



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
ENERGÍA – FUENTES RENOVABLES

VALIDACION DE UN SIMULADOR PARA EL DISEÑO DE INTERCAMBIADORES DE
CALOR AIRE-TIERRA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
IRENE YASMIN DÍAZ VÁZQUEZ

TUTOR PRINCIPAL
JORGE A. WONG LOYA INSTITUTO DE ENERGIAS RENOVABLES

MORELOS, MÉXICO, NOVIEMBRE 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Santoyo Gutiérrez Edgar Rolando

Secretario: Dr. García Valladares Octavio

Vocal: Dr. Wong Loya Jorge Alejandro

1^{er}. Suplente: Dr. Xáman Villaseñor Jesús

2^{do}. Suplente: Dr. Andaverde Arredondo Jorge A.

Lugar donde se realizó la tesis: Instituto de Energías Renovables (Temixco – Morelos)

TUTOR DE TESIS:

Dr. Wong Loya Jorge Alejandro

FIRMA

Agradecimientos

A mi familia por siempre apoyarme en cada decisión de mi carrera profesional.

Al Dr. Jorge Alejandro Wong Loya por siempre confiar en mis conocimientos y apoyarme para conseguir mis proyectos personales y profesionales.

Al personal del Instituto de Energías Renovables por ser un segundo hogar durante mi estancia fuera de mi estado y todo el apoyo personal y profesional que me brindo como alumna.

Al proyecto PAPIME PE110319 por el apoyo para lograr desarrollar la etapa experimental de la presente tesis.

Contenido

CAPÍTULO I	4
1.1 INTRODUCCIÓN	4
1.2 OBJETIVOS	7
1.2.1 GENERAL	7
1.2.2 PARTICULAR	7
1.3 ESTADO DEL ARTE	8
1.3.1 ESTUDIOS DE LA VARIACION DE LA TEMPERATURA CON LA PROFUNDIDAD Y LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL SUELO EN EL MUNDO.	9
1.3.2 ESTUDIOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR AIRE-TIERRA MODELADOS O TEÓRICOS EXPERIMENTALES.	11
1.3.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR AIRE-TIERRA CON APLICACIÓN DE CLIMATIZACIÓN	13
1.3.4 SIMULADORES PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR AIRE-TIERRA	15
1.4 METODOLOGÍA	18
CAPÍTULO II EL SUELO	22
2.1. PERFIL DEL SUELO	23
2.2. COMPORTAMIENTO TÉRMICO	24
2.2.1. PERFIL DE TEMPERATURAS	26
2.3. TIPOS DE SUELO EN EL MUNDO	28
2.4. EL SUELO EN CCH VALLEJO UNAM	30
CAPÍTULO III BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS E INTERCAMBIADORES DE CALOR	32
3.1 BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS	32
3.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR	34
3.2.1 INTERCAMBIADORES DE CALOR GEOTÉRMICOS	34
3.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR GEOTÉRMICOS AIRE-TIERRA	35
3.2.3 TIPOS DE CONEXIONES EN INTERCAMBIADORES DE CALOR GEOTÉRMICOS AIRE-TIERRA	36
3.3 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA IMPLEMENTADO PARA LA PRESENTE TESIS.	39

CAPÍTULO IV SIMULADOR DE AHE	41
4.1 EL SIMULADOR DE AHE	41
4.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR	42
4.2.1 HIPÓTESIS Y SUPOSICIONES	42
4.3 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE INSTALACIÓN	44
4.3.1 PARÁMETROS TERMO FÍSICOS DEL SUELO	45
4.3.2 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE	46
4.3.3 TEMPERATURA ESTABLE DEL SUBSUELO	46
4.4 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	46
4.4.1 ECUACIONES PARA DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR	48
4.4.2 PARÁMETROS TERMO FÍSICOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR	51
4.4.3 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR PARA DIFERENTES EFECTIVIDADES.	51
CAPÍTULO V METODOLOGIA	53
5.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL	53
5.2 ETAPAS EXPERIMENTALES PARA LA VALIDACIÓN DEL SIMULADOR DE AHE	54
5.2.1 ETAPA UNO	54
5.2.2 ETAPA DOS.	55
5.3 ADQUISIDOR DE DATOS AGILENT INSTRUMENT PARA MEDICIONES DE TEMPERATURA DEL SUELO.	56
5.4 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DEL SUELO CON EQUIPO KD2 PRO.	57
5.5 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DEL AIRE CON EQUIPO WINDSONIC.	59
CAPÍTULO VI ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
6.1 PROPIEDADES DEL SUELO	62
6.2 PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DEL SUELO	62
6.2 RESULTADO Y ANALISIS DE LAS MEDICIONES DE TEMPERATURAS DEL SUELO A DIFERENTES PROFUNDIDADES	63
6.2.1 ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS MEDICIONES SUPERFICIAL, 50 CM Y 1 METRO DE LA TEMPERATURA DEL SUELO.	63
6.2.2. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PRIMER MÓDULO DEL SIMULADOR.	71

6.3 ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR UTILIZANDO AIRE CALIENTE EN LA ENTRADA.	73
6.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR UTILIZANDO AIRE DEL MEDIO AMBIENTE EN LA ENTRADA	76
6.4.1 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL SIMULADOR DE AHE, RESPECTO AL DISEÑO Y EFECTIVIDADES DEL INTERCAMBIADOR CALOR AIRE-TIERRA	80
6.5 VALIDACIÓN DEL SIMULADOR CALCULANDO TEMPERATURA DE SALIDA CON EL SIMULADOR CONTRA TEMPERATURA DE SALIDA EXPERIMENTAL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE-TIERRA.	84
CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	89
BIBLIOGRAFÍA	88

CAPÍTULO I

1.1 INTRODUCCIÓN

La agencia internacional de energía señala que la eficiencia energética ha sido un tema importante en la reducción del consumo energético, no sólo como el "combustible oculto" sino como el "primer combustible" (1). "La eficiencia energética es el hecho de minimizar la cantidad de energía necesaria para satisfacer la demanda sin afectar su calidad" (2).

Entre las importantes contribuciones a la eficiencia energética en la climatización de espacios, el aprovechamiento de las propiedades del suelo se muestra como una alternativa, aunque el aprovechamiento del suelo no es nuevo ya que existen registros de que en los años 3000 a. C. los Iranís ya utilizaban el suelo acoplado con una torre de viento como métodos de climatización de espacios (3), pero la explotación para climatización de modo comercial se ve en crecimiento lento. Existen equipos llamados bombas de calor geotérmicas que están compuestas por un intercambiador de calor acoplado a una bomba de calor geotérmica, lo cual permite aprovechar el subsuelo como fuente o sumidero de calor (4). La bomba de calor es un dispositivo capaz de aumentar o disminuir la temperatura de un sistema, "bombeando" el calor de un lugar a otro, utilizando la energía eléctrica como fuente de energía (5).

Las bombas de calor geotérmicas se han utilizado durante algunos años como una propuesta de ahorro de energía sostenible para el aire acondicionado en espacios comerciales y residenciales, logrando alcanzar hasta un 30% de reducción en el consumo energético de una casa típica (6).

Actualmente la mayor parte de la población mexicana climatiza espacios por medio de equipos convencionales con alto consumo de electricidad, el alto consumo de estos equipos es tan significativo en las facturas eléctricas que en algunos lugares se podría considerar un lujo al no poder pagar la electricidad necesaria para un equipo de climatización. La fuente de energía para la electricidad de los equipos en la mayoría de los casos proviene de fuentes de energía **no renovables**, como los fósiles, lo que significa que al producir y consumir la energía eléctrica estamos promoviendo el calentamiento global.

Existen **fuentes de energía renovable** que, se presentan como una alternativa al ser más amigables con el medio ambiente que las fuentes de energía convencionales, previniendo el calentamiento global al reducir la cantidad de contaminantes que se emiten al planeta. El sistema de climatización geotérmico consta de dos partes principales: una es la bomba de calor geotérmica y la otra es un intercambiador de calor (sistema de tuberías enterradas), ambos están acoplados, aunque dependiendo de los requerimientos térmicos del espacio, se puede optar por utilizar un intercambiador de calor que se conecte directamente al espacio a climatizar. Los intercambiadores de calor geotérmicos representan una de las partes clave del sistema de climatización geotérmico porque su función principal es intercambiar energía térmica entre el subsuelo y el espacio a climatizar o con la bomba de calor geotérmica. Existen diferentes clasificaciones de los intercambiadores de calor, por su diseño, tipo horizontal o vertical y en diferentes configuraciones para casos específicos que dependen del área de instalación (7).

El funcionamiento de un intercambiador de calor geotérmico aire-tierra consisten generalmente en el intercambio de calor entre el suelo y un fluido que circula a través de un tubo que está enterrado en el suelo, con el propósito de aumentar o disminuir la temperatura del fluido y luego retornar al espacio a climatizar (5), como se muestra de forma esquemática en la Figura 1.1.

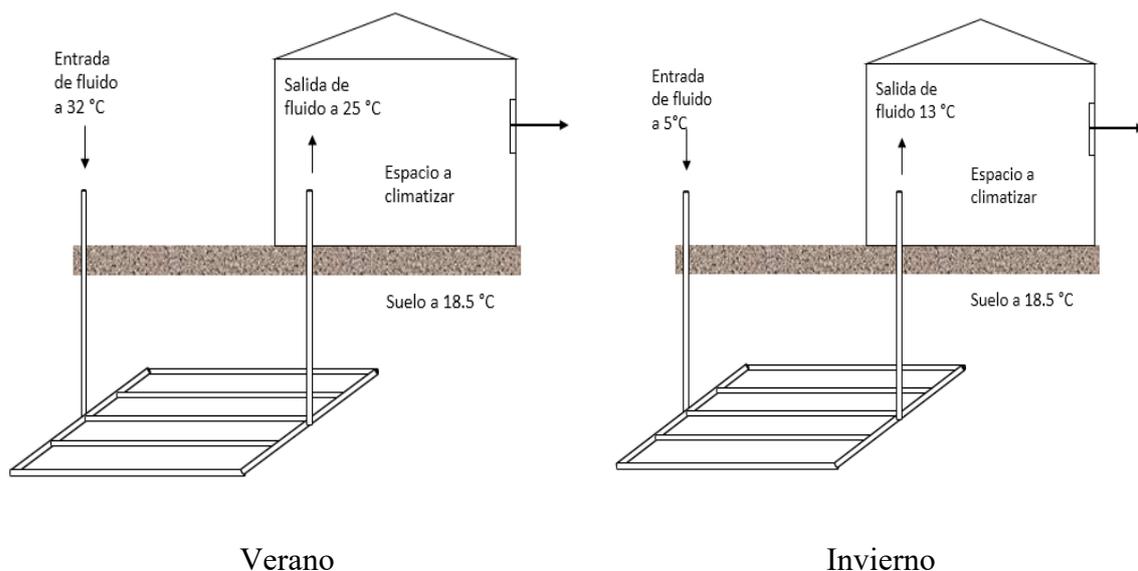


Figura 1.1 Representación del funcionamiento de un intercambiador de calor en verano e invierno.

El fluido a utilizar para la figura 1.1 es aire, la decisión de utilizar aire como fluido de trabajo para el presente estudio se tomó porque se busca el máximo ahorro por medios pasivos de climatización (8; 9), y aunque el agua tiene un mejor coeficiente de transferencia de calor se debe de utilizar en ciclos cerrados, necesita mayor mantenimiento y mayor consumo energético para movimiento de fluido, la aplicación con agua normalmente se utiliza para espacios grandes y para intercambiadores de calor verticales, que se explican más adelante, que funcionan principalmente para calentamiento y se colocan en el suelo del espacio (“suelo radiante”) (10), otra opción es acoplarlo con un ciclo cerrado a una bomba de calor para mejorar su eficiencia (7). Mientras que con el aire se puede realizar una conexión directa al espacio a climatizar, siempre y cuando se garantice la calidad del aire y se estudie el cambio de fase en la tubería, utiliza menos energía para hacerlo fluir, su funcionamiento logra dar resultados favorables a baja profundidad (6) por lo que se pueden utilizar intercambiadores de calor horizontales que se explican más adelante y combinado con métodos pasivos de climatización de espacios como la arquitectura pasiva se pueden lograr resultados positivos (11) con menores costos de consumo energético y mantenimiento.

Debido a los costos de instalación, al tiempo requerido y el espacio disponible, es importante contar con parámetros correctos para el diseño del intercambiador de calor geotérmico para obtener una buena efectividad del sistema y evitar sobre o un mal dimensionamientos en los equipos.

Por lo tanto, los puntos importantes para analizar son: la profundidad de instalación, longitud de la tubería y diámetro, de aquí la idea de crear un simulador que facilite el dimensionamiento de los intercambiadores de calor aire-tierra y llevar a cabo su validación.

En la presente tesis se valida el simulador DEAHE (por sus siglas en inglés Design Earth to Air Heat Exchanger) que brinda información suficiente de diseño e instalación de un intercambiador de calor geotérmico aire-tierra horizontal, este simulador toma en cuenta el clima del lugar de instalación, las propiedades del suelo, el espacio disponible y las necesidades del espacio a climatizar.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 GENERAL

Validar experimentalmente el simulador Design Earth to Air Heat Exchanger (DEAHE) propuesto para el diseño e instalación de intercambiadores de calor aire-tierra horizontales.

1.2.2 PARTICULAR

Instrumentar y caracterizar los intercambiadores de calor aire-tierra instalados en CCH Vallejo- UNAM

Caracterizar el suelo de la zona donde se encuentran instalados los intercambiadores de calor

Registrar datos de la temperatura del suelo a lo largo del año.

Analizar la afectación de la temperatura del suelo debido al medio ambiente en diferentes épocas del año.

Determinar la efectividad de un intercambiador de calor aire-tierra experimentalmente y compararlo con los resultados obtenidos mediante el simulador DEAHE

1.3 ESTADO DEL ARTE

En esta sección se puede encontrar la revisión cronológica de los documentos publicados más relevantes acerca de cuatro temas de interés;

- i) Estudios de la variación de la temperatura del suelo con la profundidad y sus propiedades térmicas en el mundo, el propósito de esta primera sección es analizar la información que se tiene del suelo alrededor del mundo, como fueron evolucionando los métodos de adquisición de la información para predecir los parámetros como la temperatura del suelo, la difusividad térmica entre otros, con esta sección se obtendrá una metodología para las mediciones en la presente tesis y en caso de contar con la información necesaria hacer uso de la misma.
- ii) Estudio de los intercambiadores de calor aire-tierra modelados o teóricos experimentales, con el propósito de conocer los alcances que se han realizado del tema para tener un punto de partida en el enfoque teórico para el estudio de la presente tesis,
- iii) Aplicación de los intercambiadores de calor aire-tierra en edificaciones, para conocer la demanda internacional y nacional, los retos al aplicar la tecnología y los diferentes diseños propuestos a nivel comercial y experimental, sirviendo como base de diseño de la experimentación para la validación de la presente tesis,
- iv) Simuladores de intercambiadores de calor aire-tierra, en este apartado se presenta la conclusión de la búsqueda de simuladores similares al simulador DEAHÉ y en caso de existir alguno con los mismos alcances, también se agrega a continuación.

1.3.1 ESTUDIOS DE LA VARIACION DE LA TEMPERATURA CON LA PROFUNDIDAD Y LAS PROPIEDADES TÉRMICAS DEL SUELO EN EL MUNDO.

El estudio en general del uso del suelo desde la antigüedad se estudiaba a niveles ingenieriles con análisis de la transferencia de calor con el suelo por mencionar algunos; Scott et al. en 1965 (12), Goswami D.Y. y Dhaliwal A. S. en 1985 (13) y Goswami D.Y. y Ileslamlou S. en 1990 (14).

Con base en las propiedades térmicas del suelo para aplicación del intercambio de calor se plantean estudios teóricos experimentales detallados donde se analiza por medio de un intercambiador de calor, la ganancia o pérdida de energía térmica del suelo al hacer pasar un fluido(aire) a través del intercambiador de calor. Existen diferentes resultados y diferentes aplicaciones como se muestra a continuación en diversos artículos alrededor del mundo que abarcan desde 1950 hasta 2018.

De las primeras publicaciones del estudio del suelo se encuentra la de Penrod E. B. en 1950 que calculó con mediciones experimentales las propiedades térmicas del suelo, como requisito para la instalación de un sistema con un intercambiador de calor enterrado, que se acopla a una bomba de calor en el exterior. El propósito de la investigación fue buscar aprovechar el suelo como fuente de calor, para mantener el fluido de trabajo en estado líquido evitando la congelación, Se reportaron las propiedades termo físicas del suelo *in situ*. (15).

Hanks R. J., et al. en 1971 desarrolló un método numérico computacional para calcular la variación de la temperatura suelo, en función del tiempo y la profundidad y validó la información con mediciones experimentales. Propone como condiciones de frontera para el método analítico una difusividad térmica constante y un comportamiento de la fluctuación de la temperatura sinusoidal en el suelo. Teniendo como resultado un error con factor de 2 °C midiéndose cada tercer día, ya que con mediciones más prolongadas el incremento de error aumenta (16).

