{a_P(i) - a_N(i)P(i-1)} \phi_S(i+1) + \frac{b(i) + a_N(i)Q(i-1)}{a_P(i) - a_N(i)P(i-1)} \quad (29)$$

Al comparar la ec. (29) con la ec. (26) se obtiene:

$$P(i) = \frac{a_S(i)}{a_P(i) - a_N(i)P(i-1)} \quad (30)$$

$$Q(i) = \frac{b(i) + a_N(i)Q(i-1)}{a_P(i) - a_N(i)P(i-1)} \quad (31)$$

A estas ultimas ecuaciones se les llama relaciones de recurrencia. Se observa que $P(i)$ y $Q(i)$ están dadas en términos de $P(i-1)$ y $Q(i-1)$. Para el caso de $i = 1$ donde $a_T(1) = 0$ se reducen a:

$$P(1) = \frac{a_S(1)}{a_P(1)} \quad (32)$$

$$Q(1) = \frac{b(1)}{a_P(1)} \quad (33)$$

Para $i = Ny$ se sabe que $a_S(Ny) = 0$ por lo tanto $P(Ny) = 0$ y se obtiene:

$$\phi_P(Ny) = Q(Ny) \quad (34)$$

Una vez dadas estas condiciones, podemos iniciar una sustitución hacia atrás al utilizar la ec. (26) lo cual concluye el proceso de calculo del algoritmo.

Condiciones de frontera

Los nodos ubicados en los limites inferior y superior (fronteras) del dominio corresponden a los nodos denominados "nodos frontera" donde pueden establecerse diferentes condiciones, según la información que se tenga sobre estas.

Para este caso, el nodo frontera superior representa físicamente la superficie terrestre y cuenta con una condición de frontera de tercera clase, también conocida como condición de frontera de Robin. La cual establece que la frontera analizada se encuentra gobernada por una ecuación diferencial de primer orden de tipo:

$$a \cdot \frac{\partial \phi}{\partial n} + b \cdot \phi = f \quad (35)$$

donde a y b son constantes diferentes y f es una función conocida de espacio y/o tiempo o un valor constante.

Para este caso la ec. (35) corresponde al balance energético (3), por lo tanto se aplica en el nodo frontera "P" (Figura 14).

Discretizando la ecuación (3) en el nodo frontera obtenemos:

$$k \frac{T_P - T_S}{\delta_{PS}} = h_{sup}(T_a - T_P) - \epsilon \Delta R + \beta S - 0.0168 f h_{sup} [(aT_P + b) - r_a(aT_a + b)] \quad (36)$$

De modo que:

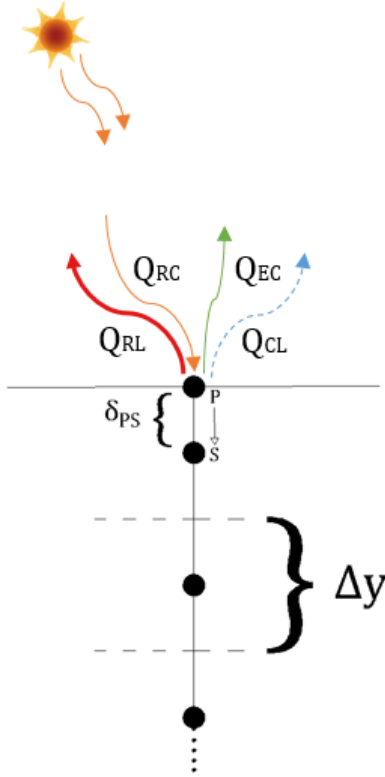


Figura 15: Representación física del nodo frontera en $y = 0$.

$$a_P = \frac{k}{\delta_{PS}} + h_{sup} + 0.0168 f h_{sup} a$$

$$a_N = 0 \quad a_S = \frac{k}{\delta_{PS}} \quad (37)$$

$$b = (h_{sup} T_a) - RL + RC - 0.0168 * f * h_{sup} * [(b) - r_a(a * T_a)]$$

La segunda condición de frontera es una temperatura conocida y corresponde a una condición de frontera de primera clase o de Dirichlet, la cual se aplica en el nodo final que representa físicamente el fondo de nuestro sistema en estudio. Debido a esto establecemos que la temperatura en el nodo

final ($y = H_y$) es la temperatura media del ambiente.

$$T_S = T_m \quad (38)$$

De modo que:

$$\begin{aligned} a_P &= 1 \\ a_N &= 0 \\ a_S &= 0 \\ b &= T_m \end{aligned} \quad (39)$$

Para realizar el modelado de el perfil de temperatura unidimensional en estado transitorio como se indicó en esta sección se desarrollo un código numérico en lenguaje de cómputo C++, utilizando un valor de absortancia $\alpha = 0.6$, emitancia $\varepsilon = 0.85$, factor de humedad $f = 0.4$, un paso de tiempo $\Delta t = 600s$, profundidad $y = 54m$, número de nodos $N_y = 1080$, y un criterio de convergencia de $e = 1^{-3}$.

En la Figura 16 se presenta el diagrama de flujo utilizado para el cálculo de la temperatura del subsuelo a partir de la solución de la ecuación transitoria de difusión en una dimension resuelta con un método directo (TDMA).

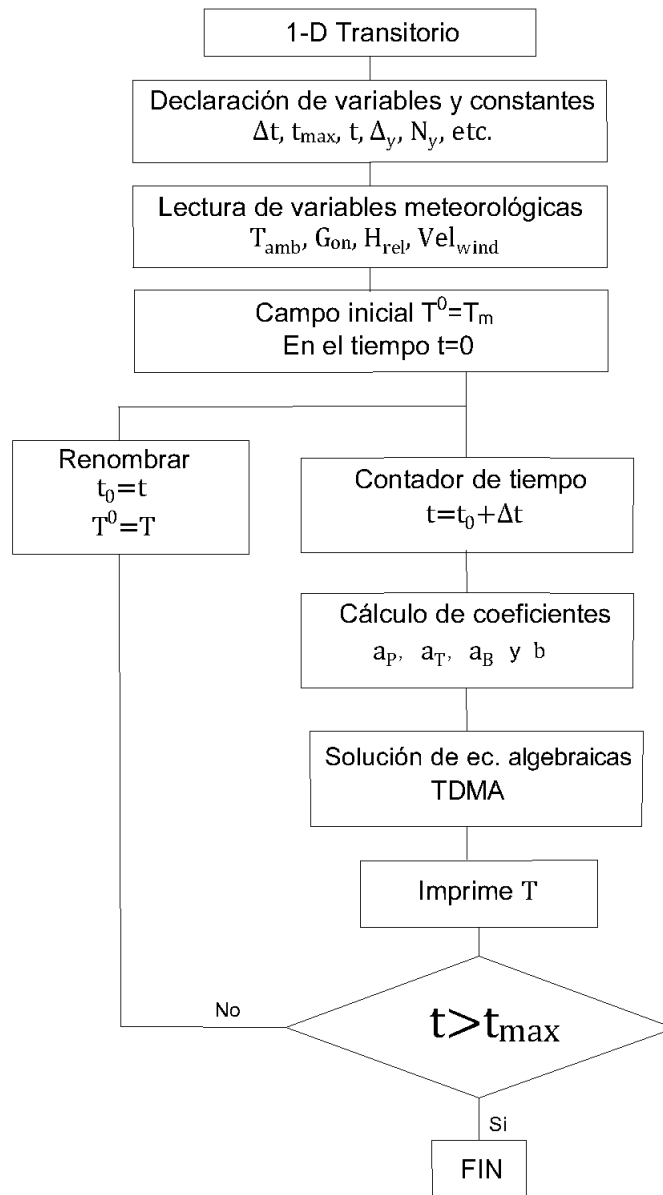


Figura 16: Diagrama de flujo para cálculo de temperaturas del subsuelo.

3.2. Intercambiador de calor tierra-aire

3.2.1. Modelo físico

El sistema en estudio corresponde a un intercambiador de calor tierra aire (EAHE) con 6 metros de profundidad, el sistema encargado de la circulación del aire esta formado por tubería PVC; la cual cuenta con dos partes verticales de 6 m; la primera permite el descenso inicial del aire al subsuelo para posteriormente conectarse a una sección horizontal de 6 metros, que en su parte final se encuentra acoplada a la segunda tubería vertical (salida). La tubería de salida fue cubierta con material aislante de poliestireno, de acuerdo con lo reportado por Xaman et al. (2014) el uso de un material aislante en esa sección mejora el desempeño del EAHE, evitando pérdidas o ganancias de calor no deseadas (Figura 17).

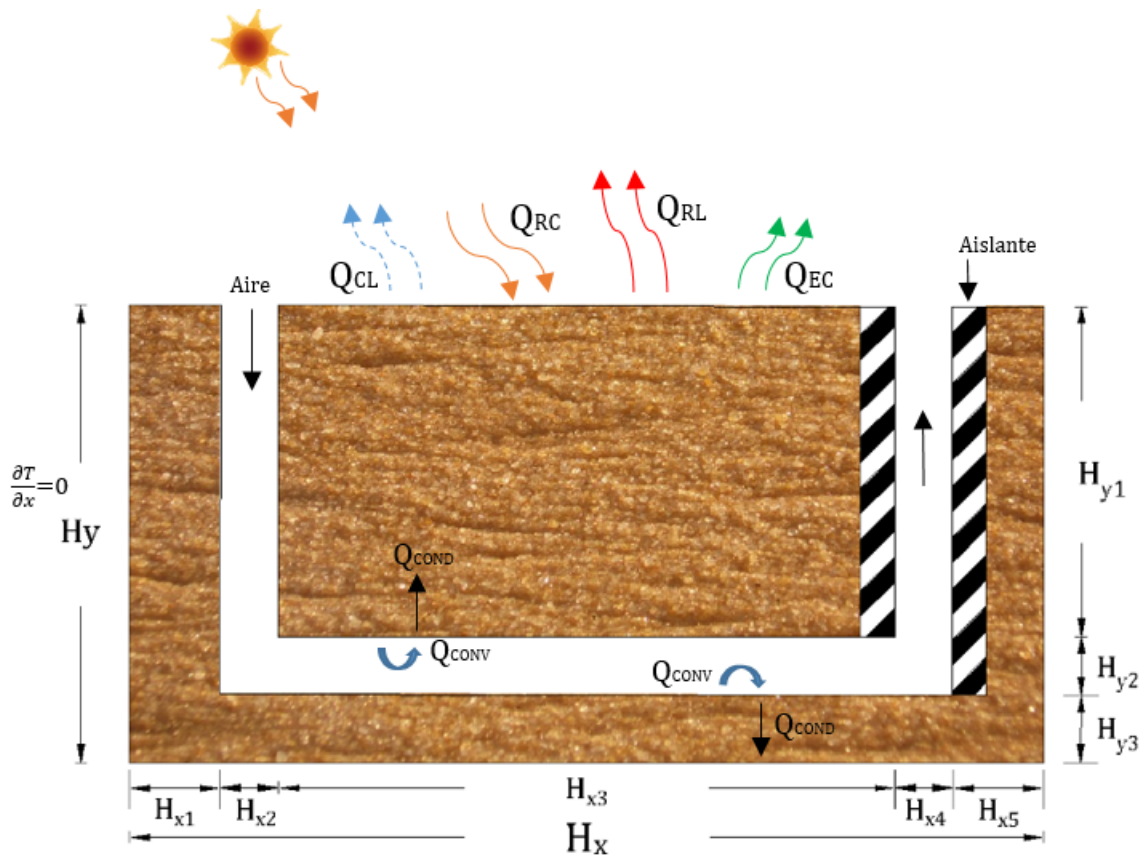


Figura 17: Modelo físico EAHE.