Bansal, M. S. et al. en 1983, estudio ubicado en Nueva Delhi, India, donde se realizó un análisis de la variación de la temperatura del suelo con la profundidad, encontrando

que a los 4 metros la temperatura se mantiene constante a lo largo del año, donde propone insertar una tubería de 10 metros de longitud para analizar la temperatura de entrada y salida para calcular la efectividad del sistema. Concluyendo con ganancia y pérdida de calor según sea el caso considerable para la climatización de espacios por la ganancia de calor en invierno y la pérdida de calor en verano con el intercambio de calor entre el aire circundante y la temperatura del subsuelo a 4 metros de profundidad (17).

Krarti M. en 1995, propone un modelo analítico para predecir la variación de la temperatura anual de la superficie del suelo, con datos meteorológicos fácilmente accesibles y las propiedades térmicas del suelo y lo compara con mediciones experimentales. El modelo analítico toma en cuenta la energía por convección, la insolación, la evaporación y la radiación de onda larga. Encontrando en base a sus resultados que existen dependencias con otros parámetros como: la tasa de evaporación, la humedad relativa del aire, la velocidad del viento y la absorción. Encontrando una ecuación que predice la temperatura con buena precisión (18).

Mihalakakou G. en 2002, al igual que el anterior realiza un estudio, donde propone dos métodos para el modelado y estimación de la temperatura diaria y anual de la superficie del suelo. Un modelo analítico que se basa en la ecuación diferencial de conducción de calor transitoria y un modelo de red neuronal que se basa en un algoritmo de retro propagación. Ambos métodos fueron comparados con las mediciones tomadas encontrando que el modelo analítico funciona mejor, por tomar en cuenta mayor cantidad de parámetros de entrada (19).

Masoomeh D. *et al.* en 2018, se realizó un estudio de la variación de la temperatura del suelo hasta 1 m de profundidad en las ubicaciones de Kerman, Ahvaz, Tabriz, Saghez y Rasht en Iran. El estudio se realizó haciendo una comparación entre el modelo de regresión de vectores de apoyo (por sus siglas en ingles SVR) y el modelo de regresión lineal múltiple (MLR), se calculó el coeficiente de determinación para la validación de los diagramas de dispersión entre las temperaturas medidas y simuladas encontrando que los valores del coeficiente de determinación varían de 0.67 a 0.97 mostrando una buena correlación. Concluyendo que en la parte superficial del suelo el comportamiento de ambos modelos es similar mientras que a mayor profundidad el modelo SVR demostró un

mejor desempeño. Ambos modelos tuvieron un mejor funcionamiento en condiciones de clima húmedos y agregando un componente de periodicidad al proceso de modelado (20).

1.3.2 ESTUDIOS DE INTERCAMBIADORES DE CALOR AIRE-TIERRA MODELADOS O TEÓRICOS EXPERIMENTALES.

A lo largo del tiempo los estudios fueron tomando diferentes vertientes, que depende la utilidad que se da a los estudios del suelo y las temperaturas encontradas con la profundidad. Uno de los usos es con intercambiadores de calor aire-tierra geotérmicos donde se utiliza principalmente la inercia térmica del suelo para precalentamiento o preenfriamiento de un fluido de trabajo para acoplarlo a otro sistema o de uso directo. Los estudios teóricos experimentales y modelaciones más relevantes y con mayor impacto para fines del presente estudio se muestran a continuación de forma cronológica;

Sodha M. S. *et. al.* en 1994 para este año el acondicionamiento con intercambiadores de calor aire-tierra ya está establecida por estudios realizados de la transferencia de calor entre el aire y el suelo, por diferentes autores desde los años 1980, en el presente estudio se evalúa la capacidad de refrigeración y calefacción de los sistemas existentes y la viabilidad de un sistema de tuberías en paralelo comparado con uno equivalente en un solo tubo de gran diámetro ambos se toman con 4 m de profundidad y con 60 m de longitud, usando el clima cálido y seco de Jodhpur y el clima compuesto de Delhi. El resultado es que a mayor número de tubería mejor el poder de enfriamiento y calentamiento por el aumenta el área efectiva de transferencia de calor, también se encontró la relación entre la separación de tubos enterrados con la capacidad de térmica. Se hace una comparación entre hormigón y PVC teniendo como resultado favorable hacia el hormigón para climas con características antes mencionados (21).

Sawhney R. L. y Usha Mahajan en 1994, evaluaron los parámetros de dimensionamiento de los intercambiadores de calor aire-tierra por medio de un enfoque numérico para 3 climas distintos, encontrando que como el requerimiento principal en 2 de las zonas estudiadas es de enfriamiento por lo que recomiendan la instalación de sistemas enterrados en con condiciones de superficie de sombras secas, iluminados en húmedo y sombreados en húmedo mostrando una mejora de 2.5-400% y para la zona con requerimiento de calefacción recomiendan tratado de tierra de tierra ennegrecida,

iluminada por el sol y ennegrecida y acristalada que muestran aumento del 60-170%, ambos casos con aire extraído del ambiente. El resultado con parámetros realistas agregando las condiciones mencionadas se estima que con la tarifa y el costo de instalación el periodo de amortización de un sistema varía entre 1.25 y 4 años (22).

Cucumo M., et al. en 2008, propuso un modelo transitorio unidimensional capaz de predecir los campos de temperatura del fluido de trabajo en la tubería y del suelo en la proximidad de la tubería, considerando la perturbación térmica de la superficie y el posible cambio de fase en la tubería. Se simuló con diferentes parámetros de entrada, con como el flujo másico, la temperatura de entrada y a diferentes profundidades. Realiza una comparación con datos experimentales reportados en la literatura encontrando un resultado similar a lo reportado con un máximo porcentaje de error de 10% (23).

Ozgener L. y Ozgener O. en 2010, realizó un estudio ubicado en Turquía, que destaca las características de rendimiento exergético de un intercambiador de calor aire-tierra horizontal de tubo galvanizado, en forma de U enterrado a 3 metros de profundidad con una longitud de 47 m que tiene una tubería de diámetro nominal de 56 cm. La tubería se encuentra equipada con termopares en la entrada y salida de aire y a diferentes distancias para medir el cambio de la temperatura. Encontró que las principales irreversibilidades se localizan en el intercambiador de calor enterrado y en el subconjunto del ventilador del motor por las eficiencias eléctricas y mecánicas. En cuanto a la demanda del espacio con este sistema se puede suministrar sin necesidad de algún otro apoyo para días de otoño con temperatura alta. El COP promedio para el periodo de experimentación fue de 10.09 y el valor total de eficiencia de exergía para el sistema basado en producto/combustible es 60,7% (24).

Trilok S. B. *et. al.* en 2014, publicó una revisión de modelos en una, dos y tres dimensiones, mostrando el proceso de evolución en cada modelo y los autores a cargo de las investigaciones. El resultado de la revisión es que los modelos de 1D, aunque son más sencillos y fáciles de manipular no alcanzan a analizar los sistemas completos de intercambiadores de calor aire-tierra, mientras que los de 2D y 3D proporcionan información más completa del sistema. El más popular para el 2014 son los 3D, aunque su manipulación requiere conocimiento avanzado de programación y más tiempo, en ellos

se pueden tratar problemas complejos con diferentes geometrías de malla y proporcional un análisis térmico completo del sistema (25).

Nurullah K. y Hakan D. en 2018, presentan un modelo numérico transitorio de la distribución de la temperatura del suelo para aplicaciones de climatización, específicamente simulando una oficina de 200 m² en Estambul, durante su estudio analizan el perfil de temperatura del suelo utilizando datos históricos meteorológico y condiciones de frontera realistas, este estudio simula para 10 años. También se investiga la afectación de algunos parámetros de diseño del intercambiador de calor enterrado demostrando la importancia de un correcto diseño (26).

1.3.3 INTERCAMBIADORES DE CALOR AIRE-TIERRA CON APLICACIÓN DE CLIMATIZACIÓN

La climatización en las edificaciones representa la mayor parte del consumo energético, con la propuesta arquitectónica pasiva acoplada en la parte energética con energías renovables y para la climatización un sistema de intercambiador de calor aire-tierra, entre otras implementaciones, se pueden lograr casas amigables con el medio ambiente, también llamadas “Casas Verdes” o por su nombre en inglés “Green House”. En la actualidad las Casas Verdes cada vez ganan más auge en el mercado gracias al crecimiento de la concientización ambiental.

A continuación, se muestra una revisión de la aplicación de intercambiadores de calor aire-tierra utilizados para la climatización de espacios alrededor del mundo, presentando los beneficios y ahorros logrados gracias a la tecnología.

Mavroyanopoulos G.N y Kyritsis en 1986 realizaron un estudio para poder recolectar y almacenar el excedente de energía térmica durante el día y reutilizarla en la noche, por medio de un intercambiador de calor aire-tierra instalado a 2 m de profundidad. Los resultados se compararon con un invernadero calentado con energía eléctrica y con uno sin calefacción. Los resultados demostraron que el sistema del intercambiador de calor aire-tierra no toma la energía térmica del espacio, si no que la toma del subsuelo por lo que si en invierno se encontraban a -3°C del intercambiador de calor salió a 7°C, por lo que para este caso no funciona sin embargo se concluye que para espacios localizados en

Sur de Grecia o con clima similar puede funcionar para mantener una diferencia de temperaturas del aire interior y exterior en invierno de entre 6°C y 9 °C (27).

Ghosal M.K. *et. al.* en 2004. Publicaron un modelo analítico simplificado para estudiar la eficacia durante un año de intercambiadores de calor aire tierra acoplados con un invernadero para la zona de Delhi, India. En intercambiador de calor aire-tierra es de PVC y está enterrado a 1 m de profundidad. El modelo matemático lo resolvieron con el software matemático MatLab. Los resultados muestran un aumento en la temperatura en invierno de 6-7°C y se disminuyó de 3-4°C en verano, en comparación con un espacio de sin intercambiador de calor aire-tierra, concluyendo que para este caso de estudio el sistema es más eficiente en invierno que en verano (28).

H. Breesch *et. al.* en 2005 realizaron un estudio de la climatización de un edificio de oficinas aplicando técnicas pasivas de enfriamiento nocturno y un intercambiador de calor aire-tierra para la reducción de la temperatura en la estación de verano en Kortrijk Belgica mediante una simulación en TRNSYS-COMIS. Encontrando durante la simulación que el impacto del sistema pasivo de enfriamiento es entre 3 -5 veces mejor que el sistema del intercambiador, mostrando como resultado que una combinación de los sistemas de enfriamiento brinda la mayor comodidad térmica. Para el caso de estudio se demostró que la ventilación natural es la más eficiente para el proyecto (8).

F. Al-Ajmi *et. al.* en 2006 modelaron en un intercambiador de calor aire-tierra, el proceso de transferencia de calor por convección entre el aire que fluye en la tubería y la superficie interna de la tubería, y la transferencia de calor por conducción entre la superficie externa de la tubería y el suelo. Se utilizó un edificio como ejemplo del requerimiento térmico para climatización y se modelo en TRNSYS-PREBID consiguiendo un pico de reducción de temperatura implementando el intercambiador de calor aire-tierra de 2.8 C con un ahorro de energía del 30% para climatización, concluyen que un intercambiador puede ayudar considerablemente a la reducción de la demanda energética para la refrigeración de espacios en Kuwait (29).

Wong-Loya, *et.al.* en 2011. Propusieron la implementación de un simulador para el metro de la ciudad de México con el objetivo de utilizar un intercambiador de calor y modificar la temperatura de entrada a la estación para aumentando los niveles de confort,

la estrategia para lograrlo fue creando un simulador que pueda calcular el perfil de temperatura y el diseño de un intercambiador de calor horizontal, analizar las propiedades termo físicas del suelo entre la estación y la superficie y una propuesta de diseño para su implementación. La conclusión de los autores es que se puede alcanzar una diferencia de temperatura de aproximadamente hasta 10 °C y que para la estación Mixcoac son necesarios 18 intercambiadores por lado de la estación a una profundidad de 6.5 metros, permitiendo obtener un flujo de aire volumétrico de 16200 m³/ h (30).

Huai Li *et. al.* en 2018 realizan una discusión de una propuesta de calentamiento para un edificio de oficinas que propone una edificación de casi cero energías (por sus siglas en ingles NZEB) en Beijing, China, integrando una combinación de la energía solar térmica y un sistema de intercambiador de calor geotérmico para el calentamiento durante la estación de invierno. En el estudio se presentando 3 modelos diferentes estudiados a fondo con sus respectivas consideraciones y equipos, los modelos con simulados en TRNSYS, encontrando que, aunque uno de los modelos domina en cuando al COP el consumo eléctrico también aumenta significativamente por lo que un modelo de bajo consumo energético con un COP de 5.03 es la mejor opción. También se simulan los tanques de almacenamiento de agua caliente y se estudia la afectación de la temperatura del suelo con la profundidad hasta los 100m con el sistema en funcionamiento. Como conclusión se muestra una buena referencia con resultados positivos para la combinación de las tecnologías para el calentamiento de espacios (31).

1.3.4 SIMULADORES PARA INTERCAMBIADORES DE CALOR AIRE-TIERRA

Tzaferis A. en 1992 realizó un análisis de los diferentes algoritmos que predicen el rendimiento de los intercambiadores de calor aire-tierra, tomando en cuenta las diferentes variables que se involucran, enfocando la investigación en la precisión de los algoritmos y la sensibilidad sobre los parámetros más importantes. Se analizaron 8 algoritmos disponibles en la literatura para el año 1992, en los cuales se requiere como datos de entrada el diseño, propiedades térmicas y temperaturas, proporcionando información de la transferencia de calor por convección y conducción entre el aire y el suelo. Encontrando que el valor medio del error es del 3.5% en la mayoría de los casos (32).

Mihalakakou G. et. al. en 1994, presenta un modelo numérico para calcular el rendimiento térmico en intercambiadores de calor aire tierra con una validación con datos experimentales precisos, el intercambiador de calor para el proceso de comparación consta de una tubería de 0.15 m de diámetro una longitud de 14.8 m de largo, una velocidad del aire de 10.5 m/s y se tomaron mediciones en la estación de verano durante 15 días. Los resultados demostraron que los datos experimentales y los datos calculados con el modelo numérico concuerdan con buenos resultados y muy similares, en las temperaturas, de salida, del aire en el interior de la tubería, alrededor de la tubería enterrada y del rendimiento térmico general del intercambiador de calor (33).

Hollmuller P. y Lachal B. en 2001, realizan un monitoreo, simulación y análisis de los aspectos económicos del enfriamiento y precalentamiento con sistemas de tuberías enterradas. Estudian el comportamiento del intercambio de calor sensible y latente en el sistema. La simulación numérica se realizó en TRNSYS y se validó con un monitoreo en sitio ubicado en el centro de Europa. Los resultados mostraron que para el precalentamiento con sistema de tubería enterrada no es competitiva contra los combustibles, además del tema de la filtración de agua y cambios en el rendimiento, mientras que para el enfriamiento si se muestra favorable la aplicación de sistemas convencionales. La discusión económica muestra la importancia de poner atención en la relación temperatura-profundidad (34).

Bandescu V. en 2007 publica la aplicación de un modelo bidimensional numérico transitorio aplicado a un intercambiador de calor de suelo que permite calcular la temperatura superficial y a diferentes profundidades de manera simple y precisa. El modelo integra aproximaciones teóricas existentes y se implementa dentro del código computacional existente para simular el funcionamiento del sistema de calefacción en Pirmasens PH, Alemania. Se investigó el potencial de calentamiento y enfriamiento en condiciones climáticas del sitio. La implementación de un intercambiador de calor de suelo a diferentes profundidades muestra temperaturas positivas durante todo el año a partir de un metro de profundidad mientras que la temperatura ambiente llega a alcanzar una temperatura mínima de -15°C , también se demostró que a partir de los 4 metros de

profundidad la temperatura se mantiene constante y no afecta el rendimiento del sistema. En cuanto al diseño el autor concluye con la relación de profundidad contra eficiencia y costo de excavación, así como de la importancia de los parámetros de diseño como la profundidad, el diámetro y el material de la tubería (35).

El simulador que se valida en esta tesis fue presentado, por el Dr. Wong-Loya, en el congreso internacional sobre energía aplicada por sus siglas en inglés ICAE en el año 2010, el objetivo del trabajo es la presentación de un simulador que permite obtener el perfil de temperatura y propone diseños, para diferentes efectividades, de intercambiadores de calor geotérmicos horizontales. El simulador calcula la profundidad donde la variación de la temperatura del suelo no es mayor de 1 °C, este estudio se realiza para diferentes estados de EE.UU. y México, posteriormente el simulador calcula y proporciona una relación entre la temperatura de salida del intercambiador de calor con diferentes efectividades, de este análisis se observa que a medida que se aumenta la efectividad, el intercambiador necesitará más área para su instalación, lo que se traduce en un aumento del costo de instalación y material (36).