Las dimensiones geométricas del sistema EAHE bajo estudio se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Dimensiones del EAHE en estudio.

Sección	Dimensión
H_y	6 m
H_{x3}	5.7 m
$H_{x2} = H_{x4} = H_{y2}$.15 m
$H_{x1} = H_{x5} = H_{y3}$.1 m
Aislante	0.1 m

Para el estudio de la tubería, se tienen en cuenta las siguientes consideraciones:

- La sección transversal circular de la tubería se modela como una sección transversal cuadrada.
- La influencia térmica de la tubería se considera despreciable debido a su espesor.
- La condensación y la evaporación dentro de la tubería no se considera.
- El mecanismo de transferencia de calor dominante es la convección.
- El aire está en un régimen de flujo laminar.

3.2.2. Modelo matemático

Se considera que el aire circulante dentro la tubería realiza transferencia de calor por convección bajo un régimen de flujo laminar. Las ecuaciones que gobiernan el fenómeno en el EAHE son las ecuaciones de continuidad, energía y momentum y se modelan en el sistema cartesiano de coordenadas, las ecuaciones se muestran a continuación

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} = 0 \quad (40)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial u}{\partial y} \right] \quad (41)$$

$$\frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \frac{\partial v}{\partial y} \right] \quad (42)$$

$$\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vT)}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{\lambda}{C_P} \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{\lambda}{C_P} \frac{\partial T}{\partial y} \right] \quad (43)$$

La temperatura de entrada del fluido (aire) es igual a la temperatura ambiente (T_{amb}) y la velocidad de entrada (V_{in}) esta definida por:

$$Re = \frac{\rho V_{in} D_h}{\mu} \quad (44)$$

Donde Re representa el número de Reynolds, ρ ($\frac{kg}{m^3}$) y μ ($\frac{kg}{m \cdot s}$) corresponden a la densidad y viscosidad del fluido respectivamente; y D_h (m) al diámetro hidráulico que es equivalente a dos veces el ancho de la tubería.

Las condiciones de flujo desarrollado fueron utilizadas para la temperatura y velocidad de salida del fluido:

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (45)$$

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0 \quad (46)$$

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (47)$$

Las condiciones de frontera verticales para la temperatura del sistema mostrado en la Figura 17 son consideradas adiabáticas $\frac{dT}{dy} = 0$; mientras que las condiciones horizontales pertenecen a valores fijos de temperatura obtenidos a partir del modelado del perfil de temperatura del subsuelo en estado transitorio, cabe recordar que el modelo transitorio del subsuelo consideró las pérdidas y ganancias de energía debidas a las condiciones climáticas.

Por su parte, para la tubería se impusieron condiciones de frontera obtenidas del modelado del subsuelo en estado transitorio (Sección 3.1.3); por lo tanto, para cada hora modelada se determinó la función correspondiente a los valores de temperatura del subsuelo en función de la posición (Anexo 1).

3.3. Método de solución

La metodología de solución para el modelo matemático del EAHE es el método de volumen finito, considerando el algoritmo SIMPLEC para el acople de las ecuaciones de masa y momentum. Mientras que para los términos convectivos y conductivos de las ecuaciones se utilizaron los esquemas híbrido y centrado, respectivamente.

Asimismo, el conjunto de ecuaciones algebraicas fue resuelto con el Algoritmo de Thomas modificado de direcciones alternantes, y se consideró un criterio de convergencia de 10^{-08} para todas las variables. Asimismo, para el modelado del sistema se utilizó el método de bloqueo de regiones (Blocking-off regions).

Cabe mencionar que la herramienta computacional utilizada para el modelado del EAHE fue proporcionada por el CICESE en colaboración con Xaman et al. [2014], por lo tanto, para más detalle consultar [Ramirez-Davila et al, 2014; Xaman et al, 2014; Xaman et al, 2015; Xaman y Gijon-Rivera (2016)]

4. Resultados y discusiones

4.1. Perfil de temperatura del subsuelo

4.1.1. Perfil de temperatura del subsuelo sin gradiente

La Figura 18 muestra el perfil de temperatura calculado cada dos horas para el día más frío del año en el área de estudio. Se aprecia que a profundidades mayores a 25 m el comportamiento de la temperatura es casi constante y tiende al valor promedio diario de la temperatura ambiente ($T_m = 14.34\text{ }^\circ\text{C}$).

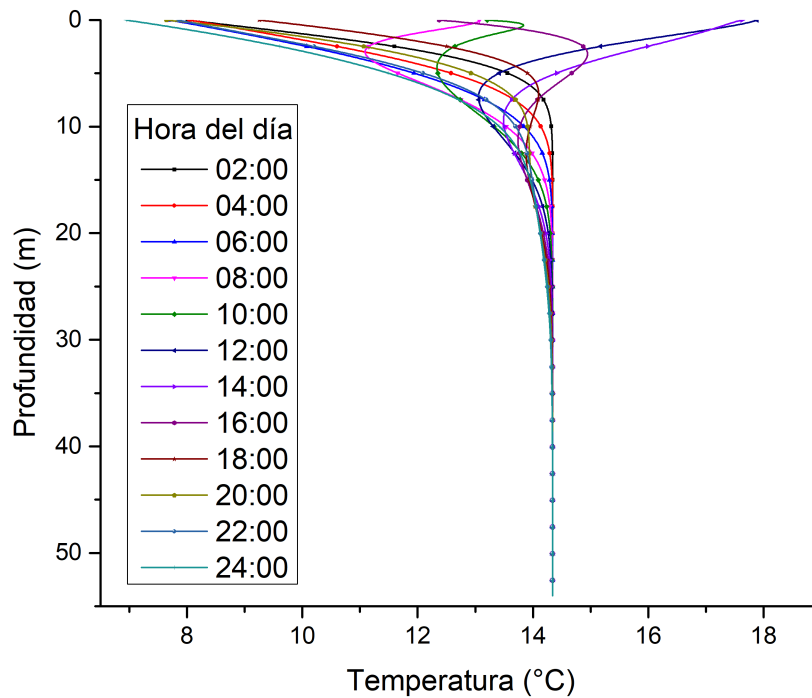


Figura 18: Perfil de temperatura sin gradiente geotérmico para el día más frío (03/02/2016) en la zona de estudio.

Durante el horario comprendido entre las 11:00 y las 15:00 h la temperatura en superficie ($y = 0$) es mayor que la temperatura media del ambiente en superficie ($T_{y=0} > T_m$), alcanzando valores de hasta 19°C en el intervalo de tiempo entre las 11:00 y las 12:00 h; sin embargo, la temperatura máxima en superficie reportada en la gráfica es de ($17.88\text{ }^\circ\text{C}$) y corresponde a las 12:00 h, donde la ganancia de calor por radiación de onda corta (Q_{RC}) es de $471.6\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ y los otros tres flujos presentes

(Q_{CL} , Q_{RL} y Q_{EC} ,) disipan calor a razón de -80.75 y $-59.73 - 25.92 \frac{W}{m^2}$, respectivamente. Para esta hora se tiene una diferencia de temperatura ΔT de -4 °C entre la temperatura del aire ambiente (17.2) y el subsuelo a 6 m de profundidad.

Para el resto del día el comportamiento de la temperatura superficial se invierte, presentando valores menores que la temperatura media de la tierra ($T_{y=0} < T_m$), comportamiento típico del subsuelo durante la temporada de invierno. El comportamiento anterior se debe a la variación de magnitud y sentido que presentan los flujos de calor entre el ambiente y la superficie (Q_{RC} , Q_{RL} , Q_{EC} , y Q_{CL}) a lo largo del día, por tal motivo, en la Tabla 4 se presentan los flujos correspondientes a las 02:00, 6:00, 10:00, 12:00, 14:00, 18:00, y 24:00 h.

Tabla 4: Flujos de calor para el día mas frío.

Tiempo (H)	Flujos de calor ($\frac{W}{m^2}$)			
	RC	RL	EC	CL
02:00	0	-31.06	101.82	-54.98
06:00	0	-30.22	82.37	-36.80
10:00	150	-61.04	113.43	-97.63
12:00	471.6	-59.73	-25.92	-80.75
14:00	383.4	-55.21	-28.85	-82.19
18:00	0	-30.50	134.37	-70.91
20:00	0	-29.8	63.40	-29.45
24:00	0	-27.64	83.47	-16.76

NOTA:(-) significa que el flujo de calor va en dirección al ambiente.

A partir de los resultados mostrados en la Figura 18 y la Tabla 4 se observó que los cambios de temperatura en la superficie ($T_{y=0}$) están relacionados principalmente al flujo de calor por radiación de onda corta (Q_{RC}); dado que conforme aumenta la cantidad de energía absorbida por el subsuelo, incrementa gradualmente la temperatura de la superficie. La temperatura mínima en superficie ($y = 0$) es de 6.94 °C y corresponde a la isoterma de las 24:00 h, donde no existe flujo de radiación incidente $Q_{RC} = 0 \frac{W}{m^2}$ solo ganancia de calor calor por convección Q_{EC} a razón de

83.47 $\frac{W}{m^2}$ mientras el flujo de calor latente por evaporación y la radiación de onda larga disipan calor a razón de $Q_{CL} = -16.76 \frac{W}{m^2}$ y $Q_{RL} = -27.64 \frac{W}{m^2}$ (Tabla 4). Durante esta hora no existe una diferencia de temperatura considerable entre la temperatura del aire ambiente ($12.3^\circ C$) a 6 m de profundidad ($\Delta T = 0.22C$).

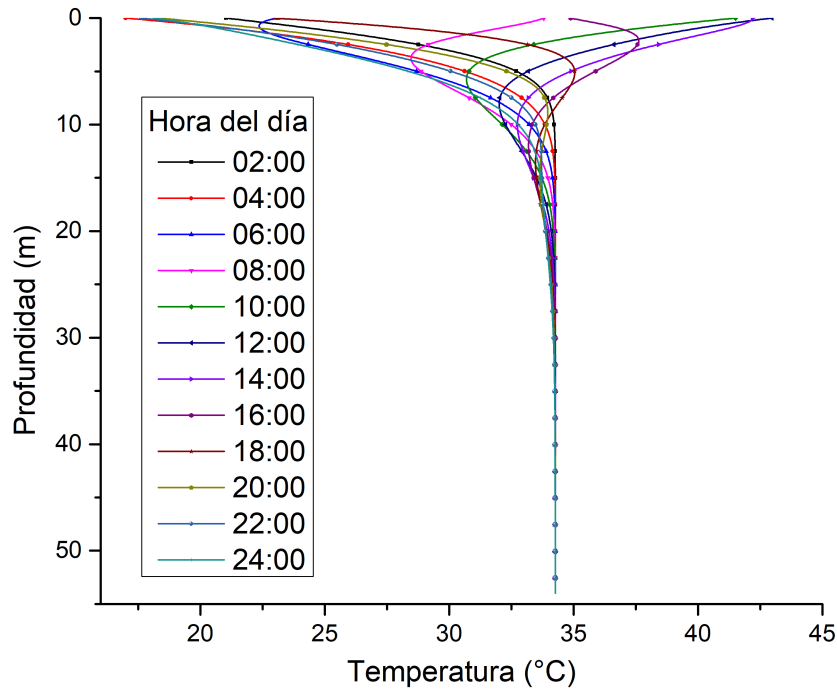


Figura 19: Perfil de temperatura sin gradiente geotérmico para el día más cálido (05/06/2016).

La Figura 19 muestra el perfil de temperatura calculado cada dos horas correspondiente al día más cálido del año. La máxima temperatura ($42.97^\circ C$) en superficie ($y = 0$) corresponde a la isoterma de las 12:00 h, durante esa hora el flujo de radiación absorbido por la superficie Q_{RC} es de $602.4 \frac{W}{m^2}$, el flujo de calor por convección Q_{EC} retira calor a una tasa de $-73 \frac{W}{m^2}$ al igual que la radiación de onda larga $Q_{RL} = -90.68 \frac{W}{m^2}$ y el flujo de calor latente por evaporación $Q_{CL} = -53.68 \frac{W}{m^2}$ (Tabla 5). Para esta hora se tiene un ΔT de $6^\circ C$ entre la temperatura del aire ambiente (38.5°) y el subsuelo una profundidad 6 m.

Por otra parte, la temperatura mínima en la superficie reportada en la Figura 19 ($17.67^\circ C$) corresponde a la isoterma de las 04:00 h, donde el suelo tiene 9 h (19:00 a 04:00 h) con ausencia de

radiación incidente de onda corta $Q_{RC} = 0$, la única ganancia de calor es por convección a razón de $102 \frac{W}{m^2}$, la radiación de onda larga es de $-6.99 \frac{W}{m^2}$ y el flujo de calor latente por evaporación de $-3.59 \frac{W}{m^2}$. Durante esta hora del día la diferencia de temperatura ΔT es de $3.6 \text{ }^\circ\text{C}$ entre el aire ambiente (28.2°) y el subsuelo a 6 m de profundidad.

También se observa que durante el día mas cálido la distribución de las isotermas tiene un comportamiento mas uniforme con respecto a las obtenidas para el día mas frío; donde solo dos isotermas (12:00 y 14:00 h) presentan temperaturas en superficie mayores que la temperatura media diaria ($T_{y=0} > T_m$). Los perfiles de temperatura ubicados en el intervalo de tiempo comprendido entre las 08:00 y las 16:00 h presentan temperaturas en ($y = 0$) mayores que la temperatura media diaria ($T_{y=0} > T_m$) comportamiento característico del subsuelo durante la temporada de verano, mientras el resto de las curvas de temperatura (02:00 a 06:00 y 18:00 a 24:00) presenta un comportamiento inverso ($T_{y=0} < T_m$).

Tabla 5: Flujos de calor para el día mas cálido.

Tiempo (Hora)	Flujos de calor ($\frac{W}{m^2}$)			
	RC	RL	EC	CL
04:00	0	-6.99	102.09	-3.59
06:00	50.4	-5.8	50.11	-0.54
10:00	523.8	-86.44	-78.86	-260.59
12:00	602.4	-90.68	-73.06	-53.68
14:00	537	-100.87	-55.97	-19.02
18:00	87.6	-9.99	186.62	4.01
20:00	0	-0.12	110.77	2.84
24:00	0	-11.26	117.39	-26.38

NOTA: (-) significa que el flujo de calor va en dirección al ambiente.

Es posible inferir a partir de los resultados obtenidos para el perfil de temperatura del subsuelo sin considerar el efecto del gradiente térmico que un intercambiador de calor geotérmico tendrá un mejor rendimiento durante la temporada de verano, debido a que los diferenciales de temperatura ΔT son mayores que las obtenidas para la temporada de invierno.

Es importante mencionar que los perfiles de temperatura obtenidos en esta sección describen únicamente el efecto que tienen las condiciones meteorológicas sobre las diferentes capas (tipos de suelo) que componen el subsuelo de la zona de estudio, el perfil de temperatura obtenido representa una buena aproximación del comportamiento térmico del subsuelo y puede ser utilizado para la mayoría de los casos; sin embargo, para este estudio al tratarse de una zona caldérica es necesario considerar el efecto del gradiente térmico anómalo presente a profundidades someras y la perturbación que tiene sobre él, por tal motivo se analizará en la siguiente sección.

4.1.2. Perfil de temperatura del subsuelo con gradiente

Para modelar con mayor precisión el comportamiento del perfil de temperatura en la zona de estudio, se consideró el efecto del gradiente térmico ($0.43 \frac{^{\circ}C}{m}$) calculado por Sena (2019) Figura (20 y 21) sobre los perfiles obtenidos en la sección anterior.

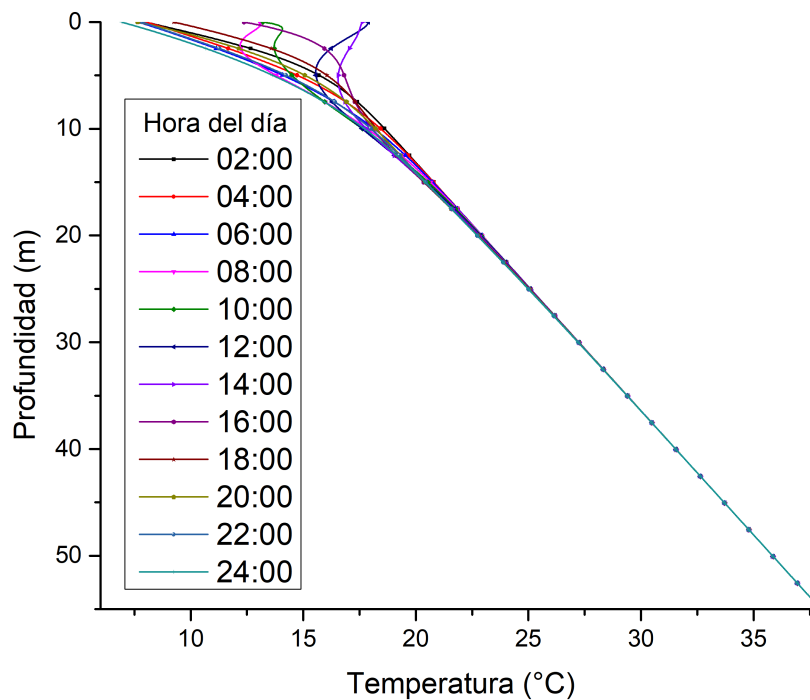


Figura 20: Perfil de temperatura con gradiente geotérmico para el día más frío (03/02/2016).

Considerando el efecto del gradiente térmico para el día más frío del año (Figura 20), a las 12:00 h (hora cálida) la diferencia de temperatura a 6 m de profundidad disminuyó de 4 a 1.45 °C

($\Delta T = -2.55 \text{ }^\circ\text{C}$), mientras que a la misma profundidad para las 24:00 h (hora fría) aumentó de 0.22 a 2.37 $^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 2.15 \text{ }^\circ\text{C}$).

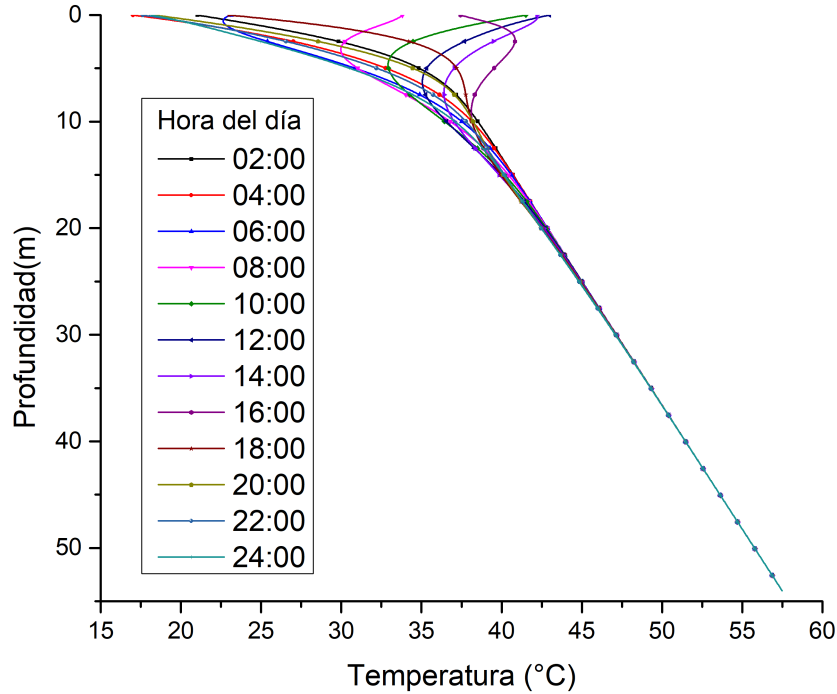


Figura 21: Perfil de temperatura con gradiente geotérmico para el día más cálido (05/06/2016).

Se observa en la Figura 21 que para el día mas cálido a las 12:00 h (hora cálida), el diferencial de temperatura a 6 metros disminuyo de 6 $^\circ\text{C}$ a 3.43 $^\circ\text{C}$ para las 12:00 h ($\Delta T = -1.7\text{C}$). Para las 04:00 h (hora fría) el diferencial de temperatura a 4 m aumentó de 3.6 a 6.2 $^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 2.59^\circ\text{C}$).

Tambien se observa en ambas Figuras (20 y 21) que no existe una linea de convergencia de las isotermas en la temperatura media diaria como en el caso de las Figuras 18 y 19, si no que, estas tienden hacia un incremento gradual de temperatura conforme aumenta la profundidad sin importar la temporada del año (para este estudio: invierno y verano). Esa tendencia de aumento en la temperatura con la profundidad, vuelve atractiva la zona de estudio para diferentes tipos de intercambiadores de calor geotérmicos con otras aplicaciones de usos directos de la geotermia en esta zona, y no solo limitarla a climatización de edificaciones.

Tabla 6: Efecto del gradiente térmico en la temperatura a 6 m

Día	Hora	$T_{y=6}$ (SG)	$T_{y=6}$ (SG)	ΔT
Cálido	04:00	31.8	34.4	2.6
	12:00	32.46	35.06	2.6
Frío	24:00	12.07	14.67	2.6
	12:00	13.14	15.74	2.6

NOTA: (-) significa que el flujo de calor va en dirección al ambiente.

Es importante mencionar que el diferencial de temperatura ΔT entre el ambiente y el subsuelo se evaluó a 6 m de profundidad en las secciones 4.1.1 y 4.1.2 debido a que el ΔT es más pronunciado; y después de esta profundidad la isoterma comienza a tender hacia la temperatura ambiente promedio diaria. Por lo tanto, se busca que el fluido introducido en superficie alcance el equilibrio con la temperatura del subsuelo a la profundidad que presente un mayor diferencial de temperatura.

4.2. Intercambiador de calor tierra-aire

En esta sección se analizará el comportamiento de un intercambiador de calor tierra-aire (EAHE) utilizando los perfiles de temperatura obtenidos en la sección anterior. Este capítulo será dividido en dos subsecciones con la finalidad de analizar la diferencia en el desempeño térmico del EAHE utilizando un perfil de temperatura sin perturbación (4.1.1), y bajo la influencia del gradiente térmico anómalo considerado en la sección anterior (4.1.2). Dado que el Ejido "Bonfil" se localiza a 20 km del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, se considera un escenario despreciando el efecto del gradiente térmico.

4.2.1. Modelado EAHE sin gradiente

Con la finalidad de analizar la influencia que tiene la velocidad del aire circulante dentro del EAHE sobre la temperatura de salida, se realizaron estudios paramétricos con $Re = 100, 500$ y 1500 (Figuras 22, 23 y 24) para la hora mas fría el día mas frío del año 2016.