Muhammad M. A. B. *et. al.* en 2012, publicaron una revisión bibliográfica de la aplicación de la dinámica de fluidos computacional (por sus siglas en inglés CFD) en el campo del diseño de los intercambiadores de calor específicamente en la mala distribución del flujo de fluido, ensuciamiento, caída de presión y análisis térmico en la fase de diseño y optimización. Existen diferentes tipos de lenguajes de programación entre ellos FORTRAN que es de los más utilizados en esta aplicación. Los CFDs se muestran como una alternativa rentable para el diseño y la optimización. Los simuladores generalmente dan resultados que concuerdan con los estudios experimentales que van del 2 al 10%, por lo que los CFD son una parte integral de los procesos de diseño que involucran fluidos evitando la necesidad de crear prototipos para analizarlos (37).

Guohui G. en 2017, realizó una simulación térmica numérica en 2D y 3D con el método de volumen de control. Con el propósito de comparar el rendimiento de un intercambiador de calor aire-tierra y un intercambiador de calor líquido tierra, la simulación se valida con FLUENT, ambos intercambiadores de calor mantienen las características de diseño típicas en cuanto a velocidades del fluido, diámetro de tubería y ambos enterrados a 1.5 m de

profundidad, para el sur de Inglaterra. Los resultados mostraron que la transferencia diaria de calor depende de la humedad del suelo, en el intercambiador de calor aire-tierra muestra menor afectación, para su aplicación recomiendan acoplarlo a un sistema de bomba de calor en lugar de un sistema de climatización eléctrico ya que mejora el rendimiento (38).

1.4 METODOLOGÍA

La metodología que se siguió para el desarrollo de la presente tesis se representa en la Figura 1.2 y se describe el proceso para la validación del simulador DEAHÉ.

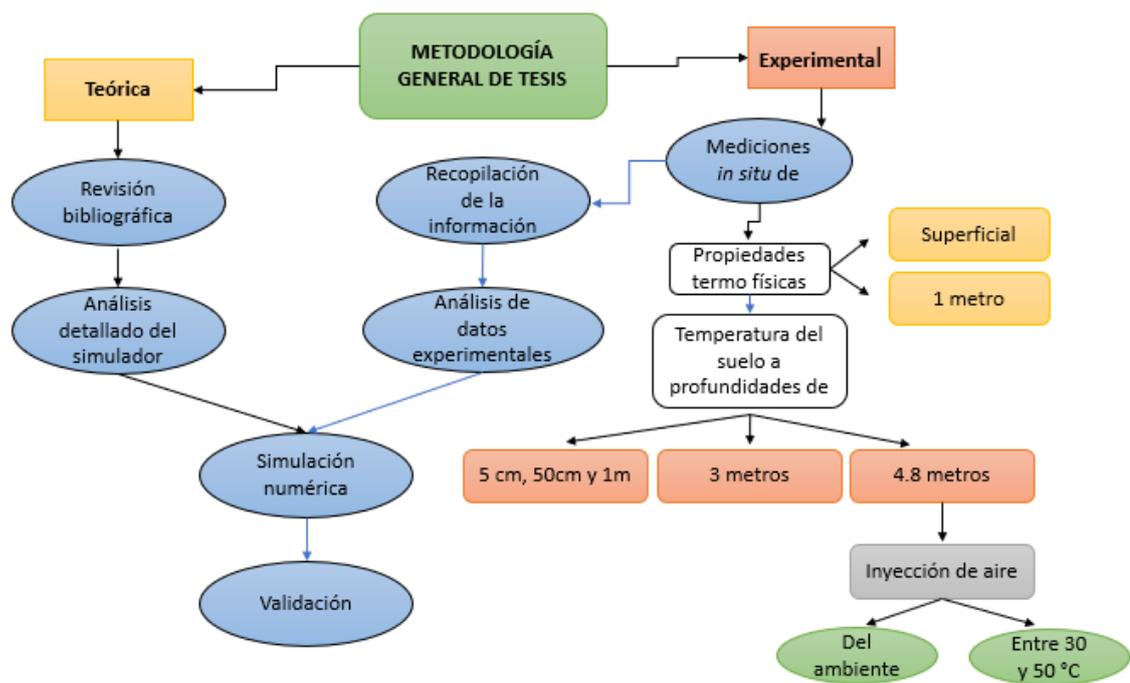


Figura 1.2 Diagrama de metodología general de la presente tesis.

A continuación, se mencionan puntos de referencia con orden de acción de la presente tesis dividida en los primeros dos puntos en temas de investigación (teórica) y segunda parte experimental donde se abordan detalles de las mediciones.

1.- Revisión de literatura internacional y nacional a lo largo del tiempo de la aplicación de intercambiadores de calor geotérmicos aire-tierra para climatización de espacios y simuladores para investigar trabajos pasados del tema de interés.

2.- Análisis de la estructura, modelos teórico y matemático en que se basa el simulador DEAHÉ, garantizando un completo entendimiento de la estructura y manipulación del simulador.

3.- Medición de las propiedades termo físicas del suelo a diferentes profundidades, con equipo especializado (KD2-Pro).

4.- Obtención de mediciones de temperaturas de la superficie, a 50 cm y 1 metro para determinar la estabilización de la temperatura con la profundidad del suelo.

5.- Medición de temperatura en un intercambiador de calor a 3 metros de profundidad, que se encuentra equipado con termopares colocados por dentro y construido con tubería de PVC, para la validación de la estabilidad de la temperatura del suelo comparada con el medio ambiente.

6.- Medición de temperatura en un intercambiador de calor, colocado hasta 4.8 metros de profundidad haciendo pasar aire con dos variantes;

a) Simulando la salida de aire caliente de una industria, inyectando aire con temperaturas entre los 30 y 50°C obteniendo información de la variación de la temperatura del suelo y de la entrada y salida del aire, para calcular la efectividad del sistema bajo estas condiciones.

b) Con el propósito de simular un equipo en funcionamiento para climatización de espacios con las características de la zona, se va a hacer pasar aire proveniente del medio ambiente, con esto se espera analizar la recuperación del suelo en el día y la noche y corroborar que el equipo está haciendo una aportación térmica a la salida del intercambiador, calculando su efectividad.

7.- Con los datos obtenidos de la estación meteorológica localizada en CCH Vallejo UNAM, las características de los equipos y las propiedades termo físicas del suelo obtenidas en el punto 3, se tendrá la información suficiente que requiere el simulador para determinar la efectividad de trabajo del sistema.

8.- Se calculará con el simulador la profundidad en la que la variación de la temperatura es menor a 1°C.

9.- Se comparará el punto 4 y 5 con el 8 para evaluar la diferencia entre los cálculos del simulador y las mediciones realizadas *in-situ* para validar la primera parte del simulador donde la profundidad en la que la temperatura no varía más de 1°C la temperatura.

10.- Se analizará la diferencia entre las efectividades calculadas en el paso 6 con el 7 teniendo como parámetro fijo la longitud de la tubería en sitio en la parte experimental.

11.- Se realizará un análisis estadístico con la temperatura de salida que predice el simulador y la temperatura real medida *in situ*, con las consideraciones correspondientes para validar la segunda parte del simulador donde se genera el diseño del intercambiador de calor aire-tierra.

Las mediciones del proceso experimental se llevan a cabo en el norte de la Ciudad de México, en las instalaciones del Colegio de Ciencias y Humanidades (CCH) Vallejo UNAM por accesibilidad a la zona ya que se encuentran instalados e instrumentados dos intercambiadores de calor que servirán para el proceso experimental de la presente tesis.

Concluyendo con las actividades propuestas se podrá corroborar si la información brindada por el simulador presenta un porcentaje de error razonable (menor al 5%) y suficiente para poder tomarse en consideración para su implementación en trabajos futuros.

El presente trabajo de tesis se divide en VII capítulos, en el capítulo I se presenta una introducción con una explicación general de la tesis, junto con los objetivos, estado del arte y la metodología de formar general. El capítulo II, está compuesto por una descripción del suelo y su importancia, los diferentes tipos de perfiles que existen según la literatura, cómo es su comportamiento térmico, así como los perfiles de temperatura con respecto a la profundidad y los diferentes tipos de suelo que existen en el mundo. En el capítulo III se explican los diferentes tipos de bombas de calor, sus componentes y una revisión detallada de los diferentes tipos de intercambiadores de calor, las ventajas y desventajas de cada uno, hasta concluir con el que es objeto de estudio en este caso. En el capítulo IV

se aborda el simulador para el diseño e instalación de intercambiadores de calor aire-tierra por sus siglas en inglés DEHAE de forma detallada, explicando las ecuaciones que se resuelven, las consideraciones que se hacen para llevar a cabo la simulación y los resultados que se obtienen a partir de éste. En el capítulo V se explica la metodología experimental y los equipos utilizados, en el capítulo VI se presentan los resultados y su análisis, para finalizar con el capítulo VII Conclusiones, productos y trabajos futuros.

CAPÍTULO II EL SUELO

La superficie del planeta Tierra está constituido por un 71% de agua y 29% de superficie terrestre (39), la humanidad a lo largo del tiempo ha modificado la tierra de dos formas principales el uso del suelo y los recursos bióticos centrales de la base agrícola (40).

El suelo es portador de recursos naturales como el petróleo, carbón y calor. Estos recursos naturales se utilizan en la actualidad como fuentes de energía para diferentes aplicaciones, la principal es la generación de energía eléctrica, aunque también existen otras alternativas.

El aprovechamiento del calor de la Tierra se realiza en dos vertientes, el más común para la generación de energía eléctrica en plantas geotérmicas y el uso directo de esta energía, en ambos casos es necesario el conocimiento de los parámetros y propiedades térmicas del suelo.

Una aplicación del uso directo del suelo es la climatización de espacios, esta aplicación muestra, cada vez más crecimiento a nivel mundial debido al ahorro energético que representa a nivel residencial e industrial, en México aún no se implementa la tecnología, pero ya existen proyectos que se enfocan en el estudio de estos sistemas (41).

Para entender la importancia del uso de la geotermia para usos directos, es conveniente analizar *in situ* el perfil del suelo, las propiedades termo físicas, los tipos de suelo existentes y su interacción con el ambiente.

2.1. PERFIL DEL SUELO

El perfil del suelo es la ordenación vertical de todas las capas u horizontes, la profundidad del horizonte depende de las características del lugar. Existen lugares donde no necesariamente se encuentran los horizontes ordenados e inclusive sin la existencia de alguno de ellos. Los horizontes que se encuentran en suelos evolucionados o completos son 4 y se representan con las letras O, A, C y R, los cuales se muestran en la figura 2.1 y se describen a continuación.

La capa u horizonte O, está constituida principalmente por material orgánico y alguna vez pudieron estar saturados de agua o no.

La capa u horizonte A, contiene minerales que se formaron en la superficie o debajo de un horizonte O. Muestran destrucción total o gran parte de la estructura de la roca original y muestran uno o ambos de lo siguiente: 1) Materia orgánica humificada, mezclada con la fracción mineral o 2) Propiedades resultantes del cultivo, pastoreo o alguna otra perturbación similar.

La capa u horizonte C, exclusión de los cimientos fuertemente cementados y más duros, que se ven poco afectados por proceso de la creación del suelo. La mayoría con capas minerales.

La capa u horizonte R, esta capa se caracteriza por estar fuertemente cementada a roca endurecida, también se conoce como roca madre y no presenta ninguna alteración por la actividad en el exterior (42).

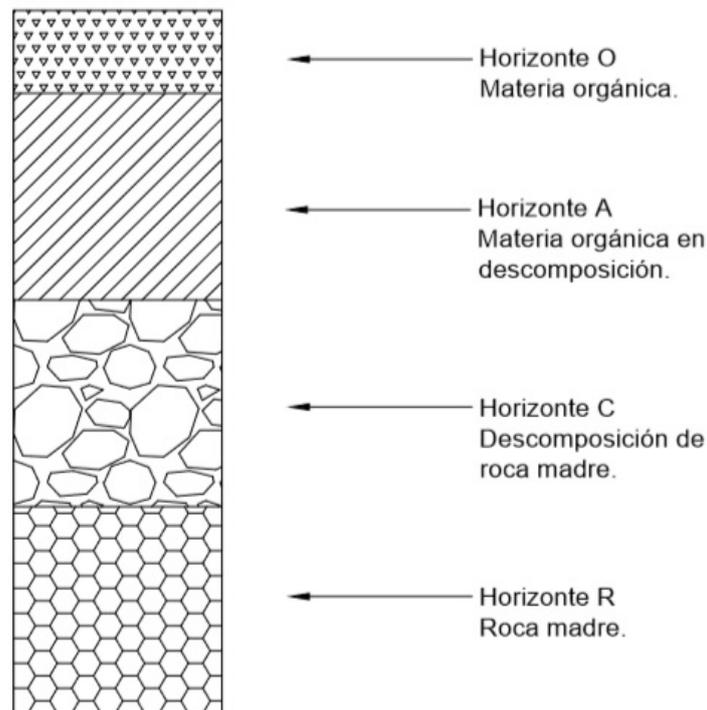


Figura 2.1. Perfil del suelo

El horizonte O normalmente se encuentra en los primeros centímetros del suelo, pero como se mencionó anteriormente esto depende totalmente del lugar a analizar pudiendo alcanzar varios metros de profundidad.

2.2. COMPORTAMIENTO TÉRMICO

Las propiedades físicas de cada horizonte como el tamaño de partícula, el contenido de hielo (en lugares de nieve), la porosidad, el contenido orgánico, el contenido de aire y la densidad, influyen directamente en el comportamiento térmico del suelo y son determinadas normalmente en laboratorio. Cada horizonte del suelo tiene un comportamiento y propiedades térmicas diferentes, dentro de las propiedades más importantes son la conductividad y la difusividad térmica (43).

“La conductividad térmica es una propiedad de transporte y proporciona una indicación de la velocidad a la que se transfiere energía mediante el proceso de difusión, y depende de la estructura física de la materia” (44).

Por la ley de Fourier la conductividad térmica para una dimensión se define como;

$$\lambda \equiv -\frac{q_x''}{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (1)$$

La estructura molecular influye en la conductividad térmica por lo que la materia mejor agrupada y compacta como la sólida tiene un valor menor de λ , comparada con un líquido o gas, considerando que el suelo no tiene elementos metálicos para nuestro caso en específico ya que el suelo encontrado en sitio hasta los 30 m pertenece a un horizonte tipo A que se caracteriza por ser el horizonte donde se encuentran raíces y restos de materia orgánica (capítulo 2.1), donde no dominan los metales que puedan favorecer a la conductividad térmica.

Una forma de conocer la conductividad térmica experimentalmente es sometiendo una cara de una muestra a un flujo de calor constante y uniforme y registrar la respuesta de temperatura de la superficie en la cara opuesta.

La razón de la conductividad térmica λ a la capacidad térmica es una importante propiedad denominada *difusividad térmica* α y mide la capacidad de un material para conducir energía térmica en relación con su capacidad para almacenar energía, sus unidades son en m^2/s y la ecuación que la describe es:

$$\alpha = \frac{\lambda}{\rho \cdot C_p} \quad (2)$$

El valor de la α va en relación con el tiempo que tarda un material para alcanzar su condición de equilibrio, materiales con un valor bajo corresponden a una reacción lenta, por lo que tardan más en alcanzar una nueva condición de equilibrio y en materiales con valores altos responderán rápidamente a cambios en su medio térmico, por lo que tardan menos en alcanzar una nueva condición de equilibrio (44).

La conductividad y la difusividad térmica del suelo aunque son propiedades que se pueden estudiar en el laboratorio tomando en consideración variables controladas de humedad, calor específico, cantidad de desechos orgánicos, minerales, porosidad, entre otros como lo muestran estudios de Ghuman y Lal en 1985 (45), Nidal H., Abu-Hamdeh y Randall C. Reeder en el 2000 (46), Fröb Katrin en 2011 (47). Es recomendable tomar las mediciones *in situ*, para tener información referente al lugar de trabajo ya que dependiendo el lugar serán las características del suelo. Aunque existe en la literatura relaciones entre el tipo de suelo encontrado y la conductividad térmica esperada (48), existen los factores climatológicos y del terreno del lugar como la precipitación anual y posibles acuíferos que afectan en la humedad del suelo y solo se pueden encontrar y estudiar *in situ*.

El líquido y aire se caracteriza por tener mejores propiedades de conductividad térmica que el suelo, por lo tanto, mientras mayor concentración de agua o aire tenga el suelo su valor de conductividad y difusividad térmica van a variar (49).

En la actualidad existen instrumentos capaces de realizar estas mediciones de propiedades térmicas *in situ*, uno de ellos es el instrumento de medición KD2 pro, el cual se utilizó para las mediciones de las propiedades termo físicas del suelo para el desarrollo de la presente tesis y mide la conductividad térmica y la resistividad, la capacidad calorífica específica volumétrica y la difusividad térmica.