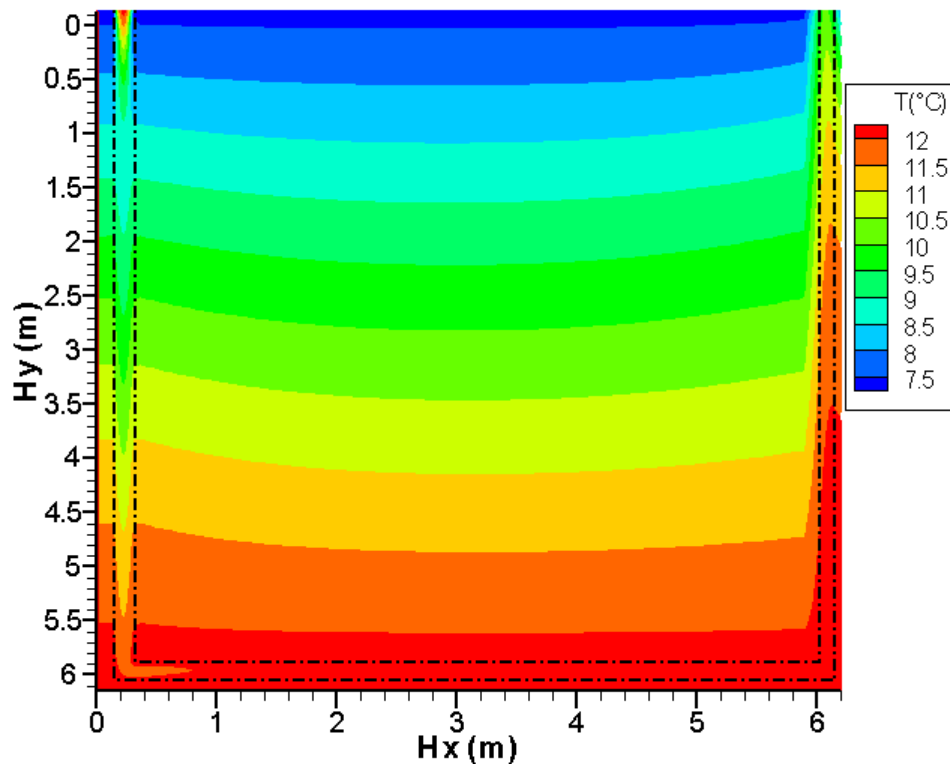


Figura 22: Campo de temperatura EAHE (día frío 24:00 h) $Re = 100$, $T_{in} = 12.3^\circ C$, $T_{out} = 11.4^\circ C$.

La Figura 22 muestra que la temperatura del aire a la salida del EAHE es menor que la temperatura de entrada ($T_{out} < T_{in}$), dado que este día es el más frío de la temporada de invierno, si bien $12\text{ }^{\circ}\text{C}$ no es una temperatura extremadamente fría, la caída de temperatura obtenida en este modelo ($\Delta T_{in-out} = -0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$) no es deseable para esta temporada del año. Se observa que durante el ascenso a aproximadamente 4 metros el aire pierde temperatura considerablemente a pesar del material aislante agregado en esta sección de tubería.

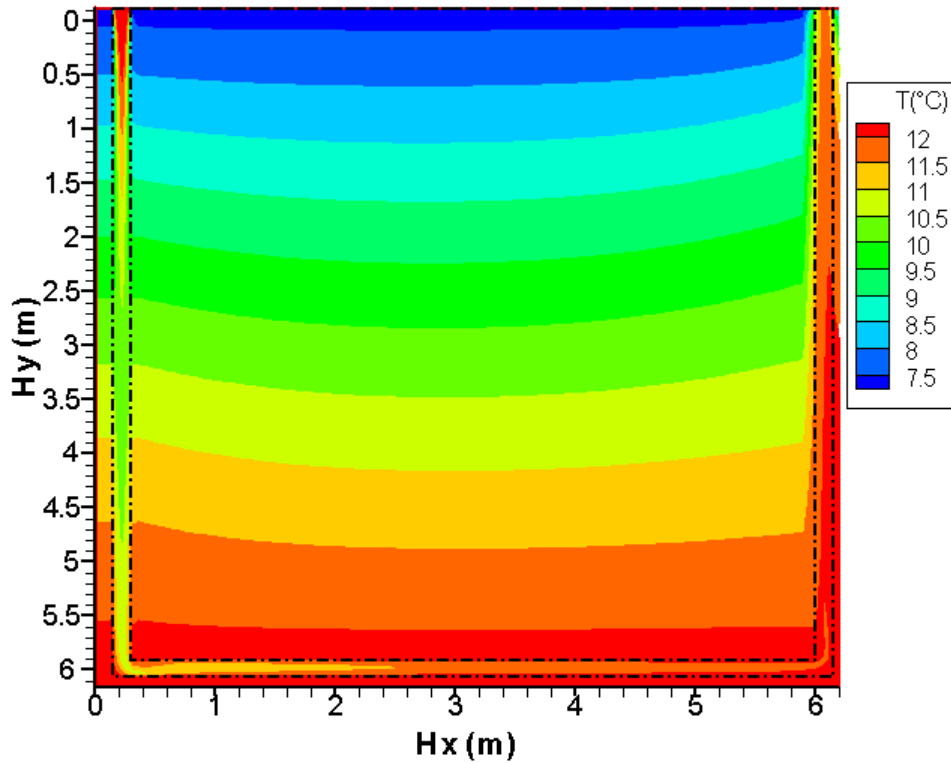


Figura 23: Campo de temperatura EAHE (día frío 24:00 h) $Re = 500$, $T_{in} = 12.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, $T_{out} = 12.98\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La Figura 23 muestra un incremento mínimo entre la temperatura de entrada y salida del aire ($\Delta T_{in-out} = 0.68\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este incremento es debido al aumento en la velocidad de circulación del aire, dado que el fluido no tiene el mismo contacto a partir de los 4 m donde se daba la mayor pérdida de calor generando un descenso de temperatura.

Se observa que en su descenso inicial el aire cede calor hasta bajar su temperatura a aproximadamente $9.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a una profundidad de 2 m, y es hasta que recorre la sección horizontal cuando vuelve

a tener una transferencia de calor significativa que eleva su temperatura gradualmente; hasta llegar a su sección ascendente donde eleva su temperatura nuevamente a 12°C y posteriormente alcanza los 12.9°C que tiene a su salida.

De igual forma se observa que para esta velocidad, el material aislante agregado en la sección ascendente del aire muestra un buen desempeño, debido a que no existe una fluctuación de temperatura considerable cuando el aire circula por esta sección.

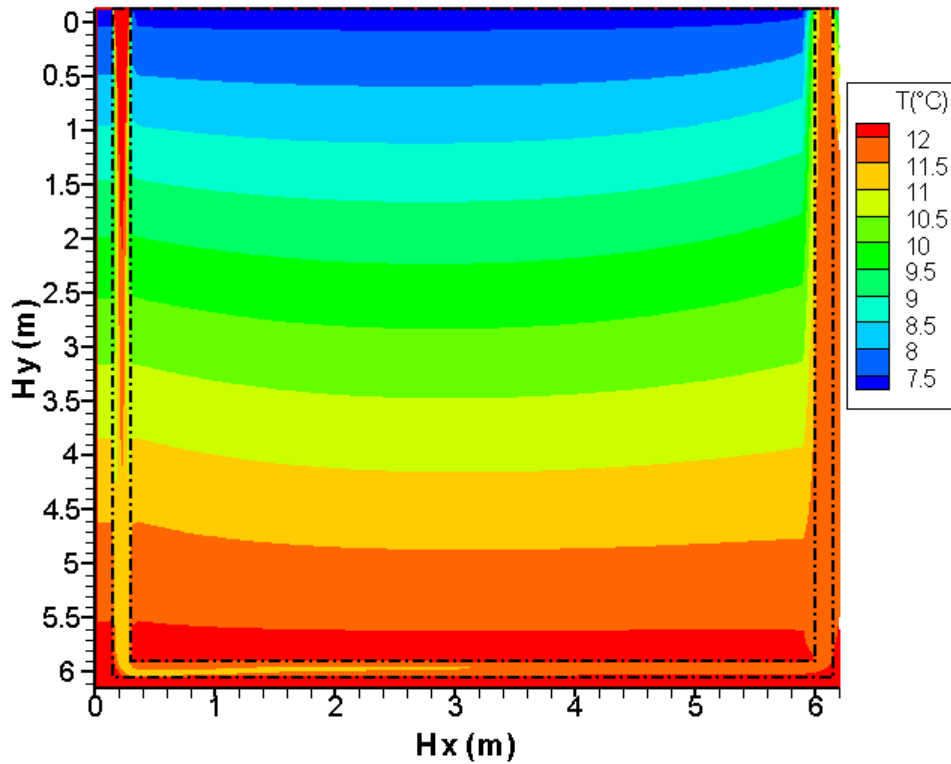


Figura 24: Campo de temperatura (día frío 24:00 h) $Re = 1500$, $T_{in} = 12.3^{\circ}\text{C}$, $T_{out} = 13.22^{\circ}\text{C}$.

La Figura 24 presenta un incremento en la temperatura de salida del aire con respecto a la Figura 23, por lo tanto, se puede inferir que bajo estas condiciones un número de Reynolds de 1500 es lo mas conveniente, debido a que al disminuir el tiempo de residencia del aire dentro del intercambiador de calor este no realiza perdidas de calor no deseadas por el contacto con el subsuelo durante el ascenso.

La diferencia de temperatura del aire entre la entrada y la salida es de ($\Delta T_{in-out} = 0.92^\circ C$), lo cual no es un aumento considerable, mas permite la operación del EAHE sin una afectación al confort térmico como lo es el caso de $Re = 100$ donde la temperatura disminuía; siendo que, lo que se busca durante esta temporada del año es aumentar la temperatura de salida del aire.

Las Figuras 25, 26 y 27 representan los modelos del EAHE para la hora mas cálida del día mas cálido del año 2016, utilizando diferentes números de Reynolds.

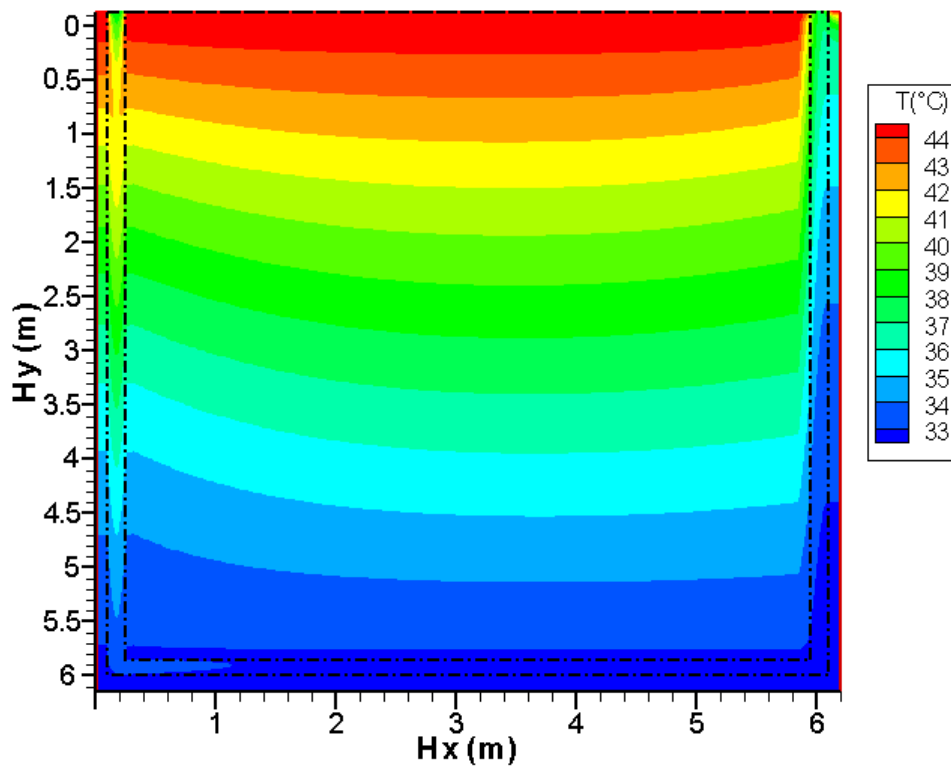


Figura 25: Campo de temperatura (día cálido 12:00 h) $Re = 100$, $T_{in} = 38.5^\circ C$, $T_{out} = 38.43^\circ C$.

En el campo de temperatura de la Figura 25 se observa que la temperatura de salida del aire es similar a su temperatura de entrada ($T_{out} \approx T_{in}$). Tambien se observa que el aire disipa calor considerablemente durante su descenso y posteriormente se pone en equilibrio térmico con el subsuelo tras haber recorrido un metro por la seccion horizontal. El aire no logra mantener hasta su salida la temperatura constante que alcanzo en la seccion horizontal debido a que un número de Reynolds

relativamente bajo ($Re = 100$) hace que el fluido tenga mayor tiempo de residencia dentro de la tubería y realice una transferencia de calor similar a la que realizó durante su descenso, despreciando casi por completo el efecto del aislante térmico agregado en la sección vertical de ascenso.

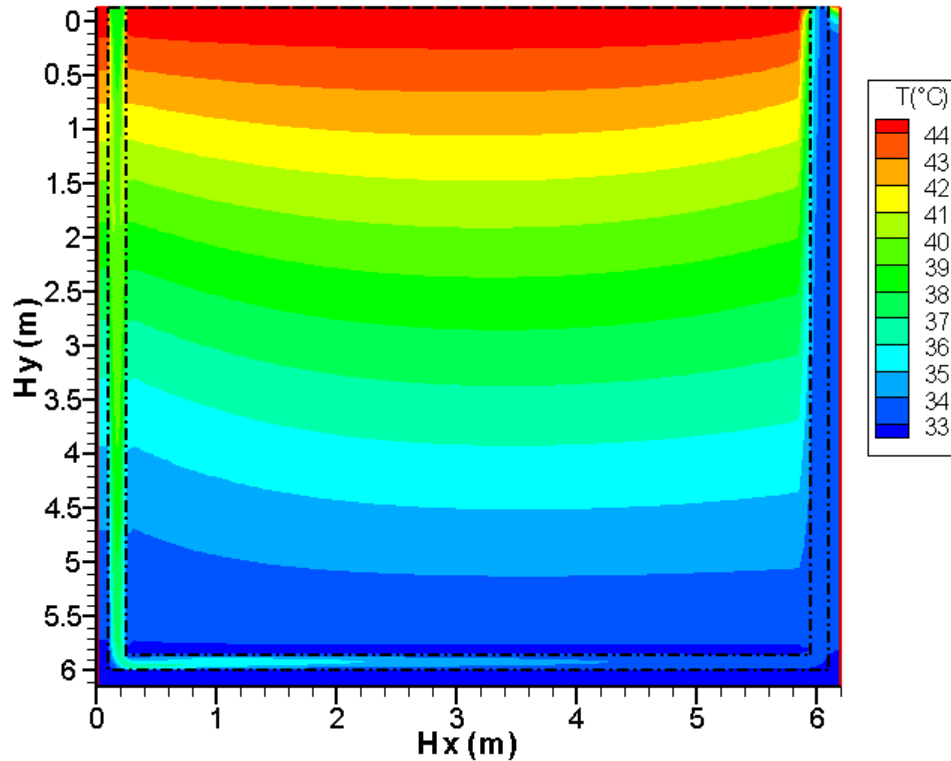


Figura 26: Campo de temperatura (día cálido 12:00 h) $Re = 500$, $T_{in} = 38.5^{\circ}C$, $T_{out} = 34.53^{\circ}C$.

La Figura 26 muestra una diferencia considerable entre la temperatura del aire a la entrada y la salida ($\Delta T = -3.97^{\circ}C$). Se observa que el fluido realiza una transferencia de calor gradual y uniforme con el subsuelo conforme recorre la tubería del EAHE. El material aislante permite que el aire mantenga su temperatura mientras circula en la sección de ascenso, a excepción de la sección final ($y \leq 0.5m$), donde la temperatura del subsuelo aumenta de forma brusca y genera una ganancia de calor considerable. Este descenso en la temperatura del aire es de utilidad en edificaciones para disminuir las altas temperaturas que pueden alcanzar durante la temporada de verano, trabajando de manera individual o de forma híbrida con un sistema de climatización convencional.

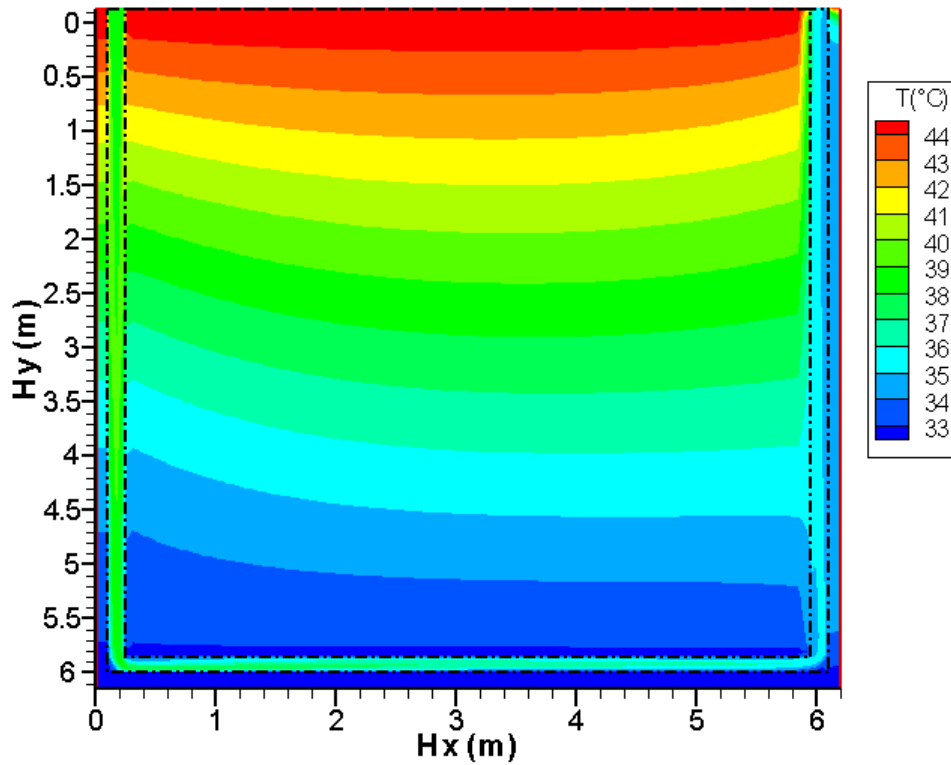


Figura 27: Campo de temperatura (día cálido 12:00 h) $Re = 1500$, $T_{in} = 38.5^{\circ}C$, $T_{out} = 35.23^{\circ}C$.

La Figura 27 presenta una menor disminución en la temperatura de salida del aire en comparación con la Figura 26 ($\Delta T = -3.27^{\circ}C$), debido a que, al aumentar la velocidad de circulación del fluido este tiene un menor tiempo de residencia dentro de la tubería y no el equilibrio con la temperatura del subsuelo cuando recorre la tubería del intercambiador de calor horizontalmente ($y = 6m$) como el caso de la Figura 26.

A diferencia de la Figuras 22, 23 y 24 donde la máxima velocidad ($Re = 1500$) obtuvo la mejor temperatura de salida, para el caso de las Figuras 25, 26 y 27; la velocidad mediana resulto la optima $Re = 500$.

La Tabla 7 muestra la temperatura de entrada, temperatura de salida y la diferencia entre estas (ΔT_{in-out}), para la hora fría correspondiente al día frío y la hora cálida correspondiente al día cálido, sin considerar el efecto del gradiente térmico anómalo.

Tabla 7: Modelado del EAHE sin gradiente térmico.

Día	Re	T_{in}	T_{out}	ΔT
Frío	100	12.3	11.4	-0.9
	500		12.98	0.68
	1500		13.22	0.92
Cálido	100	38.5	38.43	-0.07
	500		34.53	-3.97
	1500		35.23	-3.27

4.2.2. Modelado EAHE con gradiente

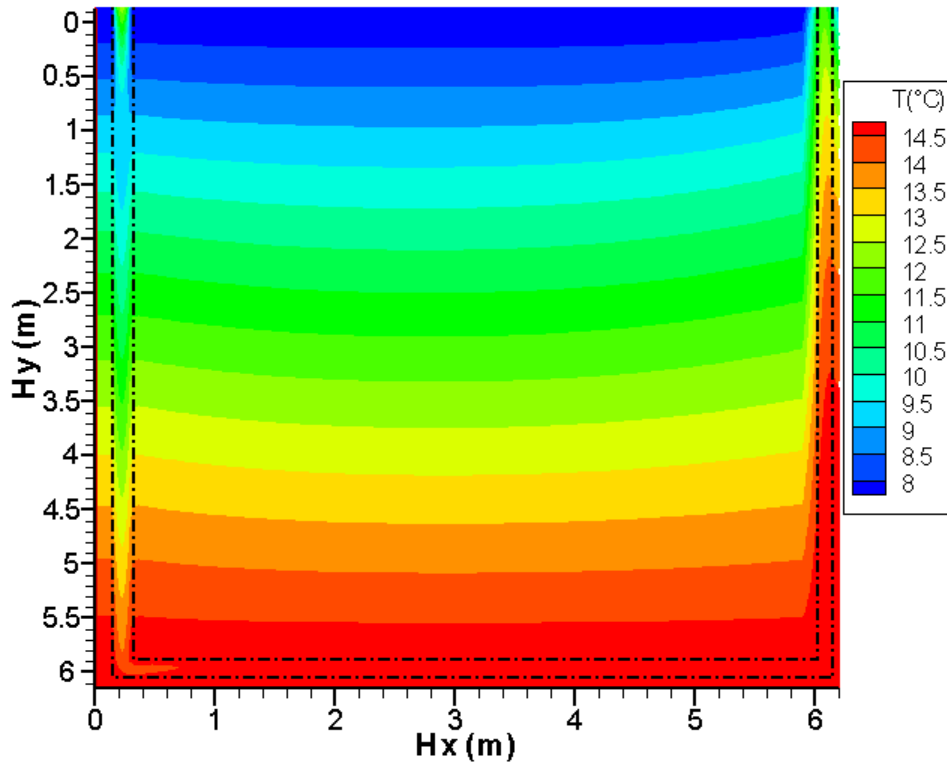


Figura 28: Campo de temperatura con gradiente (día frío 24:00 h)

$$Re = 100, T_{in} = 12.3^{\circ}C, T_{out} = 12.73^{\circ}C.$$

En el campo de temperatura presentado en la Figura 28 se observa que la temperatura del aire en la salida del EAHE es similar a su temperatura de entrada ($T_{out} \approx T_{in}$) presentando un ligero incremento ($\Delta T = 0.43^{\circ}C$) a diferencia de la Figura 22 donde la temperatura del aire en la salida del intercambiador de calor disminuye presentando un escenario no favorable para la temporada de invierno. Este incremento en la temperatura de salida se debe al aumento en la temperatura del subsuelo generado por el efecto del gradiente térmico.

Se observa que el aire alcanza el equilibrio termico con el subsuelo despues de entrar y recorrer 0.5 m en la seccion horizontal, peroal igual que el caso discutido de la Figura 22 un bajo numero de Reynolds $Re = 100$ no permite que el aire mantenga hasta su salida la temperatura alcanzada a maxima profundidad $y = 6m$. Tambien se observa que el subsuelo tiene una mayor variación

en sus curvas de temperatura, y alcanza una mayor temperatura en la sección horizontal $y = 6m$ del intercambiador de calor ($14^{\circ}C$) en comparación con la Figura 22 ($12^{\circ}C$), y es en esta sección horizontal donde realiza la mayor ganancia de calor. También se observa que el aire tiene una pérdida considerable de temperatura durante su ascenso a partir de ($y \leq 1.5m$).