2.2.1.PERFIL DE TEMPERATURAS

El comportamiento de la temperatura con la profundidad depende del lugar en el planeta donde se encuentre, si existe algún volcán cerca de la zona existen probabilidad de encontrarse con alguna cámara magmática lo que se traduce con elevadas temperaturas (o gradiente térmico anómalo) en el subsuelo.

Alrededor del mundo se han hecho investigaciones teóricas y experimentales y propuestas de ecuaciones para determinar el perfil de temperatura del suelo (sección 1.3.1 de la presente tesis). Los resultados muestran que la afectación de la temperatura de la superficie del suelo se va disminuyendo con la profundidad, lo que se ve reflejado en un comportamiento con una menor variación de temperatura en cada punto a lo largo del tiempo, manteniendo un aumento gradual con la profundidad. En condiciones normales del suelo, aproximadamente a partir de los 20 metros (dependiendo de las propiedades termo físicas del suelo) ya no existe influencia de los cambios de temperatura diarios ni la variación anual, encontrando una temperatura estable o zona neutra. A partir de la zona neutra la temperatura va en aumento aproximado de 1°C por cada 33 metros de profundidad (50).

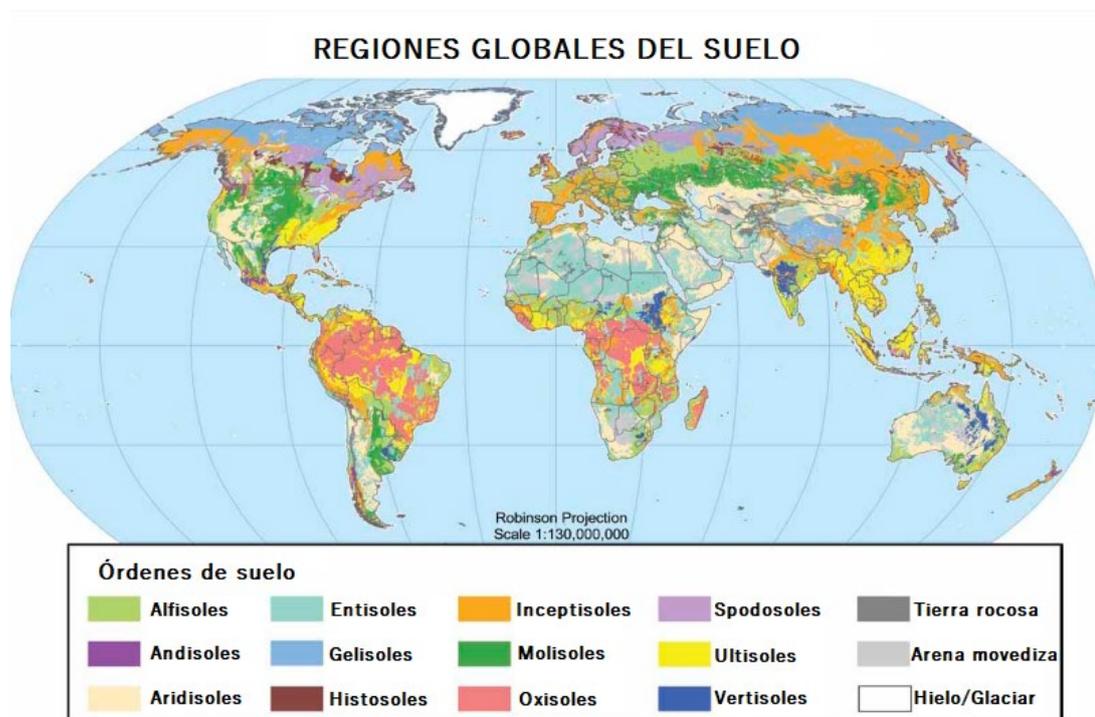
En la mayor parte de la literatura de intercambiadores de calor geotérmicos la profundidad donde se instalan es a los 2 – 4 metros de profundidad. Se propone que a esa profundidad ya no existe afectación de la variación de la temperatura diaria, mientras que la afectación anual se ve reflejada, pero en menor grado (17). Aunque puede cumplirse a los 2-4 metros de profundidad y ser factible, siempre se sugiere hacer un estudio del perfil de temperatura del suelo, ya que al aumentar la profundidad la temperatura del suelo se vuelve más estable. Los dos parámetros principales de diseño de un intercambiador de calor geotérmico para un mejor COP son la profundidad de instalación y la separación de la tubería (9).

Un estudio experimental realizado por Georgios Florides y Soteris Kalogirou en 2004 del perfil de temperatura en Cyprus dio como resultado que a 1 metro de profundidad la afectación superficial ya no se ve reflejada, mientras que la variación anual de temperatura del lugar deja de ser significativa hasta los 25m mostrando una temperatura estable de aproximadamente 22°C (51).

2.3. TIPOS DE SUELO EN EL MUNDO

El suelo alrededor del mundo puede parecer bastante uniforme a simple vista, pero en realidad es que existe una gran variedad en cuanto a colores, texturas, estructuras y composiciones, propiedades físicas y biológicas. Existen diferentes factores que afectan al suelo como: el clima, los organismos, el material geológico inalterado y el tiempo.

A continuación, se muestra el mapa mundial de los diferentes tipos de órdenes de suelo que existen según la división de suelo del departamento de agricultura de Estados Unidos de América.



US Department of Agriculture
Natural Resources
Conservation Service

Soil Survey Division
World Soil Resources
soils.usda.gov/use/worldsoils

November 2005

Figura 2.2. Mapa mundial de las regiones globales del suelo (52).

Las características principales de las órdenes del suelo son:

- Alfisoles: Suelos moderadamente lixiviados, con fertilidad alta y se encuentran comúnmente en regiones templadas húmedas y subhúmedas, son de una fertilidad relativamente alta.
- Andisoles: Suelos que se formaron en la ceniza volcánica u otros elementos volátiles, tiene una alta retención de agua y la capacidad de fijar grandes cantidades de fósforos.
- Aridisoles: Suelos de regiones áridas, se mantienen secos la mayor parte del año.
- Entisoles: Suelos con poco o ningún desarrollo morfológico.
- Gelisoles: Suelos con permafrost a dos metros de la superficie (capa de suelo congelado, pero necesariamente siempre cubierto de hielo o nieve)
- Histosoles: Suelos compuesto principalmente por materiales orgánicos.
- Inceptisols: Suelos débilmente desarrollados
- Molisoles: Suelos de ecosistemas de pastizales.
- Spodosoles: Suelos ácidos y arenosos bajo coníferas e infértiles.
- Oxisoles: Suelos muy erosionados de ambientes tropicales y subtropicales, con baja fertilidad nativa por la baja concentración de nutrientes.
- Ultisoles: Suelos ácidos, fuertemente lixiviados y más antiguos, se encuentran en zonas húmedas templadas y tropicales del mundo.
- Vertisoles: Suelos arcillosos que se contraen o se hinchan con el contenido de humedad.
- Tierra rocosa: suelos con rocas de diferentes tamaños, semi impermeables,
- Arena movediza: mezcla de agua y suelo (arena, arcilla o fango)
- Hielo/Glaciár (52)

Aunque bien la anterior es una de las clasificaciones validas, no existe una clasificación general por la dificultad para unificar los conceptos y las limitaciones de cada clasificación en el mundo, sin embargo, para una explicación más completa y detallada de las

características del suelo la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la UNESCO publican un mapa mundial del suelo que se encuentra disponible en <http://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/mapas-historicos-de-suelos-y-bases-de-datos/mapa-mundial-de-suelos-de-faunesco/es/> junto la literatura FAO-Unesco “Mapa mundial de suelos” 1:5 000 000, Volumen I Leyenda, Unesco.

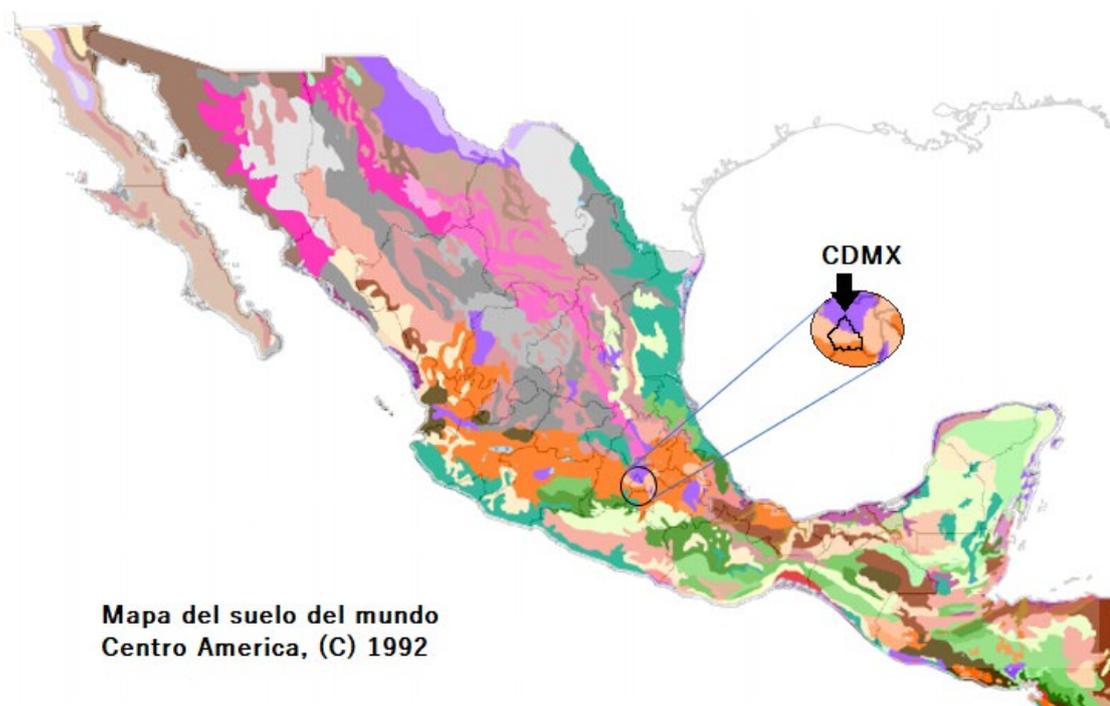


Figura 2.3. Mapa del suelo de Centro América (53)

El color naranja y el color crema representan a dos de la familia de los **Andosoles** los que se caracterizan como suelos que poseen una gran reserva de fertilidad la mayoría son de avenamiento libre, fáciles de labrar en todos los grados de humedad y poseen suficiente fertilidad natural para cultivos (53).

Mientras que el color lila pertenece a los **Regosoles éutricos** y son ricos en arenas coralinas, arena volcánica y piedra pómez dependiendo de la ubicación (53).

2.4. EL SUELO EN CCH VALLEJO UNAM

El sitio de la parte experimental, como se mencionó en la metodología de la presente tesis es en el Norte de la Ciudad de México en el plantel CCH Vallejo UNAM. En el lugar se encuentra un pozo de 30 metros de profundidad del cual, mientras se realizó la perforación, se extrajeron muestras del suelo a diferentes profundidades. Las muestras tomadas durante la perforación se utilizaron para realizar un análisis del suelo concluyendo en que es un suelo completamente maduro con horizonte tipo O a lo largo de los 30 metros. El horizonte O se caracteriza por ser un suelo con mucha filtración de agua por lo que su contenido de humedad puede ser variable, lo que concuerda con la Figura 2.3 del tipo de suelo que se encuentra en esta zona, por lo que la humedad es una variable que considerar en las propiedades termo físicas del suelo para la presente tesis por la estrecha relación que existe entre el contenido de agua en el suelo y las propiedades térmicas de este (54).

CAPÍTULO III BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS E INTERCAMBIADORES DE CALOR

3.1 BOMBAS DE CALOR GEOTÉRMICAS

La climatización de espacios, amigable con el medio ambiente, se puede lograr y/o complementar a partir de diferentes formas que se clasifican en pasiva y activa, la diferencia es la necesidad de sistemas con consumo energético. En la climatización pasiva entra principalmente en la arquitectura, desde la orientación de las ventanas hasta los materiales para la construcción de la edificación, entre otras cosas, y la climatización activa, un ejemplo son las bombas de calor. Las bombas de calor son aparatos capaces de mover el calor de un lugar a otro (55). Existen diferentes tipos de bombas de calor a nivel industrial, divididos por el tipo de fuente o sumidero de calor y el fluido de trabajo.

1.- Bombas de calor Aire-Aire, Aire- Agua. Este tipo de bombas tienen como fuente y/o sumidero de calor el aire, obtienen energía del aire del medio ambiente y la redistribuyen en el interior del espacio logrando la climatización la distribución puede ser directamente con aire o acoplado a un sistema de agua que se distribuya en el espacio, los sistemas que circulan en el interior del espacio a climatizar con agua se les conoce también como suelos radiantes.

2.- Bombas de calor Agua-Aire, Agua-Agua. Estas a diferencia de las anteriores aprovechan la energía del agua como fuente o sumidero de calor, el agua puede provenir de diferentes fuentes, corrientes subterráneas, ríos, almacenes de agua, entre otros, su

funcionamiento consiste en ceder la energía térmica a un circuito dentro del espacio ya sea de aire o agua para lograr la climatización.

3.- Bombas de calor Tierra – Aire, Tierra - Agua. El funcionamiento es similar a las anteriores la diferencia es que en este caso se usa la inercia térmica del subsuelo, que produce el fenómeno de tener variaciones menores a 1°C de temperatura a bajas profundidades, para utilizarse como fuente o sumidero de calor, esto se logra a través de un intercambiador de calor enterrado (7). El funcionamiento del intercambiador de calor es hacer pasar un fluido (agua o aire) logrando un intercambio de calor con el suelo y entregar el fluido de trabajo a una temperatura más confortable para hacer circular por el espacio a climatizar.

A continuación, en la Figura 3.1 se muestra un esquema con los diferentes tipos de bombas de calor geotérmicas más comunes.

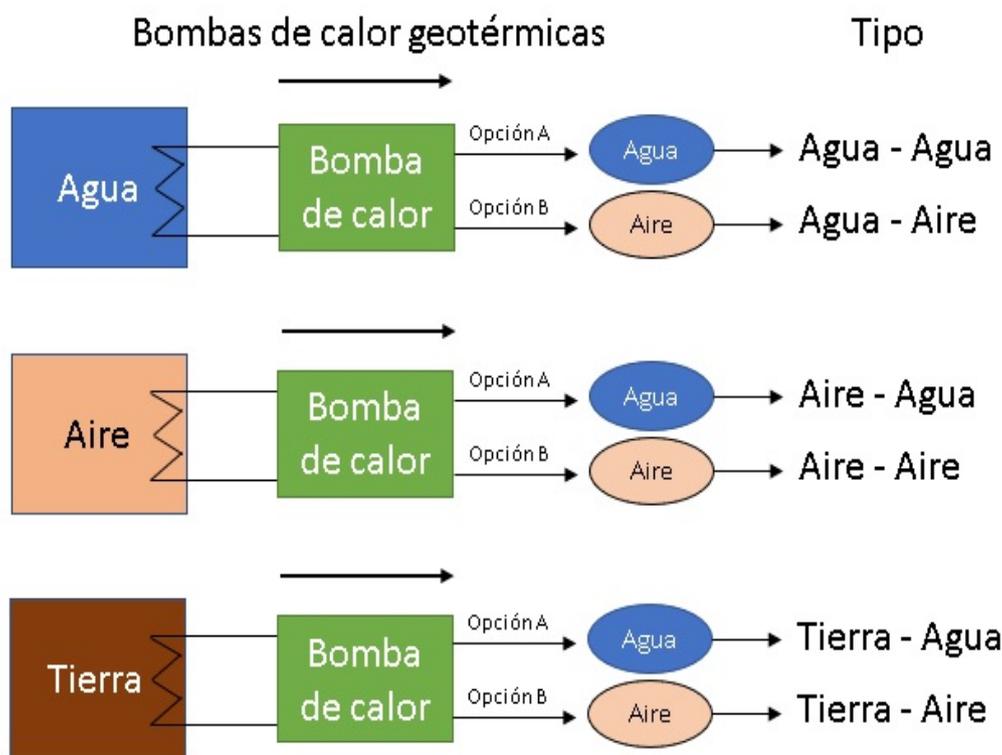


Figura 3.1. Esquema de los diferentes tipos de bombas de calor geotérmicas.

En presente estudio nos enfocaremos en los intercambiadores de calor geotérmicas del tipo Tierra – Aire, que en la tesis se estará manejando como “intercambiador de calor aire-tierra”, que se utilizan en las bombas de calor geotérmicas aire- tierra para lograr la climatización.

3.2 INTERCAMBIADORES DE CALOR

Los intercambiadores de calor son dispositivos que se encargan de transferir energía térmica entre dos o más fluidos con temperaturas diferentes y en contacto térmico. La aplicación más común es para calentamiento o enfriamiento. Ejemplos comunes de intercambiadores de calor son intercambiadores de carcasa y tubo, intercambiadores de calor de placas que son actualmente los más utilizados, radiadores de automóviles, condensadores, evaporadores, precalentadores de aire y torres de enfriamiento.

Existen muchas clasificaciones, a continuación se muestran algunos ejemplos de las clasificaciones más comunes: los intercambiadores de calor se pueden dividir dependiendo del fluido de trabajo; i) aire-aire, que consisten en introducir aire del medio ambiente a un sistema de tubos y por medio del arreglo de los tubos lograr el intercambio térmico a otro arreglo de tubos con aire o lo ingresa directamente al espacio a climatizar, ii) agua-aire que pasa lo mismo que el anterior solo que le cede al agua, por lo que el agua es el fluido de trabajo, iii) aire-tierra en este caso se hace un intercambio de calor entre el aire y la tierra, se conocen también como intercambiadores de calor de aire de tierra acoplada o tubos de tierra (11) , entre otros.

3.2.1 INTERCAMBIADORES DE CALOR GEOTÉRMICOS

Dependiendo del contacto de los fluidos de trabajo en un intercambiador de calor geotérmico se puede dividir en dos; i) Mezclado abierto, en esta división existe una superficie abierta donde se mezclan los fluidos de trabajo logrando el intercambio directo, ii) Mezclado cerrado, existen dos sistemas cerrados sin fugas y sin mezcla donde el intercambio térmico es indirecto (56). También se puede clasificar dependiendo la dirección del fluido de trabajo si el intercambio es a contra flujo, que los sistemas de tuberías se encuentren acomodados para que el flujo vaya en direcciones opuestas, o de paso simple, que el fluido vaya en una sola dirección (57).

3.2.2 CLASIFICACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR GEOTÉRMICOS AIRE-TIERRA

La parte más importante de los intercambiadores de calor aire-tierra es el área de intercambio térmico, a lo largo del tiempo se han desarrollado diferentes diseños para la distribución del sistema de tuberías subterráneas que, principalmente, se dividen en dos grandes grupos que dependen de la posición de los tubos dentro del suelo, éstos pueden ser horizontales (58) o verticales (59), la clasificación a utilizar en cada proyecto depende de diferentes factores como el requerimiento térmico del espacio a climatizar, el área disponible, la existencia de corrientes de agua subterránea, ríos vecinos, pozos de exploración o de agua, entre otros. Aunque los intercambiadores de calor verticales por la profundidad se muestran como una alternativa superior en comparación de los horizontales por el aporte térmico, los sistemas funcionan diferente ya que el primero tiene aportación principalmente para calentamiento de espacios aprovechando el aumento de la temperatura con la profundidad y el segundo aprovecha la estabilidad de la temperatura por la inercia térmica del suelo a baja profundidad no solo para calentamiento si no, también para enfriamiento.

La entrada y salida de aire del intercambiador de calor puede lograrse de dos formas: i) obteniendo aire del medio ambiente para introducir al espacio a climatizar como se muestra en la Figura 3.2 que se conoce como un sistema abierto y ii) con recirculación de aire dentro del espacio climatizado, teniendo la entrada y salida del intercambiador de calor dentro del mismo espacio como se muestra en la Figura 3.3.

La ventaja del sistema abierto es que promueve la renovación de aire evitando el “aire viciado” y como desventaja tiene que el intercambio térmico debe de ser mayor por la diferencia de temperaturas entre el aire del ambiente y el espacio a climatizar. En el caso del sistema cerrado pasa completamente lo opuesto, se debe de hacer un control de la calidad y renovaciones de aire para evitar el aire viciado, pero la entrada de aire del intercambiador de calor favorece al sistema debido a que una parte de la energía térmica del sistema está siendo reutilizada por el mismo, lo que se muestra como aporte de energía térmica a la entrada del intercambiador de calor.

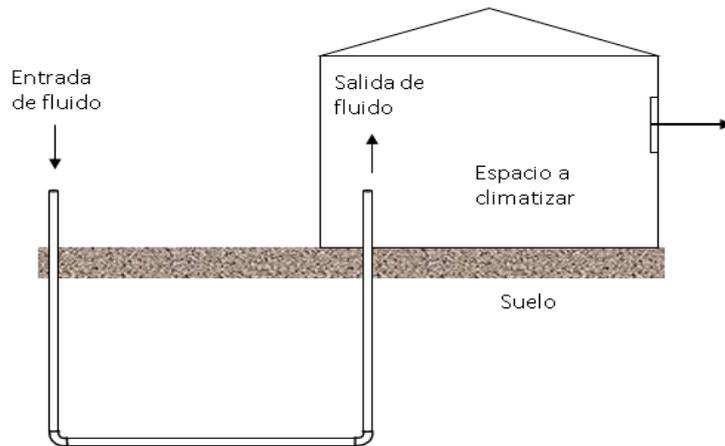


Figura 3.2. Sistema abierto.

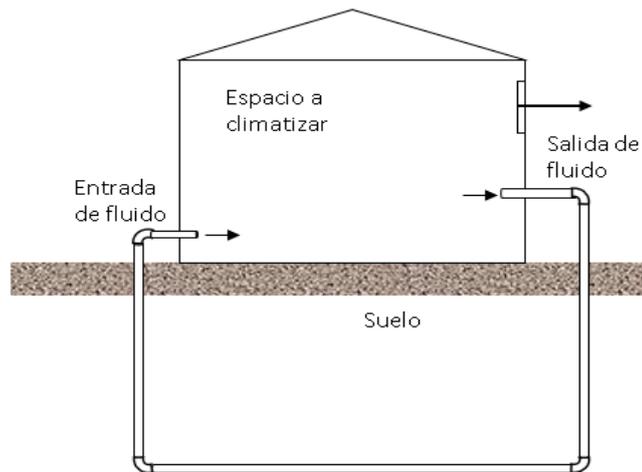


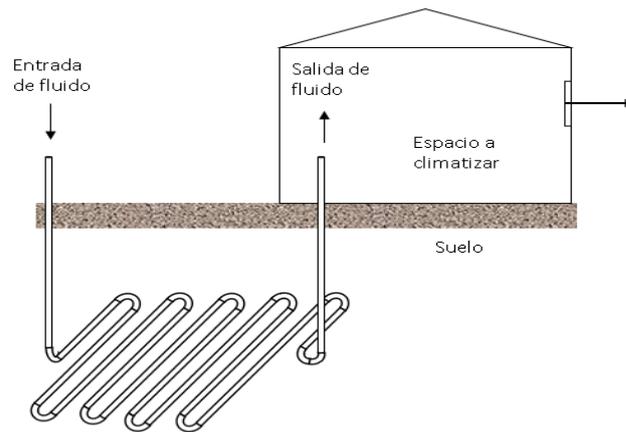
Figura 3.3. Sistema cerrado.

3.2.3 TIPOS DE CONEXIONES EN INTERCAMBIADORES DE CALOR GEOTÉRMICOS AIRE-TIERRA

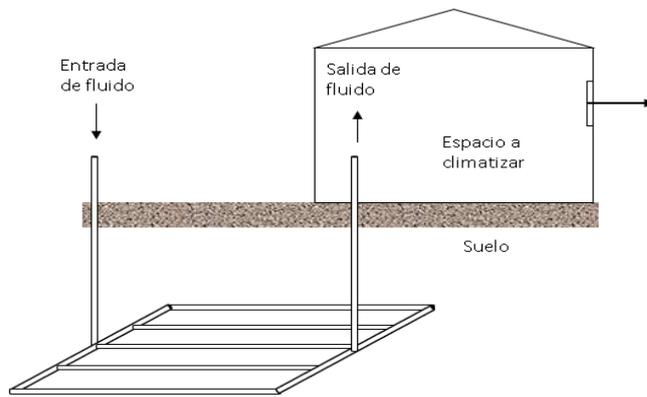
El contacto térmico como antes se mencionó es la característica más importante en los intercambiadores de calor, involucrando la ganancia o reducción de temperatura del fluido de trabajo, los intercambiadores de calor aire-tierra horizontales se colocan a una profundidad donde las variaciones de temperatura diaria y estacionales no provoquen que la temperatura varíe más de 1°C la temperatura del subsuelo (11). Cuando se tiene la

profundidad de instalación se coloca una distribución de la tubería en la longitud disponible. A lo largo del tiempo se estudiaron diferentes distribuciones subterráneas como se muestran a continuación en la Figura 3.4.

a)



b)



c)

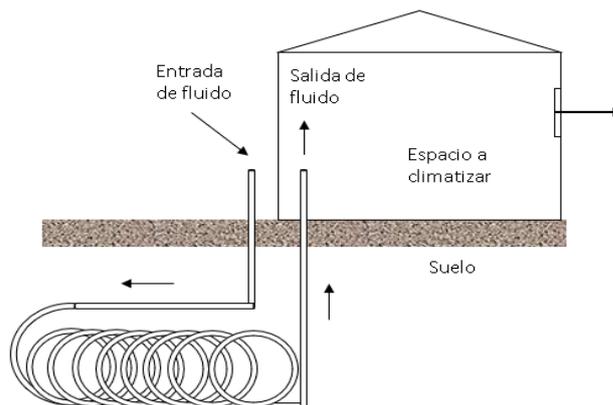


Figura 3.4. Distribución subterránea de intercambiadores de calor aire-tierra, a) Conexión en serie, b) Conexión en paralelo y c) Conexión Slinky.

Los sistemas horizontales, en general suelen ser más rentables por el ahorro en costos de excavación, siempre y cuando se cuente con el terreno con espacio suficiente, las configuraciones más comunes son las primeras dos que se presentaron en la Figura 3.4 incisos a) y b), para la instalación usualmente se hace una zanja de 2 o 3 metros de profundidad en tierra accesible (fácil de excavar) y se coloca la configuración en serie o paralelo con tubos de plástico.

Una de las desventajas que tienen estas dos configuraciones es el espacio requerido para la instalación ya que un bucle horizontal típico tiene una longitud de aproximadamente entre 35-60 m por kW de capacidad de calentamiento o enfriamiento (7). Lo más recomendable es hacer este tipo de instalaciones mientras se está construyendo el edificio.

La configuración de tipo Slinky que se muestra en la Figura 3.4 inciso c), se desarrolló con el propósito de optimizar el espacio requerido para una instalación, su característica principal es que es en forma de espiral lo que permite colocar más tubería en zanjas más cortas. La recuperación del suelo de los alrededores se afecta a mayor medida que en los anteriores por lo que se recomienda instalarlo en lugares donde la recuperación térmica del suelo no es vital.

Para las configuraciones horizontales en modo calefacción la recarga de energía térmica es de la radiación solar por lo que se recomienda no cubrir la superficie donde se instalan los intercambiadores de calor. (7)

3.3 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA IMPLEMENTADO PARA LA PRESENTE TESIS.

El fluido de trabajo durante la experimentación y simulación de la presente tesis es aire que pasa por un intercambiador de calor que se encuentra en el subsuelo por lo que nos enfocaremos en los intercambiadores de calor aire-tierra.

Durante la experimentación y la simulación de la presente tesis el sistema de tuberías utilizado es con un arreglo de paso simple ya que la entrada y la salida de aire son por diferente lugar y el intercambio térmico sucede entre la tierra y el aire, limitando el estudio

solo al intercambiador de calor geotérmico podemos suponer que es de mezclado cerrado ya que la tierra y el aire nunca están en contacto.

La validación y experimentación se basa en un sistema de tubería enterrada de tipo horizontal, por la problemática antes mencionada y porque en la zona de experimentación para la presente tesis ya se cuenta con la instalación de dos intercambiadores de calor aire-tierra colocados a 3 y 4.8 metros de profundidad por lo que nos apoyaremos de los mismos para este estudio.

La validación y experimentación de la presente tesis considera un sistema abierto, utilizando las características del aire del medio ambiente para el simulador y durante la experimentación se introduce aire del medio ambiente de la zona para la toma de mediciones. La aplicación del sistema de intercambiador de calor aire-tierra para la presente tesis no estudia la entrada y salida al espacio a climatizar sin embargo por el diseño ya construido en la zona de experimentación se considera como un sistema abierto para aplicación de trabajos futuros.

En la presente tesis se considera el diseño termo hidráulico propuesto por M. De Paepe y A. Janssens (11) para el diseño del intercambiador de calor aire-tierra basándose en las efectividades, el cual es base de un módulo del simulador DEAHE.

CAPÍTULO IV SIMULADOR DE AHE

4.1 EL SIMULADOR DE AHE

El simulador para diseño e instalación de intercambiadores de calor aire-tierra por sus siglas en inglés DE AHE que se valida en el presente trabajo fue desarrollado por Wong-Loya y Andaverde en el año 2010, como un esfuerzo para contar con una herramienta práctica que permitiera determinar la profundidad de instalación del intercambiador de calor aire-tierra, así como la configuración de éste, en cuanto a sus dimensiones, para su adecuado funcionamiento (60) o. Para el desarrollo del simulador se analizaron los requerimientos de temperatura para el correcto funcionamiento de un intercambiador de calor, considerando que para su óptimo funcionamiento, se debe instalar a una profundidad en donde la temperatura no varíe más de 1 °C a lo largo del año, esta profundidad varía en cada lugar del planeta, ya que depende de las condiciones climáticas y de las características del suelo, por lo cual se requiere conocer datos climatológicos y de propiedades del suelo (columna estratigráfica y propiedades termo físicas). En cuanto al diseño del intercambiador de calor se realiza dependiendo básicamente de dos parámetros principales, i) el flujo volumétrico de aire requerido y ii) la superficie con la que se cuenta para instalar el intercambiador. Tomando en cuenta lo anteriormente, a continuación, se presenta la descripción y fundamentos teóricos del simulador DE AHE.

4.2 DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR

Para lograr la predicción donde la variación de la temperatura del suelo no varía más de 1°C la temperatura y el diseño de un intercambiador de calor aire-tierra, el simulador consta de dos módulos principales;

El primer módulo está diseñado para determinar la profundidad a la cual debe ser instalado es decir donde la variación de la afectación de la temperatura anual es menor a 1°C, para esto se utiliza métodos numéricos (volúmenes de control) para resolver las ecuaciones diferenciales del balance energético que implica el intercambio de calor entre la atmósfera y el suelo a diferentes profundidades, incluidas las propiedades termo físicas del suelo y la variación anual y diurna de la temperatura ambiental (61).

El segundo módulo determina el diseño del intercambiador de calor, este diseño está basado en el propuesto por De Paepe y Janssens (11).

4.2.1 HIPÓTESIS Y SUPOSICIONES

El primer módulo del simulador, para determinar la profundidad a la cual la temperatura es estable, tiene las siguientes suposiciones:

1. El suelo tiene una composición homogénea en cada capa
2. Cada capa es isotrópica y homogénea
3. No existe fuente de calor en el subsuelo
4. A 100m de profundidad se tiene la frontera a temperatura constante
5. En la superficie la temperatura ambiente es la condición de frontera

Con estas suposiciones se espera que la profundidad en la que la temperatura es estable, dependerá de la variación anual de temperatura y del tipo de suelo.

El segundo modulo del simulador se basa en las siguientes suposiciones:

1. El suelo se mantiene a temperatura constante
2. La velocidad en la tubería es constante
3. Existe un contacto perfecto entre el suelo y la pared del tubo
4. El aire es el único fluido que intercambia calor entre la superficie y el subsuelo

Con estas suposiciones se espera que el simulador sea capaz de brindar información suficiente del diseño del intercambiador de calor para compararlo con las mediciones experimentales y validarlo.

A continuación, en la Figura 4.1 se muestra un diagrama de bloques con el diseño del simulador.