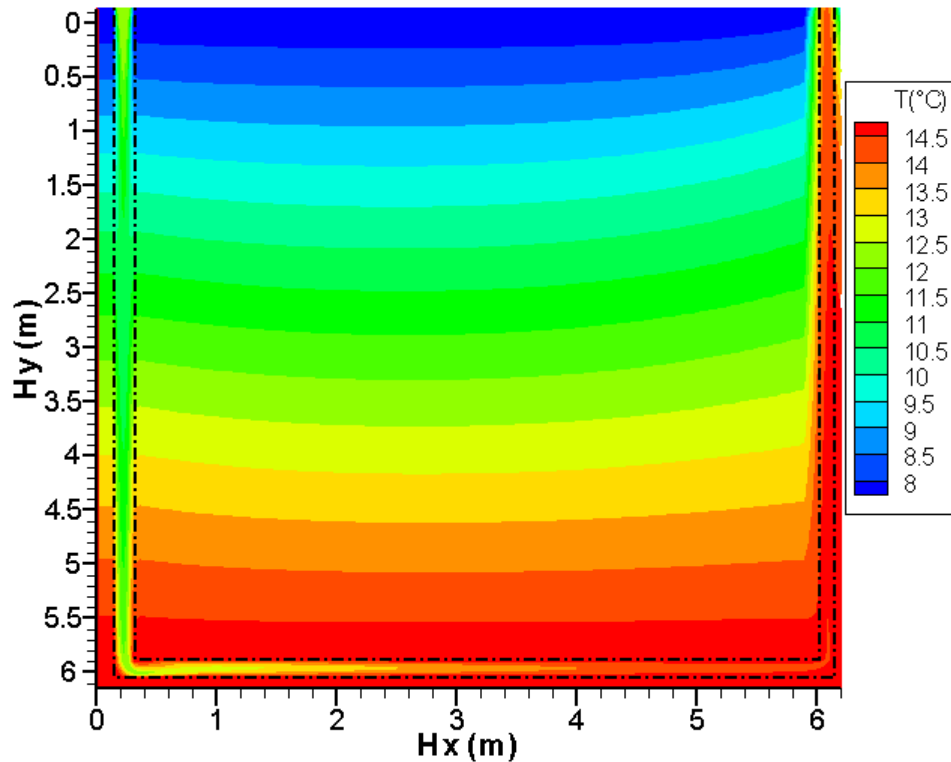


Figura 29: Campo de temperatura EAHE con gradiente (Día frío 24:00 h)

$$Re = 500, T_{in} = 12.3^{\circ}C, T_{out} = 15.11^{\circ}C.$$

En el campo de temperatura presentado en la Figura 29 se observa que la temperatura de salida del aire es mayor que su temperatura de entrada ($T_{out} > T_{in}$), comportamiento favorable para un EAHE durante la temporada de invierno. La temperatura del aire en la salida tiene un incremento de temperatura de ($\Delta T = 2.81^{\circ}C$) en comparación con su temperatura de entrada, y de ($\Delta T = 2.81^{\circ}C$) en comparación con la Figura 23 que representa el mismo escenario sin considerar el efecto del gradiente. Si bien la temperatura del aire en la entrada del EAHE ($T = 12.3^{\circ}C$) no es una temperatura extremadamente baja, el aumento de casi $3^{\circ}C$ a su salida es de utilidad para

alcanzar un confort térmico en edificaciones.

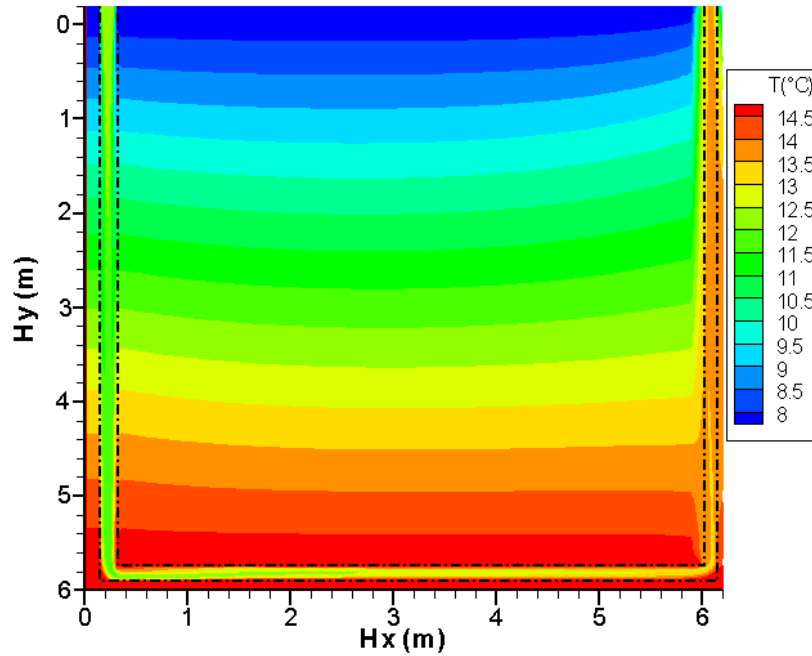


Figura 30: Campo de temperatura EAHE con efecto de gradiente (Día frío 24:00 h)

$$Re = 1500, T_{in} = 12.3^{\circ}C, T_{out} = 14.91^{\circ}C.$$

La Figura 30 representa el campo de temperatura con mayor velocidad para el escenario del día frío, se observa que al aumentar la velocidad de circulación del aire dentro del EAHE éste no realiza una buena transferencia de calor, debido a la disminución del tiempo de residencia dentro del intercambiador de calor; principalmente en la sección horizontal donde realiza la mayor ganancia de temperatura (Figura 25 y 29). Esto se ve reflejado en una disminución en la temperatura de salida de $.2^{\circ}C$ en comparación con la Figura 29, mas representa un aumento de $1.69^{\circ}C$ en comparación con la Figura 24 que representa el mismo escenario sin considerar el efecto del gradiente térmico.

Las Figuras 31, 32 y 33 representan los campos de temperatura obtenidos a partir del modelado del EAHE para la hora mas cálida (12:00 h) del día mas cálido del año 2016, considerando el efecto del gradiente térmico en el subsuelo, y utilizando diferentes números de Reynolds $Re = 100, 500$ y 1500 .

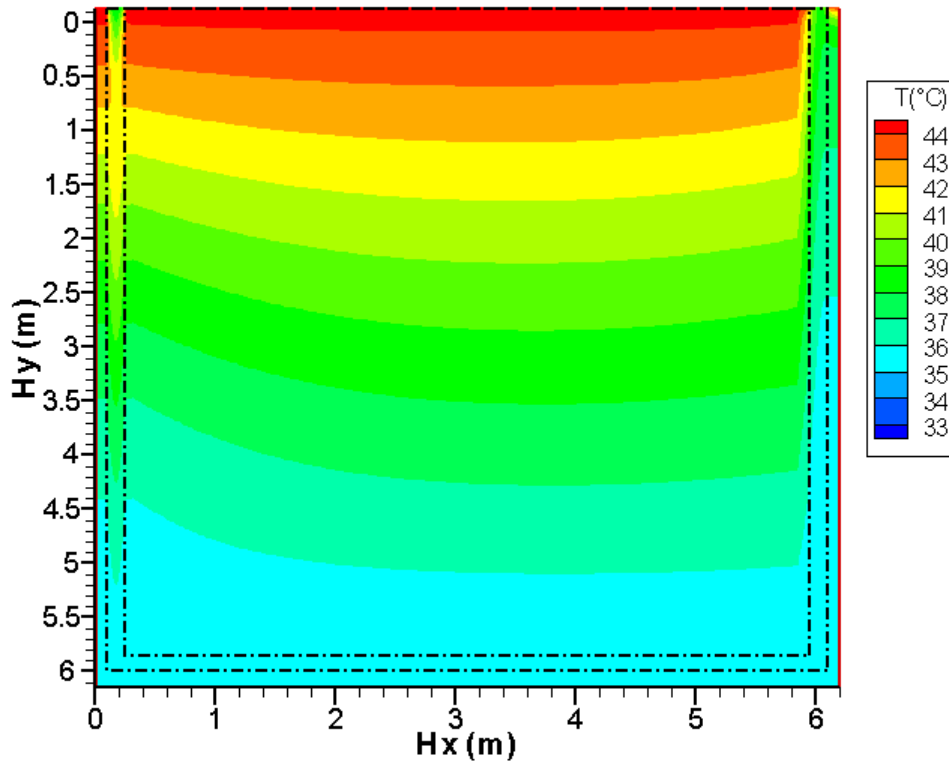


Figura 31: Campo de temperatura EAHE con efecto de gradiente (Día cálido 12:00 h)

$$Re = 100, T_{in} = 38.5^{\circ}C, T_{out} = 39.27^{\circ}C.$$

Debido al efecto que tiene el gradiente térmico en el subsuelo el campo térmico del EAHE representado en La Figura 31 muestra un evidente aumento de temperatura en $y = 6\text{ m}$ profundidad a la cual el aire recorre el intercambiador de calor de forma horizontal, de acuerdo en lo observado en Figuras anteriores de la sección 4.2, se sabe que es precisamente en esta sección donde el fluido realiza la mayor transferencia de calor durante su recorrido dentro del EAHE y por lo regular se pone en equilibrio con la temperatura del subsuelo, dado este factor es posible inferir que la temperatura del aire a la salida del EAHE será mayor en comparación con los escenarios representados por las Figuras 25, 26 y 27 (EAHE para día cálido sin gradiente), lo que representa un escenario poco favorable para el desempeño de un EAHE durante la temporada de verano, donde se busca esencialmente realizar una dismuncion de temperatura en el fluido para propósitos de refrigeración.

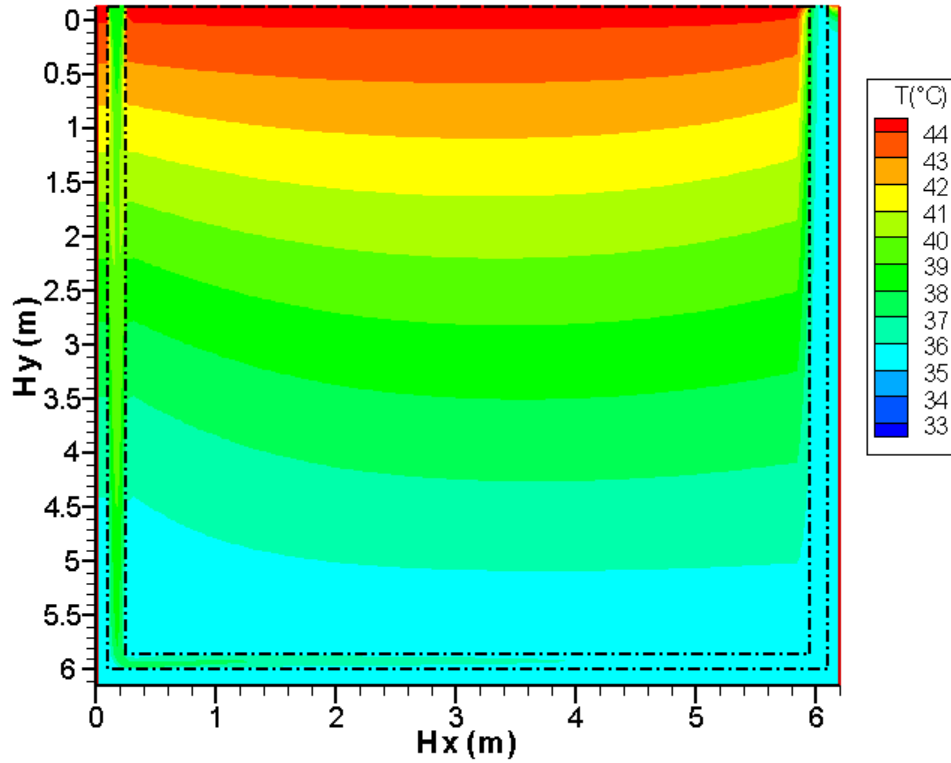


Figura 32: Campo de temperatura EAHE con efecto de gradiente (Día cálido 12:00 h)

$$Re = 500, T_{in} = 38.5^{\circ}C, T_{out} = 36.29^{\circ}C.$$

El campo de temperatura de la Figura 32 muestra una disminución en la temperatura del aire en la salida del EAHE con respecto a su temperatura de entrada $\Delta T = -2.21^{\circ}C$, a pesar del aumento en la temperatura del subsuelo en $y = 6\text{ m}$ discutido en el párrafo anterior. Se observa que el aire disipa calor considerablemente durante su descenso inicial $y \geq 0$ y en el inicio de la sección horizontal $x \leq 3.5$, hasta alcanzar el equilibrio con la temperatura del subsuelo una vez recorridos 4 m en la sección horizontal. También se observa que mientras el fluido recorre la sección de ascenso no realiza una transferencia de calor considerable debido al efecto del material aislante, por lo que el aire mantiene casi constante temperatura que alcanzó en la sección horizontal hasta su salida del EAHE. Cabe mencionar que para los casos de las Figuras 22, 23 y 24 (día cálido sin gradiente) un número de Reynolds $Re = 500$ resultó el óptimo.

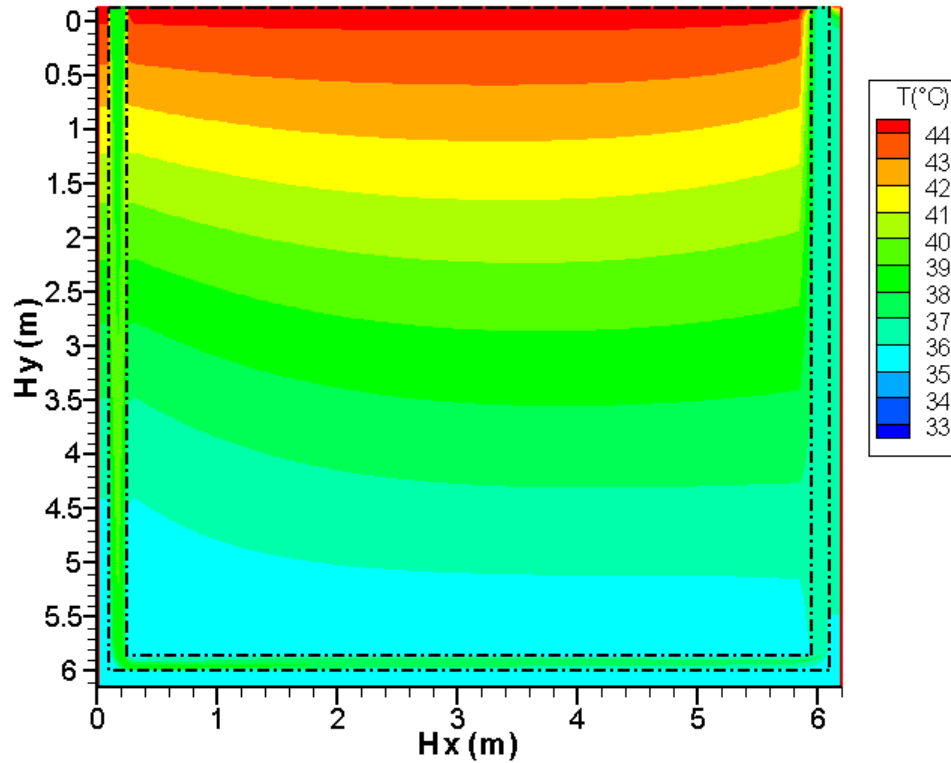


Figura 33: Campo de temperatura EAHE con efecto de gradiente (Día cálido 12:00 h)

$$Re = 1500, T_{in} = 38.5^{\circ}C, T_{out} = 36.62^{\circ}C.$$

Por ultimo, la Figura 33 muestra una temperatura de salida similar a la Figura 32; con un aumento de $0.33^{\circ}C$ en la temperatura de salida. Se observa que el aire llega con mayor temperatura a la sección horizontal en comparación con la Figura 32. El aire mantiene su temperatura durante el descenso y la mayoría del recorrido por la sección horizontal, siendo en la parte final de ésta y en la sección inicial de ascenso donde disipa una mayor cantidad de calor para ponerse en equilibrio con la temperatura del subsuelo y mantenerla casi constante hasta su salida del EAHE. Debido a que, al aumentar la velocidad de circulación el fluido tiene un menor contacto con el subsuelo.

La Tabla 8 muestra la temperatura de entrada, temperatura de salida y la diferencia entre estas (ΔT_{in-out}), para la hora fría correspondiente al día frío y la hora cálida correspondiente al día cálido, considerando el efecto que tiene el gradiente térmico anómalo sobre el comportamiento de la temperatura en el subsuelo. Se observa que el mayor diferencial de temperatura es para el día frío con $Re = 500$ donde la temperatura de salida es $15.11\text{ }^{\circ}\text{C}$ y aumenta $2.81\text{ }^{\circ}\text{C}$ en comparación con la temperatura de entrada. Por otra parte, el escenario menos favorable corresponde al día cálido con $Re = 100$ donde la temperatura de salida es mayor que la temperatura de entrada; siendo que durante la temporada de verano se espera reducir la temperatura de entrada del aire mediante el sistema EAHE.

Tabla 8: Modelado del EAHE con gradiente térmico.

Día	Re	T_{in}	T_{out}	ΔT
Frío	100	12.3	12.73	0.43
	500		15.11	2.81
	1500		14.91	2.61
Cálido	100	38.5	39.27	0.77
	500		36.29	-2.21
	1500		36.62	-1.88

5. Conclusiones

Los resultados obtenidos con el modelo del perfil de temperatura muestran que el flujo de calor latente por evaporación (CL) tiene un efecto considerable en el balance de energía en superficie ($y = 0$); debido al contenido de humedad en este punto del subsuelo, por lo tanto, no puede considerarse despreciable como el caso propuesto por Singh et al, (2017).

En los resultados obtenidos con los modelos de temperatura en el subsuelo, sin considerar el efecto del gradiente térmico específicamente a una profundidad de $y = 6\text{ m}$, se muestra a una temperatura de $32.40\text{ }^\circ\text{C}$ para el día mas cálido y $13.14\text{ }^\circ\text{C}$ para el día mas frío (ambos del 2016). Considerando la presencia de un gradiente térmico ($0.43\frac{^\circ\text{C}}{\text{m}}$) se alcanza a una temperatura de $35.06\text{ }^\circ\text{C}$ para el día mas calido y de $15.74\text{ }^\circ\text{C}$ para el día mas frio lo que resulta en un incremento de temperatura de $\Delta T = 2.6\text{ }^\circ\text{C}$ en ambos casos.

Considerando el primer escenario sin gradiente térmico, el mejor modelo de transferencia de calor del EAHE (con profundidad total de 6 m) para el día mas cálido corresponde a una temperatura de entrada del aire $T_{in} = 38.5\text{ }^\circ$ y una temperatura de salida $T_{out} = 34.53\text{ }^\circ$ con un numero de Reynolds $Re = 500$, lo que resulta en una diferencia de temperatura de $\Delta T = -3.97\text{ }^\circ\text{C}$. Para el día mas frío se tiene una temperatura de entrada $T_{in} = 12.3\text{ }^\circ$ y una temperatura de salida $T_{out} = 13.22\text{ }^\circ$ utilizando un número de Reynolds $Re = 1500$ lo que resulta en un diferencial de temperatura de $\Delta T = 0.92\text{ }^\circ\text{C}$.

Para el segundo escenario considerando el efecto del gradiente térmico, el mejor modelo de transferencia de calor del EAHE (con profundidad total de 6 m) para el día mas cálido corresponde a una temperatura de entrada del aire $T_{in} = 38.5\text{ }^\circ\text{C}$ y una temperatura de salida $T_{out} = 36.29\text{ }^\circ\text{C}$ con un numero de Reynolds $Re = 500$, lo que resulta en una diferencia de temperatura de $\Delta T = -2.21\text{ }^\circ\text{C}$. Para el día mas frío se tiene una temperatura de entrada $T_{in} = 12.3\text{ }^\circ$ y una temperatura de salida $T_{out} = 15.11\text{ }^\circ\text{C}$ con un número de Reynolds $Re = 500$ presentando un diferencial de temperatura de ($\Delta T = 2.81\text{ }^\circ\text{C}$).

Con los resultados de ambos escenarios, asumiendo que el Ejido Alfredo V. Bonfil (ubicado dentro del CVLTV, BCS) puede presentar un tipo de suelo con características similares al de la caldera La Reforma y, que las condiciones meteorológicas son las mismas para ambos lugares, se puede inferir que es posible utilizar un EAHE para clima de edificaciones, particularmente en viviendas.

6. Recomendaciones

Se recomienda perforar un pozo somero en el ejido Ejido Alfredo V. Bonfil con la finalidad de identificar la litología del subsuelo y mejorar el modelo de transferencia de calor con información del sitio.

Utilizar el modelo de EAHE para realizar nuevos estudios de transferencia de calor a mayor profundidad y analizar la factibilidad de otras aplicaciones de uso directo de la energía geotérmica.

Realizar un estudio estadístico sobre el consumo energético destinado a clima de edificaciones en las viviendas del Ejido Alfredo V. Bonfil.

Apéndice 1: Funciones de temperatura

Tabla 9: Funciones de temperatura para día cálido (05/06/16) sin gradiente térmico.

$y(m)$	T	$T(y)^*$	$y(m)$	T	$T(y)^*$
0	42.971583	42.867	3.080705	35.571879	35.54066083
0.025046	42.881923	42.78615397	3.130798	35.490617	35.46051955
0.225417	42.186507	42.15316197	3.331169	35.175387	35.15084355
0.425788	41.531367	41.54435348	3.53154	34.87599	34.85824367
0.62616	40.918032	40.95926711	3.731911	34.59258	34.58226135
0.826531	40.344119	40.39745016	3.932282	34.325277	34.32243806
1.026902	39.805558	39.8584411	4.132653	34.074141	34.07831526
1.227273	39.297895	39.34178138	4.333024	33.839169	33.84943439
1.427644	38.816989	38.84701248	4.533395	33.620286	33.63533693
1.628015	38.359346	38.37367584	4.733766	33.417343	33.43556432
1.828386	37.922215	37.92131292	4.934137	33.230122	33.24965803
2.028757	37.503565	37.48946518	5.134508	33.058339	33.07715951
2.229128	37.101997	37.07767408	5.334879	32.901649	32.91761022
2.429499	36.716625	36.68548107	5.53525	32.759653	32.77055162
2.62987	36.346958	36.31242762	5.735622	32.631904	32.63552452
2.830241	35.992792	35.95805517	5.935993	32.517916	32.51207172
3.030612	35.654117	35.6219052	6.136364	32.417167	32.39973398

* $T(y)$: Representa un polinomio de 2do orden para calcular la temperatura en función de la profundidad y ,

$$*T(y) = -0.0095y^3 + 0.3076y^2 - 3.2356y + 42.867.$$

Tabla 10: Funciones de temperatura para día frío (03/02/16) sin gradiente térmico.