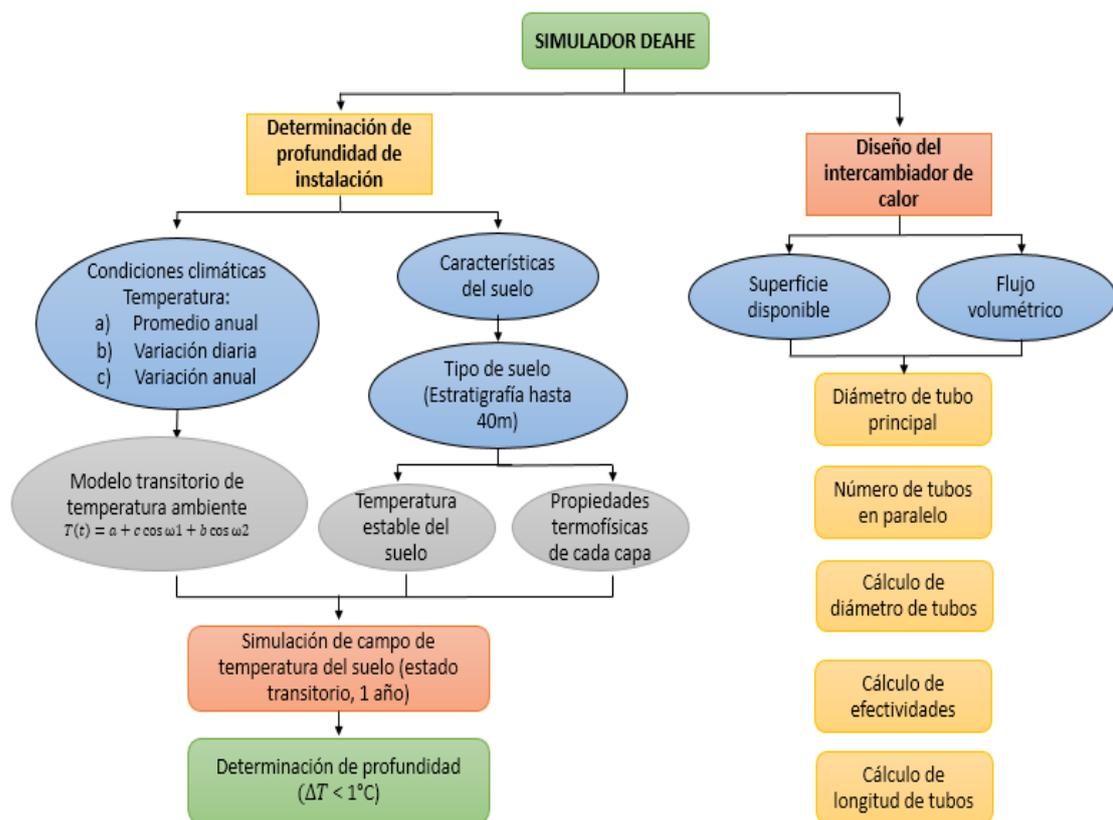


Figura 4.1 Diagrama de bloques del funcionamiento del simulador DEAHE

4.3 DETERMINACIÓN DE LA PROFUNDIDAD DE INSTALACIÓN

Para que el intercambiador de calor aire-tierra funcione adecuadamente se debe instalar a una profundidad donde la temperatura del suelo no se vea afectada por las variaciones del clima en más de 1°C a lo largo del año, considerando que la temperatura del suelo se encuentra estable.

La profundidad a la que se logra esta estabilización depende de dos factores básicamente:

i) Las características termo físicas del suelo, ya que de esto depende la transferencia de calor en el suelo y por lo tanto la amortiguación de la onda de temperatura con la profundidad, estas características varían en cada lugar y además de la profundidad, por lo que es necesario hacer este análisis en cada localidad para que se tenga la información adecuada, también es importante señalar que es muy complicado su análisis a detalle ya que estas propiedades cambian con la humedad (lluvias o sequías) por lo que el análisis se hace con propiedades promedio del lugar y se deben tomar en cuenta las capas que componen el suelo.

ii) Las condiciones climáticas de temperatura, ya que estas variaciones de temperatura son las que van a afectar el suelo, se debe tomar en cuenta que la variación climática está compuesta por las variaciones diarias de temperatura que tiene un periodo aproximado de un día, y las variaciones estacionales que tiene un periodo de 1 año. Las variaciones diarias penetran en el suelo aproximadamente 1 m (51) y las variaciones que más profundo penetran son las estacionales, es por esto por lo que el análisis del perfil de temperatura del subsuelo se debe analizar a lo largo de un año o más para determinar adecuadamente la profundidad de instalación.

Para el diseño de la primera sección del simulador se tomaron en cuenta:

- 1.- Las ecuaciones diferenciales que gobiernan la transferencia de calor en el subsuelo.
- 2.- Los parámetros termo físicos del subsuelo, requeridos para la solución de las ecuaciones gobernantes.
- 3.- Las condiciones climáticas, específicamente el registro de temperaturas de una región dada, estas constituyen la condición de frontera en la superficie del suelo.
- 4.- La temperatura estable del subsuelo.

Ecuaciones gobernantes del sistema

Como ecuación gobernante de la transferencia de calor a diferentes profundidades se utiliza la ecuación diferencial de difusión de calor en estado transitorio en una dimensión sin fuente de calor (57).

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Donde C es el calor específico volumétrico y se define como $C = \rho c$ donde ρ es la densidad y c el calor específico, k es la conductividad térmica, T la temperatura y Z la profundidad.

De la solución de esta ecuación se obtiene la distribución de temperaturas $T(z)$ como función del tiempo. En nuestro caso la ecuación es resuelta a través del método de volúmenes finito (61) mediante un programa desarrollado, en fortran, para tal efecto.

4.3.1 PARÁMETROS TERMO FÍSICOS DEL SUELO

Para poder obtener un perfil de temperaturas del suelo es necesario conocer la composición y naturaleza del suelo y por lo tanto características de este. En el presente trabajo se utilizó el suelo que se extrajo de diferentes profundidades mientras se realizaba la instalación del prototipo experimental y se determinaron las características del suelo con el uso del instrumento KD2-Pro. En este caso el suelo es bastante homogéneo, pero el

simulador permite utilizar hasta tres capas de suelo diferente para realizar la simulación. El espesor de cada una de las capas del perfil es definido por el usuario y la profundidad máxima que se contempla en el simulador es de 100 m.

4.3.2 VARIACIÓN DE LA TEMPERATURA AMBIENTE

La temperatura del ambiente en cada parte del mundo es diferente y debe tenerse en cuenta las variaciones de tipo diaria y anual que tienen lugar. La temperatura en el ambiente, en lugares templados como en CDMX, puede ser representada por la ecuación 4:

$$T = b + c \cos \omega_1 t + d \cos \omega_2 t \quad (4)$$

Donde b es la temperatura promedio anual, c es la variación promedio diaria de la temperatura, d es la variación anual de la temperatura, ω_1 es la frecuencia diaria, ω_2 es la frecuencia anual y t es el tiempo (62).

Estos datos de temperatura se pueden obtener de las páginas de las diferentes estaciones meteorológicas al rededor del mundo.

4.3.3 TEMPERATURA ESTABLE DEL SUBSUELO

La temperatura estable del subsuelo es uno de los parámetros más complicados de determinar, ya que se requiere hacer mediciones a diferentes profundidades a lo largo de más de un año, lo cual complica el análisis del perfil de temperaturas, pero en varios lugares se tienen registros de flujo de calor y de temperatura en el subsuelo.

4.4 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

Para el diseño del intercambiador se determinan:

- 1.- Las ecuaciones para diseño del intercambiador de calor de acuerdo con el método basado en efectividad del intercambiador.
- 2.- Los parámetros termo físicos requeridos para el diseño del intercambiador.

- 3.- Las características físicas del lugar donde se instalará el intercambiador
- 4.- Diseño del intercambiador para diferentes efectividades.

Para el diseño del intercambiador de calor (Figura 4.2) el simulador se basa en el método publicado por De Paepe y Janssens (2003). El intercambiador de calor aire-tierra que propone el simulador es de tipo horizontal con una configuración en paralelo con una relación del área transversal de los tubos en paralelo (Figura 4.2 señalados como 1,2,3, n) y el tubo principal (Figura 4.2 señalado como a y b) de 1 a 1 para mantener la misma velocidad del aire a lo largo del sistema, evitando pérdidas de presión. El método permite proponer diferentes parámetros de entrada, para este caso se fijaron como dato de entrada el diámetro de la tubería (esta propuesto de acuerdo a los diámetros que manejan las turbinas de aire), el flujo de aire que dependerá del espacio a climatizar y la longitud del tubo y con estos datos se calcula la efectividad del sistema. Los parámetros constantes que se utilizan para el diseño del intercambiador de calor es el diámetro de la tubería de entrada, el flujo de aire, y con base en estos parámetros y el área que se tenga para instalar el simulador diseña de acuerdo con el número de tubos en paralelo y efectividades deseadas, la longitud y diámetro de los tubos de intercambiador (11).

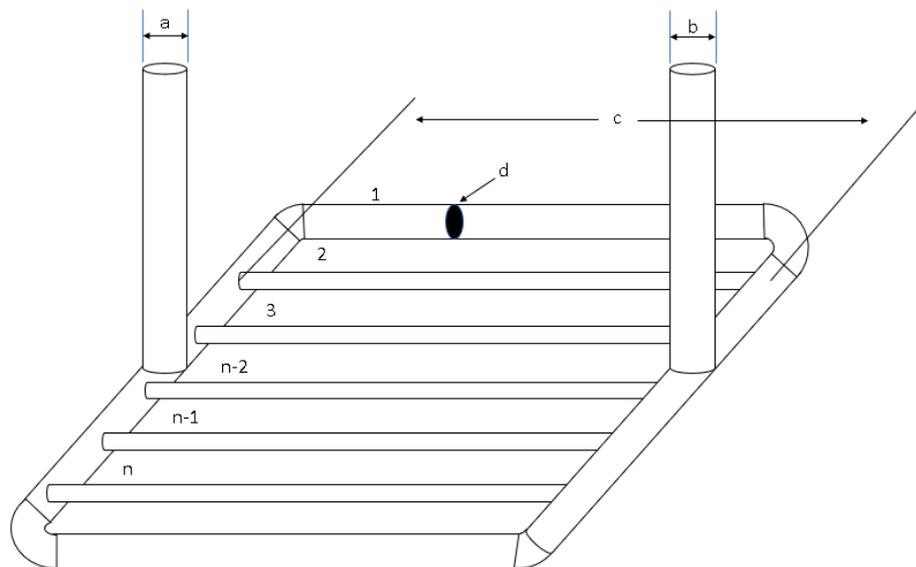


Figura 4.2 Esquema del intercambiador de calor con algunos de los parámetros de diseño: a) diámetro de la tubería de entrada principal, b) diámetro de la salida, c) longitud

de los tubos en paralelo del intercambiador, d) diámetro de los tubos en paralelo del intercambiador, n) número de tubos del intercambiador

4.4.1 ECUACIONES PARA DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR

En el intercambiador el aire es el único fluido que transporta calor, ya sea hacia la tierra o hacia el ambiente. Si el contacto de la pared del tubo con la tierra es considerado perfecto y la conductividad del suelo es considerada muy alta comparada con la resistencia de la superficie, la temperatura de la pared del tubo puede considerarse como constante. De tal forma que la temperatura a la salida del intercambiador de calor puede definirse en términos de las propiedades del aire y de la temperatura de la pared del tubo y de la temperatura del aire a la entrada del intercambiador (11). Para calcular dicha temperatura se utiliza la ecuación 5:

$$T_{air,out} = T_{Wall} + (T_{air,in} - T_{wall})e^{-\left(\frac{hA}{\dot{m}_{air}c_{p,air}}\right)} \quad (5)$$

Donde $T_{air,out}$ es la temperatura del aire a la salida del intercambiador, T_{Wall} es la temperatura de la pared de la tubería del intercambiador, que en este caso es la misma que la del subsuelo, $T_{air,in}$ es la temperatura del aire en la entrada del intercambiador, h es el coeficiente convectivo, A es el área de transferencia de calor por donde circula el aire, \dot{m}_{air} es el flujo másico y $c_{p,air}$ es el calor específico del aire.

El exponente de la ecuación 5 es equivalente al Número de Unidades de Transferencia (NTU), el cual se puede calcular con la ecuación 6.

$$NTU = \frac{hA}{\dot{m}_{air}c_{p,air}} \quad (6)$$

Basado en la anterior equivalencia, se puede reescribir la ecuación 5 de la siguiente manera:

$$T_{air,out} = T_{Wall} + (T_{air,in} - T_{wall})e^{-NTU} \quad (7)$$

Por otra parte, si consideramos un tubo de longitud infinita por el cual va a enfriarse o calentarse el aire, la efectividad se puede definir como:

$$\epsilon = \frac{T_{air,out} - T_{air,in}}{T_{wall} - T_{air,in}} \quad (8)$$

Para este caso de estudio se utilizó la ecuación (8) para el cálculo de las efectividades del simulador y compararlas con las calculadas con datos experimentales.

Al combinar las ecuaciones 7 y 8 obtenemos:

$$\epsilon = 1 - e^{-NTU} \quad (9)$$

Como se observa en la ecuación 6, los parámetros que conforman NTU son A, h y \dot{m} . Los valores de estos parámetros pueden ser variados durante la simulación. Los parámetros A y h son calculados mediante las ecuaciones 10 y 11, respectivamente.

$$A = \pi DL \quad (10)$$

$$h = \frac{Nuk}{D} \quad (11)$$

El número de Nusselt dentro del tubo está definido por (63):

Para flujo laminar:

$$Nu = 3.66 \quad \text{si } Re < 2300$$

Para flujo turbulento:

$$Nu = \frac{\xi/8(Re-1000)Pr}{1+12.7\sqrt{\xi/8}(Pr^{2/3}-1)} \quad (12)$$

$$\text{Con } \xi = (1.82 \log Re - 1.64)^{-2}$$

$$\text{Si } 2300 \leq Re < 5 \times 10^6 \text{ y } 0.5 < Pr < 10^6$$

El número de Reynolds está dado por:

$$Re = \frac{v_{air}D}{\nu_{air}} \quad (13)$$

Donde v_{air} es la velocidad promedio del aire y ν_{air} es la viscosidad cinemática del aire

En nuestro caso calculamos el flujo volumétrico usándola como una constante del simulador, con un despeje de la formula (14), teniendo como resultado $50\text{m}^3/\text{h}$ se calculó utilizando la velocidad promedio medida *in situ* partiendo de esta información y del diámetro de la tubería para realizar los cálculos del resto de las ecuaciones correspondientes para el caso de estudio.

$$v_{air} = \frac{4\dot{V}}{\pi D^2} \quad (14)$$

Para simplificar el diseño y los cálculos, el diámetro de los tubos del intercambiador se calcula de tal forma que la velocidad del aire se mantenga con el mismo valor que en el tubo principal por lo que el diámetro de cada tubo está dado por:

$$D_{tubo} = \sqrt{\frac{4(\dot{V}/n)}{\pi v_{air}}} \quad (15)$$

Donde n es el número de tubos del intercambiador.

En el presente caso de estudio el diámetro del tubo es un valor de entrada para el simulador siendo un parámetro fijo con valor de 0.03m que corresponde al medido *in situ*.

El número de tubos que puede tener el intercambiador está limitado por el espacio donde se va a colocar ya que debe haber al menos 1 m de separación entre ellos para evitar interferencia térmica (64). Para la simulación de la presente tesis se deja como una constante que es 1 tubo por el diseño experimental que se tiene *in situ*.

A partir de la efectividad podemos calcular el NTU como sigue:

$$NTU = -\ln(1 - \epsilon) \quad (16)$$

El último parámetro que calculamos es la longitud del tubo la cual obtenemos a partir de las ecuaciones 6, 10 y 11

$$L = \frac{NTU C \dot{V}}{NU\pi k} \quad (17)$$

4.4.2 PARÁMETROS TERMO FÍSICOS REQUERIDOS PARA EL DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR.

Los parámetros requeridos para el diseño y funcionamiento del simulador son:

El flujo volumétrico de aire que se requiere para la climatización del edificio, la temperatura del aire a la entrada y a la salida del intercambiador, la temperatura del suelo a la profundidad a la cual se va a colocar el intercambiador, número de tubos para el intercambiador de calor, diámetro de la tubería de entrada, longitud y diámetro de los tubos del intercambiador, el espacio o terreno con que se cuenta para el intercambiador,

El simulador, de acuerdo con la superficie disponible, propone un máximo de tubos en paralelo a instalar y el usuario puede elegir cuantos tubos desea instalar.

4.4.3 DISEÑO DEL INTERCAMBIADOR PARA DIFERENTES EFECTIVIDADES.

El simulador realiza el cálculo del intercambiador para efectividades desde el 50% hasta el 99%, mostrando cálculos de la temperatura del aire de entrada y de salida para cada efectividad, así como el diámetro y longitud de cada tubo, de esta manera el usuario puede elegir la configuración que más le convenga.

El intercambiador de calor donde se realizó el método experimental y se encuentra instalado e instrumentado en la Ciudad de México, durante la presente tesis se realizará la comparación entre las mediciones de la temperatura y los cálculos realizados de las efectividades con los parámetros fijos de diseño como el diámetro y longitud de la tubería.

CAPÍTULO V METODOLOGIA

5.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

En este capítulo se habla del proceso que se llevó a cabo para la experimentación los requerimientos y las consideraciones que se tomaron en cuenta.

La validación del simulador se realizó en el norte de la Ciudad de México, en las instalaciones del CCH Vallejo UNAM. Para ello, se han construido e instalado dos intercambiadores de calor aire-tierra en forma de U enterrados a una profundidad de 4.8 y 3 metros respectivamente, como se muestra en la Figura 5.1. El material utilizado para construir el intercambiador es tubo Conduit ligero para instalaciones eléctricas, con un diámetro interno de 0.03 m. Los intercambiadores están equipados con termopares tipo "t" como se muestra en la Figura 5.1. a) y b) respectivamente, marcados como puntos negros a lo largo de la tubería. Las características de los termopares tipo "t" es que miden temperaturas en un rango entre -270 a 400°C con una incertidumbre de 0.1°C, que coincide por mucho con el rango de operación del intercambiador. Para los registros de temperatura ambiental se utilizó un termopar tipo "k". Este tipo de termopares tiene un rango operativo de -270 y 1372 °C, con una incertidumbre de 0.1°C, mientras que la estación meteorológica de la zona muestra temperaturas dentro del rango de medición de este tipo de termopares por lo que es un termopar apropiado para la medición.