$y(m)$	T	$T(y)*$	$y(m)$	T	$T(y)*$
0	6.942144	6.9694	3.080705	10.126263	10.12466178
0.025046	6.974264	6.999697638	3.130798	10.167483	10.16644744
0.225417	7.225268	7.239340732	3.331169	10.32932	10.330543
0.425788	7.468036	7.474109794	3.53154	10.486358	10.48976452
0.62616	7.703718	7.704005958	3.731911	10.638683	10.64411201
0.826531	7.932988	7.92902693	3.932282	10.786377	10.79358547
1.026902	8.156234	8.14917387	4.132653	10.929517	10.93818489
1.227273	8.373677	8.364446777	4.333024	11.068177	11.07791028
1.427644	8.585449	8.574845652	4.533395	11.202426	11.21276164
1.628015	8.791637	8.780370495	4.733766	11.332332	11.34273897
1.828386	8.99231	8.981021305	4.934137	11.457958	11.46784226
2.028757	9.187537	9.176798082	5.134508	11.579365	11.58807152
2.229128	9.377391	9.367700827	5.334879	11.696615	11.70342675
2.429499	9.56195	9.55372954	5.53525	11.809768	11.81390795
2.62987	9.741301	9.73488422	5.735622	11.918883	11.91951563
2.830241	9.915532	9.911164867	5.935993	12.024023	12.02024874
3.030612	10.084737	10.08257148	6.136364	12.125251	12.11610781

* $T(y)$: Representa un polinomio de 2do orden para calcular la temperatura en función de la profundidad y ,

$$*T(y) = -0.0607y^2 + 1.2112y + 6.9694.$$

Tabla 11: Funciones de temperatura para día cálido (05/06/16) con gradiente térmico.

$y(m)$	T	$T(y)$	$y(m)$	T	$T(y)$
0	42.971583	42.867	3.080705	36.896582	36.86536398
0.025046	42.892692	42.79692375	3.130798	36.83686	36.80676269
0.225417	42.283437	42.25009128	3.331169	36.60779	36.58324622
0.425788	41.714456	41.72744232	3.53154	36.394552	36.37680587
0.62616	41.187281	41.22851591	3.731911	36.197302	36.18698308
0.826531	40.699527	40.75285849	3.932282	36.016158	36.01331932
1.026902	40.247126	40.30000896	4.132653	35.851182	35.85535605
1.227273	39.825622	39.86950877	4.333024	35.70237	35.71263471
1.427644	39.430876	39.4608994	4.533395	35.569646	35.58469678
1.628015	39.059392	39.07372229	4.733766	35.452862	35.4710837
1.828386	38.708421	38.7075189	4.934137	35.351801	35.37133694
2.028757	38.375931	38.36183069	5.134508	35.266177	35.28499795
2.229128	38.060522	38.03619912	5.334879	35.195647	35.21160819
2.429499	37.761309	37.73016564	5.53525	35.13981	35.15070912
2.62987	37.477802	37.44327172	5.735622	35.098221	35.10184198
2.830241	37.209796	37.1750588	5.935993	35.070393	35.06454871
3.030612	36.95728	36.92506836	6.136364	35.055804	35.0383705

* T_y : Representa un polinomio de 2do orden para calcular la temperatura en función de la profundidad y ,

$$*T(y) = -0.0095y^3 + 0.3076y^2 - 2.8056y + 42.867.$$

Tabla 12: Funciones de temperatura para día frío (03/02/16) con gradiente térmico.

$y(m)$	T	$T(y)^*$	$y(m)$	T	$T(y)^*$
0	6.942144	6.9694	3.080705	11.450966	11.44936493
0.025046	6.985034	7.010467418	3.130798	11.513726	11.51269058
0.225417	7.322197	7.336270042	3.331169	11.761723	11.76294567
0.425788	7.651125	7.657198634	3.53154	12.00492	12.00832672
0.62616	7.972966	7.973254758	3.731911	12.243405	12.24883374
0.826531	8.288396	8.28443526	3.932282	12.477258	12.48446673
1.026902	8.597802	8.59074173	4.132653	12.706558	12.71522568
1.227273	8.901405	8.892174167	4.333024	12.931377	12.9411106
1.427644	9.199336	9.188732572	4.533395	13.151786	13.16212149
1.628015	9.491683	9.480416945	4.733766	13.367852	13.37825835
1.828386	9.778516	9.767227285	4.934137	13.579637	13.58952117
2.028757	10.059903	10.04916359	5.134508	13.787204	13.79590996
2.229128	10.335916	10.32622587	5.334879	13.990613	13.99742472
2.429499	10.606635	10.59841411	5.53525	14.189925	14.19406545
2.62987	10.872145	10.86572832	5.735622	14.385201	14.38583309
2.830241	11.132536	11.1281685	5.935993	14.5765	14.57272573
3.030612	11.3879	11.38573464	6.136364	14.763887	14.75474433

* T_y : Representa una función para calcular la temperatura en función de la profundidad y ,

$$*T(y) = -0.0607y^2 + 1.6412y + 6.9694.$$

Referencias

- [1] ARESTI, L., CHRISTODOULIDES, P., & FLORIDES, G. (2018). A REVIEW OF THE DESIGN ASPECTS OF GROUND HEAT EXCHANGERS., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 92, 757-773.
- [2] ASCIONE, F., D'AGOSTINO, D., MARINO, C., & MINICHELLO, F. (2016). EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER FOR NZEB IN MEDITERRANEAN CLIMATE., *Renewable energy*, 99, 553-563.
- [3] BELATRACHE, D., BENTOUBA, S., & BOUROUIS, M. (2017). NUMERICAL ANALYSIS OF EARTH AIR HEAT EXCHANGERS AT OPERATING CONDITIONS IN ARID CLIMATES., *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(13), 8898-8904.
- [4] BERTANI, R. (2016). *Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report.*, GEOTHERMICS, 60, 31-43.
- [5] ÇENGEL, Y. A., & BOLES, M. A. (2015). *Termodinámica (8a. ,* MCGRAW HILL MEXICO.
- [6] CHOUDHURY, T., & MISRA, A. K. (2014). MINIMIZING CHANGING CLIMATE IMPACT ON BUILDINGS USING EASILY AND ECONOMICALLY FEASIBLE EARTH TO AIR HEAT EXCHANGER TECHNIQUE., *Mitigation and adaptation strategies for global change*, 19(7), 947-954.
- [7] FLORIDES, G. A., & KALOGIROU, S. A. (2005). ANNUAL GROUND TEMPERATURE MEASUREMENTS AT VARIOUS DEPTHS.
- [8] GUPTA, H. K., & ROY, S. (2006). *Geothermal energy: an alternative resource for the 21st century.*, ELSEVIER.
- [9] JAYASHANKAR, B. C., SAWHNEY, R. L., & SODHA, M. S. (1989). EFFECT OF DIFFERENT SURFACE TREATMENTS OF THE SURROUNDING EARTH ON THERMAL PERFORMANCE OF EARTH-INTEGRATED BUILDINGS., *International Journal of Energy Research*, 13(5), 605-619.

-
- [10] KHABBAZ, M., BENHAMOU, B., LIMAM, K., HOLLMULLER, P., HAMDI, H., & BENNOUNA, A. (2016). EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF AN EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER FOR AIR COOLING IN A RESIDENTIAL BUILDING IN HOT SEMI-ARID CLIMATE., *Energy and Buildings*, 125, 109-121.
- [11] LEE, K. H., & STRAND, R. K. (2008). THE COOLING AND HEATING POTENTIAL OF AN EARTH TUBE SYSTEM IN BUILDINGS., *Energy and Buildings*, 40(4), 486-494.
- [12] LUND, J. W., & BOYD, T. L. (2016). DIRECT UTILIZATION OF GEOTHERMAL ENERGY 2015 WORLDWIDE REVIEW., *Geothermics*, 60, 66-93.
- [13] LLOPIS TRILLO, G., ANGULO, R., & DE MADRID, V. C. (2008). GUÍA DE LA ENERGÍA GEOTÉRMICA. *Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid.(FENERCOM)*.
- [14] MIHALAKAKOU, G., SANTAMOURIS, M., LEWIS, J. O., & ASIMAKOPOULOS, D. N. (1997). ON THE APPLICATION OF THE ENERGY BALANCE EQUATION TO PREDICT GROUND TEMPERATURE PROFILES., *Solar Energy*, 60(3-4), 181-190.
- [15] OZGENER, L. (2011). A REVIEW ON THE EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL ANALYSIS OF EARTH TO AIR HEAT EXCHANGER (EAHE) SYSTEMS IN TURKEY. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(9), 4483-4490.
- [16] OZGENER, O., OZGENER, L., & TESTER, J. W. (2013). A PRACTICAL APPROACH TO PREDICT SOIL TEMPERATURE VARIATIONS FOR GEOTHERMAL (GROUND) HEAT EXCHANGERS APPLICATIONS. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 62, 473-480.
- [17] RAMÍREZ-DÁVILA, L., XAMÁN, J., ARCE, J., ÁLVAREZ, G., & HERNÁNDEZ-PÉREZ, I.,(2014). NUMERICAL STUDY OF EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER FOR THREE DIFFERENT CLIMATES, *Energy and Buildings*, 76, 238-248.
- [18] ROMO-JONES, J. M., GUTIÉRREZ-NEGRÍN, L. C., FLORES-ARMENTA, M., DEL VALLE, J. L., & GARCÍA, A. (2017). MÉXICO COUNTRY REPORT., *IEA Geothermal*, 7.

-
- [19] SARBU, I., & SEBARCHIEVICI, C. (2014). GENERAL REVIEW OF GROUND-SOURCE HEAT PUMP SYSTEMS FOR HEATING AND COOLING OF BUILDINGS. *Energy and buildings*, 70, 441-454.
- [20] SERAGELDIN, A. A., ABDELRAHMAN, A. K., & OOKAWARA, S. (2016). EARTH-AIR HEAT EXCHANGER THERMAL PERFORMANCE IN EGYPTIAN CONDITIONS: EXPERIMENTAL RESULTS, MATHEMATICAL MODEL, AND COMPUTATIONAL FLUID DYNAMICS SIMULATION. *Energy conversion and management*, 122, 25-38.
- [21] SENA LOZOYA, E.B. (2019). EXPLORACIÓN SÍSMICA Y TÉRMICA SOMERA Y SU CORRELACIÓN CON COLUMNAS LITOLÓGICAS DE POZOS EN LA CALDERA LA REFORMA, BAJA CALIFORNIA SUR, MÉXICO. *Tesis de Maestría en Ciencias.*, CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN SUPERIOR DE ENSENADA, BAJA CALIFORNIA. 111 PP.
- [22] SINGH, R. K., & SHARMA, R. V. (2017). NUMERICAL ANALYSIS FOR GROUND TEMPERATURE VARIATION. *Geothermal Energy*, 5(1), 22.
- [23] XAMÁN, J., HERNÁNDEZ-PÉREZ, I., ARCE, J., ÁLVAREZ, G., RAMÍREZ-DÁVILA, L., & NOH-PAT, F. (2014). NUMERICAL STUDY OF EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER: THE EFFECT OF THERMAL INSULATION. *Energy and Buildings*, 85, 356-361.
- [24] XAMÁN, J. (2016). DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL PARA INGENIEROS. *Palibrio.*,
- [25] XAMÁN, J., HERNÁNDEZ-LÓPEZ, I., ALVARADO-JUÁREZ, R., HERNÁNDEZ-PÉREZ, I., ÁLVAREZ, G., & CHÁVEZ, Y. (2015). PSEUDO TRANSIENT NUMERICAL STUDY OF AN EARTH-TO-AIR HEAT EXCHANGER FOR DIFFERENT CLIMATES OF MÉXICO. *Energy and Buildings*, 99, 273-283.