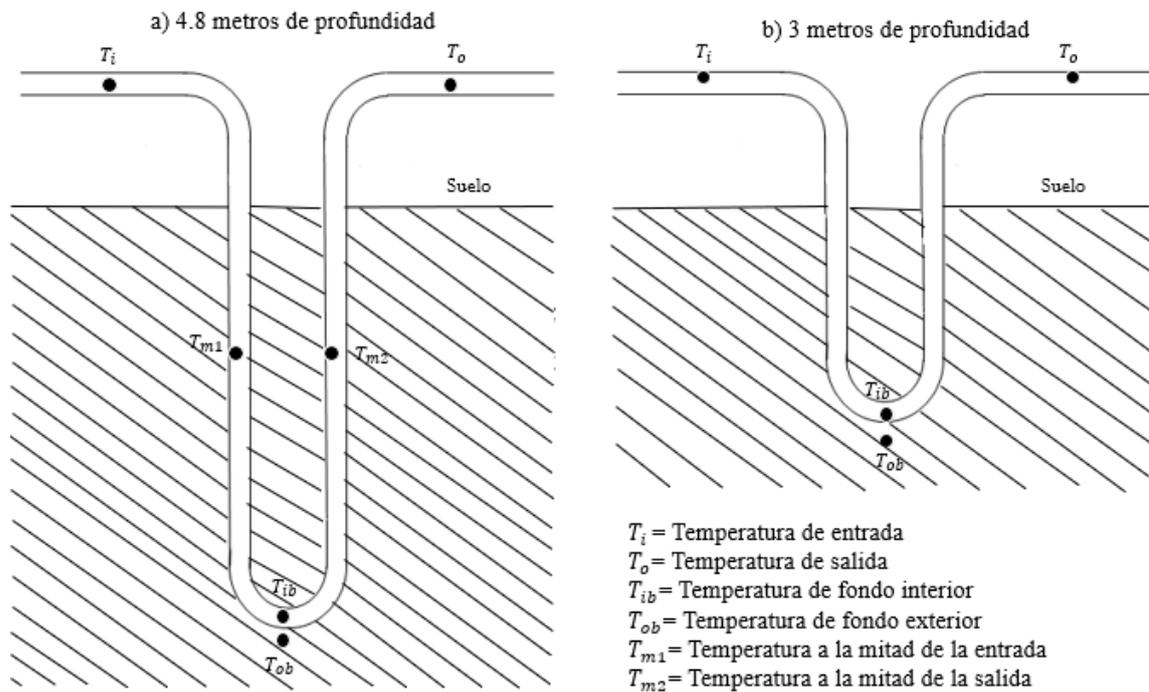


Figura 5.1. Intercambiadores de calor aire-tierra instalados.

5.2 ETAPAS EXPERIMENTALES PARA LA VALIDACIÓN DEL SIMULADOR DE AHE

5.2.1 Etapa uno

El proceso de validación se llevó a cabo en 2 etapas; en la primera etapa se validó la capacidad del simulador para determinar la profundidad de instalación del intercambiador de calor donde la variación de la temperatura del suelo es menor a 1°C .

La validación de esta sección se dividió en dos; 1) con el sistema de movimiento de aire apagado, se tomaron mediciones de la temperatura en el intercambiador de calor aire-tierra que se encuentra a una profundidad de 3 metros durante las temporadas de invierno y verano, 2) posteriormente se perforó un pozo para medir la temperatura; en la superficie, a 50 cm y a 1m de profundidad, con el propósito de analizar la onda de propagación de la temperatura con la profundidad y comprobar que a un metro la variación de la temperatura aún es mayor a 1°C de la temperatura del suelo, durante este proceso se midieron las propiedades termo físicas del suelo a las mismas profundidades.

Las mediciones de temperatura y de las propiedades termo físicas se registraron para determinar la temperatura de estabilización del subsuelo (5.1.b) y se comparó con la información proporcionada por el simulador.

5.2.2 Etapa dos.

En la segunda etapa, se validó el simulador con el diseño del intercambiador de calor que se muestra en la figura 5.1.a. La validación se realizó bajo dos condiciones de uso diferentes: a) para aplicaciones con aire caliente de residuo industrial y b) para aire acondicionado residencial.

Durante esta etapa de validación, las mediciones de temperatura se realizaron en la entrada, salida, puntos medios, fondo a fuera y adentro del tubo del intercambiador de calor, estas mediciones se realizaron con el sistema en funcionamiento. Para el flujo de aire se utilizó un soplador conectado a la entrada del intercambiador de calor aire-tierra.

Para analizar la respuesta del intercambiador de calor para una industria, se utilizó aire caliente simulando el enfriamiento del aire proveniente de un proceso industrial. Para esta etapa, se utilizó un soplador para introducir aire caliente al intercambiador. La turbina, debido a su operación, eleva la temperatura del aire moviéndolo hacia el intercambiador.

En esta etapa, con el uso de los datos medidos, se determinó la efectividad (11) del sistema analizando la variación de la temperatura del aire en la entrada y la salida. Los datos registrados se utilizaron para calcular la efectividad por lo tanto se comparó con la información proporcionada por el simulador, introduciendo las mismas características de diseño.

5.3 ADQUISIDOR DE DATOS AGILENT INSTRUMENT PARA MEDICIONES DE TEMPERATURA DEL SUELO.

Las mediciones de las temperaturas durante la etapa experimental de la presente tesis se tomaron con sensores para medir temperatura llamados “termopares”, cada uno de los termopares mide una temperatura diferente en una posición diferente y la información se adquiere mediante el instrumento “Agilent Instrument”.

Agilent Instrument Data Acquisition (Figura 5.2) es un instrumento capaz de hacer registro de datos de diferentes tipos de sensores, como mediciones directas de termopares, RTD, termistores, voltaje de CC y CA, resistencia, corriente continua y corriente alterna, frecuencia y período. Con un almacenamiento de hasta 50 000 lecturas. que se encarga de extraer y almacenar la información de las mediciones de cada termopar y cuenta con la posibilidad de hasta 60 canales por instrumento (65).



Figura 5.2. Carátula del adquisidor de datos Agilent modelo 34972A.

5.4 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DEL SUELO CON EQUIPO KD2 PRO.

Las mediciones del subsuelo fueron repetidas 5 veces con el propósito de tener reproducibilidad para cada profundidad, en la superficie, a 4 y 24 metros de profundidad mediante tierra extraída de la zona durante la instalación de los intercambiadores de calor aire-tierra y un pozo destinado a la investigación de 30 m de profundidad que se encuentra en la misma zona, se tomaron mediciones de las propiedades termo físicas simulando los dos casos extremos climatológicos con la tierra seca y con saturación. Las mediciones se realizaron con el uso del equipo Decagon Devices KD2 pro, especializado en mediciones térmicas, que se describe a continuación.

Para la medición de las propiedades termo físicas el equipo KD2 pro utiliza el método de mínimos cuadrados no lineales durante las mediciones, las cuales se realizan con el uso de dos agujas una como fuente constante de calor durante un periodo establecido y otra como sensor para medir la temperatura durante el calentamiento, en la Figura 5.3 se muestra el kit que contiene al equipo KD2 pro y se señala el sensor SH-1 que fue el utilizado, ya que cuenta con la característica de utilización en materiales con contenido líquido y superficies semiduras como la tierra.



Sensor SH-1

Figura 5.3. Kit del instrumento y los sensores que conforman el equipo KD2 pro.

A continuación, se muestran las ecuaciones en las que se basa el instrumento KD2 pro para la determinación de las propiedades termo físicas del suelo.

$$T^* = b_0 t + b_1 E_i\left(\frac{b_2}{t}\right) \quad (18)$$

$$T^* = b_0 t + b_1 \left\{ E_i\left(\frac{b_2}{t}\right) - E_i\left[\frac{b_2}{t - t_h}\right] \right\} \quad (19)$$

$$\text{donde} \quad T^* = \frac{4\pi(T - T_0)}{q} \quad (20)$$

E_i es la integral exponencial

b_0, b_1 y b_2 son las constantes

T_0 es la temperatura al inicio de la medición

q es la entrada de calor

La ecuación 18 se utiliza para t segundos mientras el flujo de calor está activado, mientras que la ecuación 19 se utiliza cuando el flujo de calor se encuentra apagado.

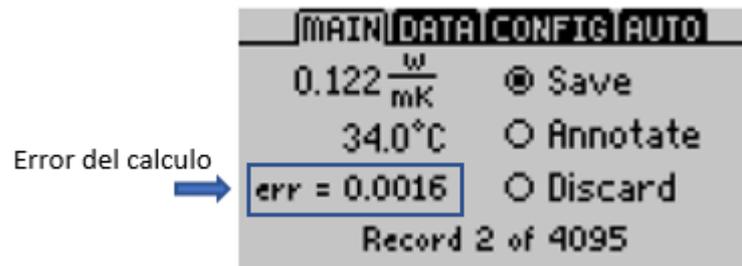
La conductividad térmica y la difusividad térmica con las ecuaciones 21 y 22 a continuación.

$$\lambda = \frac{1}{b_1} \quad (21)$$

$$\alpha = \frac{r^2}{4b_2} \quad (22)$$

Se puede encontrar la conductividad y la difusividad ajustando la ecuación 18 a los datos transformados. Los valores correctos de b_0 , b_1 y b_2 son los que minimizan la suma de los cuadrados de error entre las ecuaciones y las medidas. Usa el procedimiento de mínimos cuadrados no lineales de Marquardt (66) para encontrar los valores correctos. Este procedimiento es susceptible de quedarse atascado en los mínimos locales y no encontrar un mínimo global en algunos problemas (el problema de una sola aguja es un ejemplo perfecto de un problema de mínimos cuadrados no lineal) pero el problema de doble aguja generalmente funciona bien. El equipo KD2 pro puede encontrar los tres parámetros del modelo rápidamente (67).

Cada medición que calcula el KD2pro se puede visualizar en un display donde se aprecia el valor del cálculo de las variables junto al error correspondiente, como se muestra en la figura 5.4 a continuación



5.4. Ejemplo en el display de una medición con el equipo KD2 pro.

El calor específico volumétrico se define como la densidad por el calor específico, el KD2pro maneja intervalo de valores entre los 0.5 y 4.0 ($mJ/(m^3K)$) para este valor.

Las mediciones necesarias para los cálculos de las efectividades del sistema instalado en sitio son; el diámetro interno de la tubería y la velocidad del viento.

La medición del diámetro de la tubería se tomó con un vernier *in situ*.

5.5 MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE LA VELOCIDAD DEL AIRE CON EQUIPO WINDSONIC.

La velocidad del viento se obtuvo con el equipo WindSonic, es un dispositivo que mide los tiempos necesarios para que un pulso ultrasónico de sonido viaje de un punto a otro y viceversa. Los 4 transductores se encuentran ubicados en los 4 puntos cardinales que se representan como "N" Norte, "S" Sur, "O" Oeste y "E" Este como se muestra en la Figura 5.3 abarcando un rango de 0 a 359° con una precisión de $\pm 2^\circ$, el cálculo que realiza el dispositivo es por medio del tiempo de recorrido del viento entre estos puntos, los cálculos son independientes de la temperatura, siempre y cuando las condiciones de trabajo sean las correctas para operar el dispositivo. Las condiciones de temperatura de operación del equipo son entre $-35^\circ C$ a $+70^\circ C$ y humedad entre $<5\%$ a 100% . El equipo maneja una precisión de 0.1 m/s.

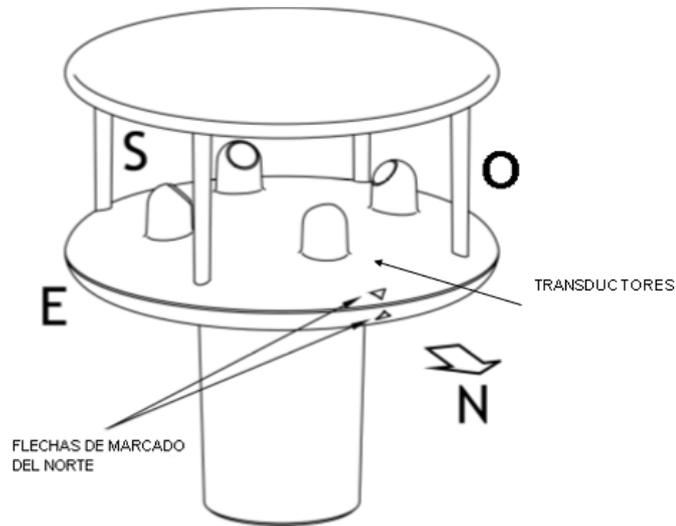


Figura 5.3 Anemómetro ultrasónico Wind Sonic con componentes (68).

El cálculo se realiza midiendo y comparando los tiempos de traslado entre los 4 transductores con las ecuaciones que se muestran a continuación en la Figura 5.4.

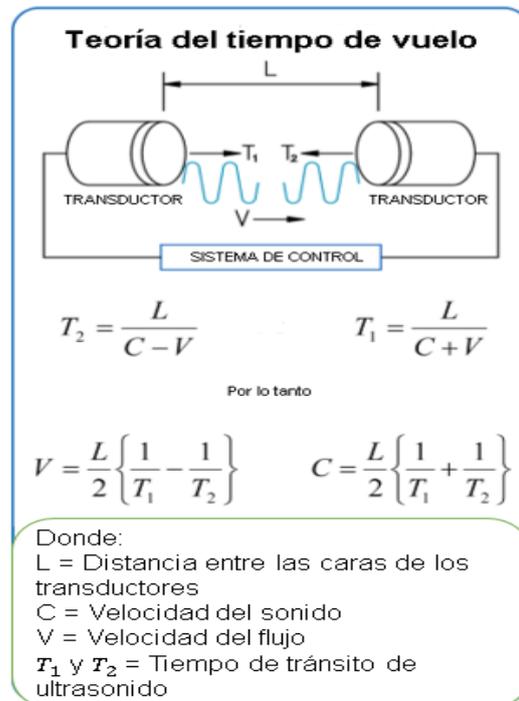


Figura 5.4 Teoría del anemómetro ultrasónico (68)

La extracción de la información medida por el instrumento Wind Sonic se realiza mediante el software que incluye el proveedor del instrumento.

La comunicación entre el equipo y una computadora requiere una fuente de poder de entre 5 – 30 V, y un circuito de comunicación entre la computadora y el anemómetro para lograrlo se utilizó un adaptador Pololu USB - serial que se muestra en la Figura 5.5.

El adaptador como se muestra en la Figura 5.5 cuenta con un conector mini-B y tiene un diseño simple de las líneas de tierra, transmisión y recepción para la comunicación y utiliza niveles de señal de 3.3 V por lo que facilita la utilización de microcontroladores que funcionen a 5 V sin requerir convertidores para conectarse.

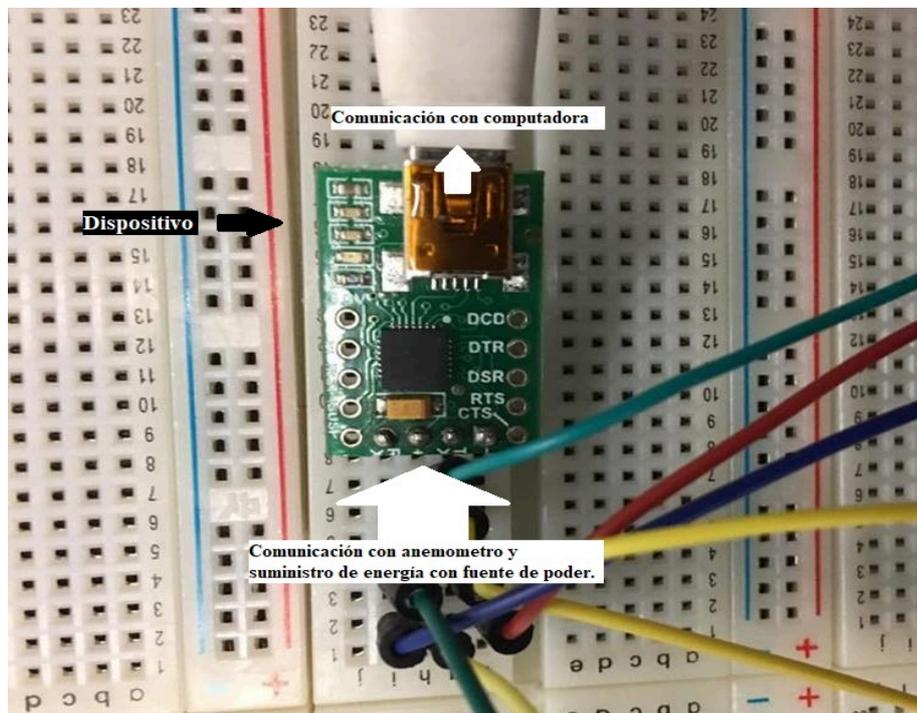


Figura 5.5. Dispositivo, adaptador Pololu USB-Serial.

CAPÍTULO VI ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 PROPIEDADES DEL SUELO

El simulador DEAHE requiere tres características que se deben de conocer para poder tener resultados: i) las propiedades termo físicas del suelo, ii) registros meteorológicos de temperaturas anuales de la zona y iii) la temperatura estable del subsuelo. Con esta información se puede realizar los cálculos correspondientes para determinar la profundidad en la que la afectación de la temperatura por la variación de la temperatura diaria y estacional es menor a 1°C, por lo tanto, la profundidad adecuada para la instalación del intercambiador de calor geotérmico aire-tierra.

6.2 PROPIEDADES TERMO FÍSICAS DEL SUELO

Para la medición de las propiedades del suelo se utilizó el equipo KD2-pro descrito anteriormente.

Uno de los factores principales que afecta el comportamiento térmico del suelo es la humedad. La cantidad de humedad presente en el suelo varía por época del año y la precipitación de esta. Un cambio del porcentaje de humedad en el suelo se refleja en la variación de las mediciones de sus propiedades térmicas. Tomando los extremos de humedad se analiza el suelo seco y saturado en 3 profundidades diferentes, superficial a 4 y 24m.

Los resultados calculados para la tierra seca, por el KD2 pro muestran una difusividad térmica promedio de 0.205 mm²/s con una desviación estándar de 0.044 y para la tierra saturada de 0.232 mm²/s con una desviación estándar de 0.066.

Los cálculos del comportamiento de la difusividad térmica del suelo son similares por lo menos hasta los 24 metros de profundidad (Figura 6.1) y de acuerdo con las muestras que se tienen hasta los 30 m de profundidad por los componentes del suelo y la similitud en sus parámetros termo físicos se puede inferir que la capa es sedimentaria desde la superficie hasta los 30 metros.

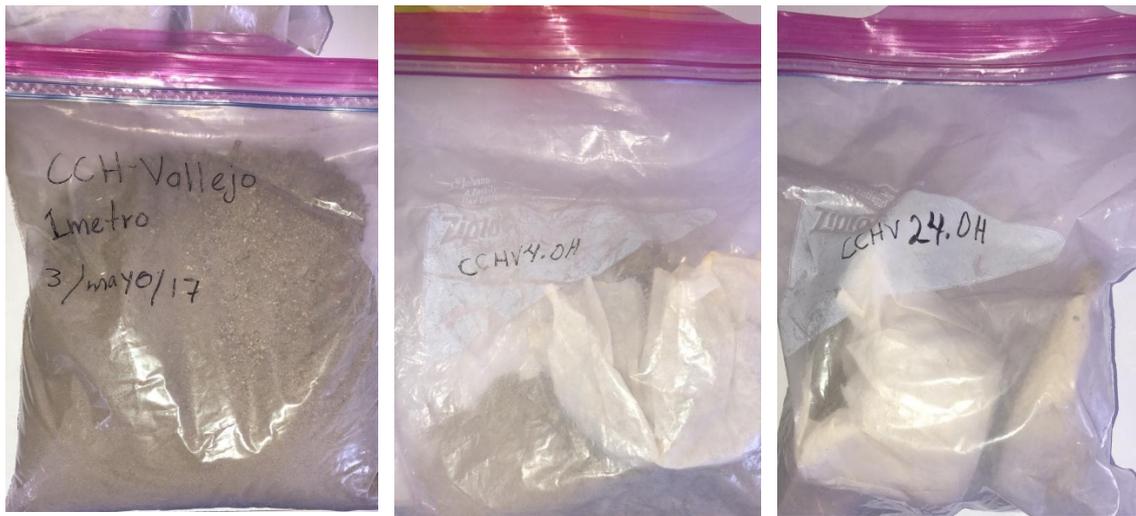


Figura 6.1 Muestras de tierra a diferentes profundidades.

6.2 RESULTADO Y ANALISIS DE LAS MEDICIONES DE TEMPERATURAS DEL SUELO A DIFERENTES PROFUNDIDADES

6.2.1 ANÁLISIS Y RESULTADOS DE LAS MEDICIONES SUPERFICIAL, 50 CM Y 1 METRO DE LA TEMPERATURA DEL SUELO.

Las mediciones de la estabilidad de la temperatura del suelo con la profundidad se tomaron en las estaciones de invierno y verano con intervalos de tiempo de 15 min entre cada medición.

Las mediciones se plantearon de dos formas distintas a continuación, se describe y analiza cada caso:

1.- Con el propósito de analizar la afectación de la temperatura del suelo con la variación de la temperatura ambiente y la radiación solar en la zona (variación diaria y estacional), se excavó un pozo de prueba de 1 metro de profundidad, ubicado como se muestra en la figura 6.1, donde se colocaron 3 termopares tipo “t” a profundidades de 1 metro, 50 cm y superficial y se volvió a rellenar el pozo con la tierra extraída.

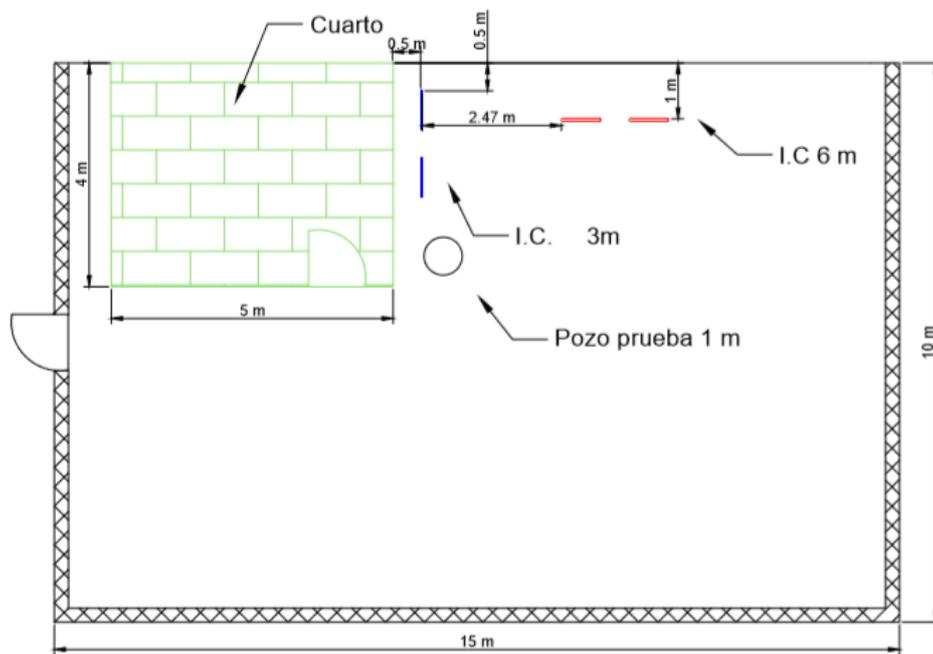


Figura 6.1. Plano de zona de mediciones experimentales.

Se tomó el registro de las temperaturas del subsuelo en el pozo de prueba durante diferentes épocas del año los resultados se muestran en las figuras 6.2 y 6.3 a continuación.

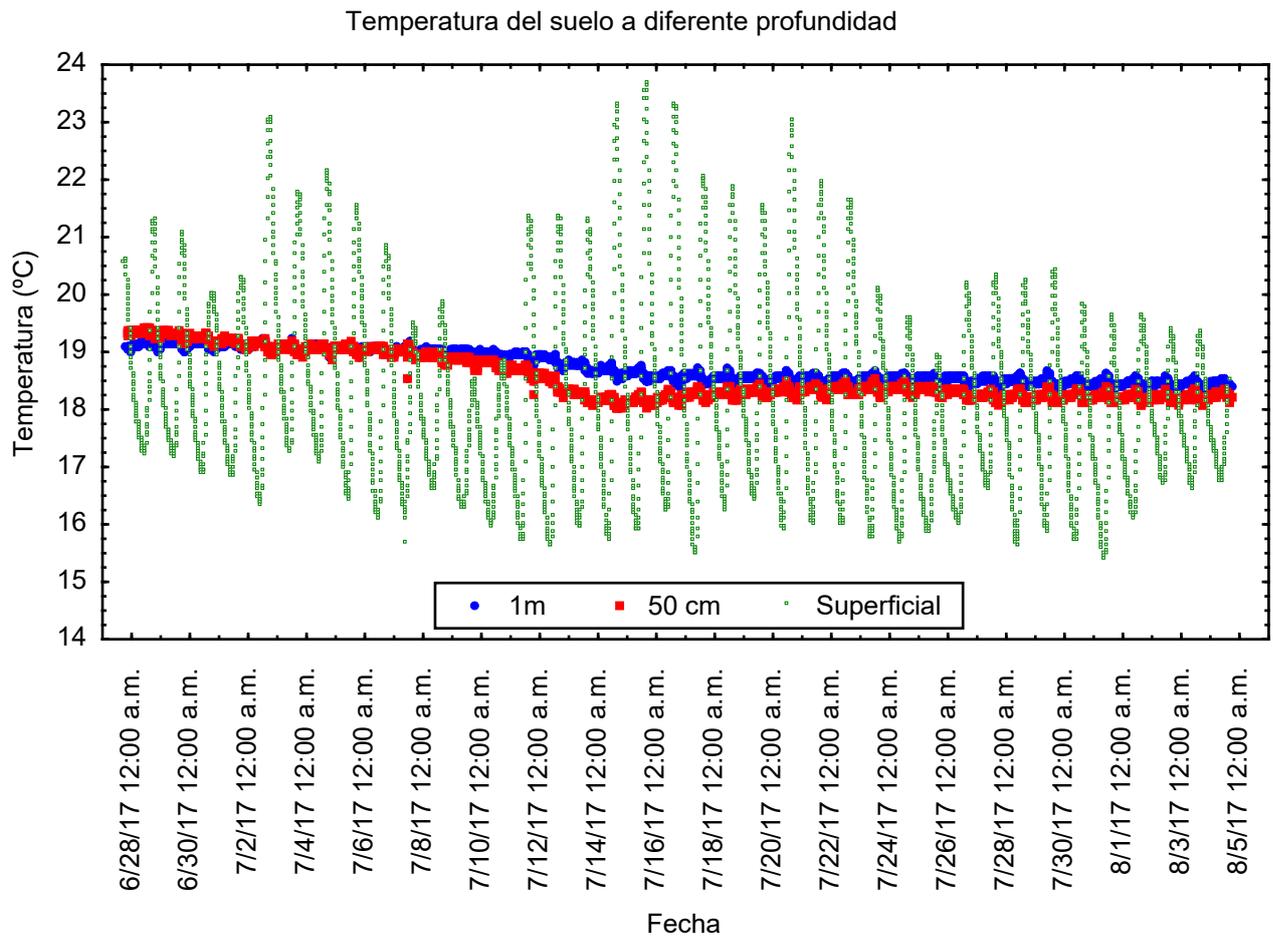


Figura 6.2. Temperaturas del suelo a diferentes profundidades en la estación de verano

La afectación térmica debido al ambiente (la radiación solar y los cambios de temperatura diarios) se ven directamente reflejados en la superficie, donde se puede ver un comportamiento oscilatorio conforme el día y la noche a lo largo del mes, sin embargo, a los 50 cm ya se puede ver que la variación de la temperatura es menor, aunque con afectaciones que ya no dependen de la variación diaria si no de la variación estacional, a 1 metro de profundidad la temperatura se mantiene oscilando con un máximo 19.29°C y mínimo de 18.30°C y en promedio a 18.76°C como se muestra en la figura 6.2 para la estación de verano. Aunque todas las mediciones tienden a descender junto a la temperatura de la superficie que se relaciona directamente con el medio ambiente y la prolongación del descenso de la temperatura.

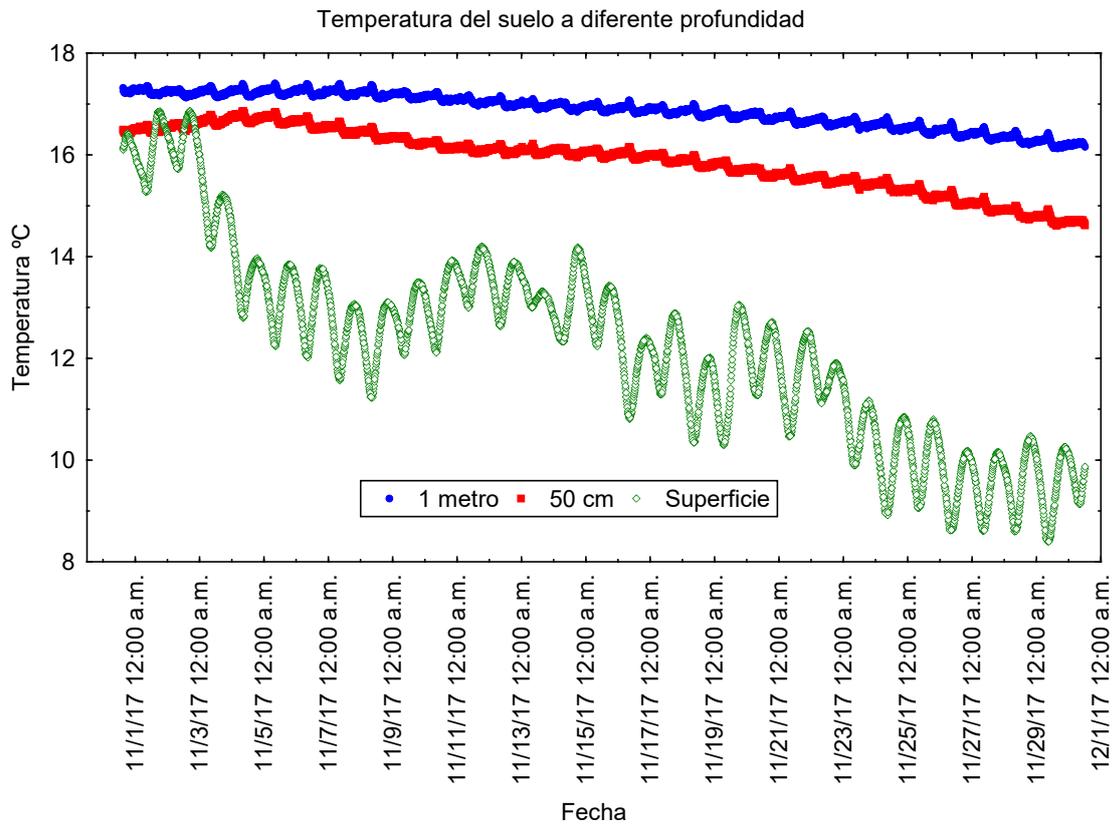


Figura 6.3. Temperaturas del suelo a diferentes profundidades en la estación de invierno.

En la estación de invierno el comportamiento general de las temperaturas fue en descenso, todas fueron afectadas por la variación diaria de temperatura y la incidencia de la radiación solar. Nuevamente la temperatura a 1 metro de profundidad fue la que tuvo el comportamiento más estable mostrando una temperatura promedio de 16.88°C , con un máximo y mínimo de 17.40°C y 16.13°C respectivamente.

La afectación de la variación de la temperatura estacional se ve reflejada haciendo una comparación de la temperatura promedio del suelo de las figuras 6.2 y 6.3 encontrando una diferencia de 1.88°C entre verano e invierno.

Con la figura 6.2 y 6.3 podemos observar que a 1 metro de profundidad la temperatura del subsuelo se mantiene con una variación superior a 1°C debido a las afectaciones de la variación estacional de la temperatura principalmente.

En el sitio se contaba con la instalación e instrumentación de dos intercambiadores de calor, ubicados como se muestran en la figura 6.1, enterrados a 3 y 4.8 metros de profundidad.

Utilizando el intercambiador de calor de 3 m de profundidad, previamente instrumentado, se tomaron mediciones de las temperaturas durante diferentes estaciones del año, para medir la variación de la temperatura del suelo a 3 m y compararlos con la temperatura ambiente con el propósito de analizar la variación de la temperatura a esa profundidad y observar la penetración de la onda diaria y estacional.

Las mediciones de la temperatura del medio ambiente que se utilizó como base de comparación, se adquirió de la estación meteorológica ubicada en el mismo plantel a 20 m de distancia y 8 m de altura, donde se encuentra la zona de mediciones experimentales de la presente tesis.

Los resultados obtenidos durante las mediciones antes descritas se pueden observar en las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 que se muestran a continuación, donde se presentan las mediciones de la temperatura del suelo a 3 metros de profundidad comparadas con la temperatura del medio ambiente en diferentes estaciones del año.

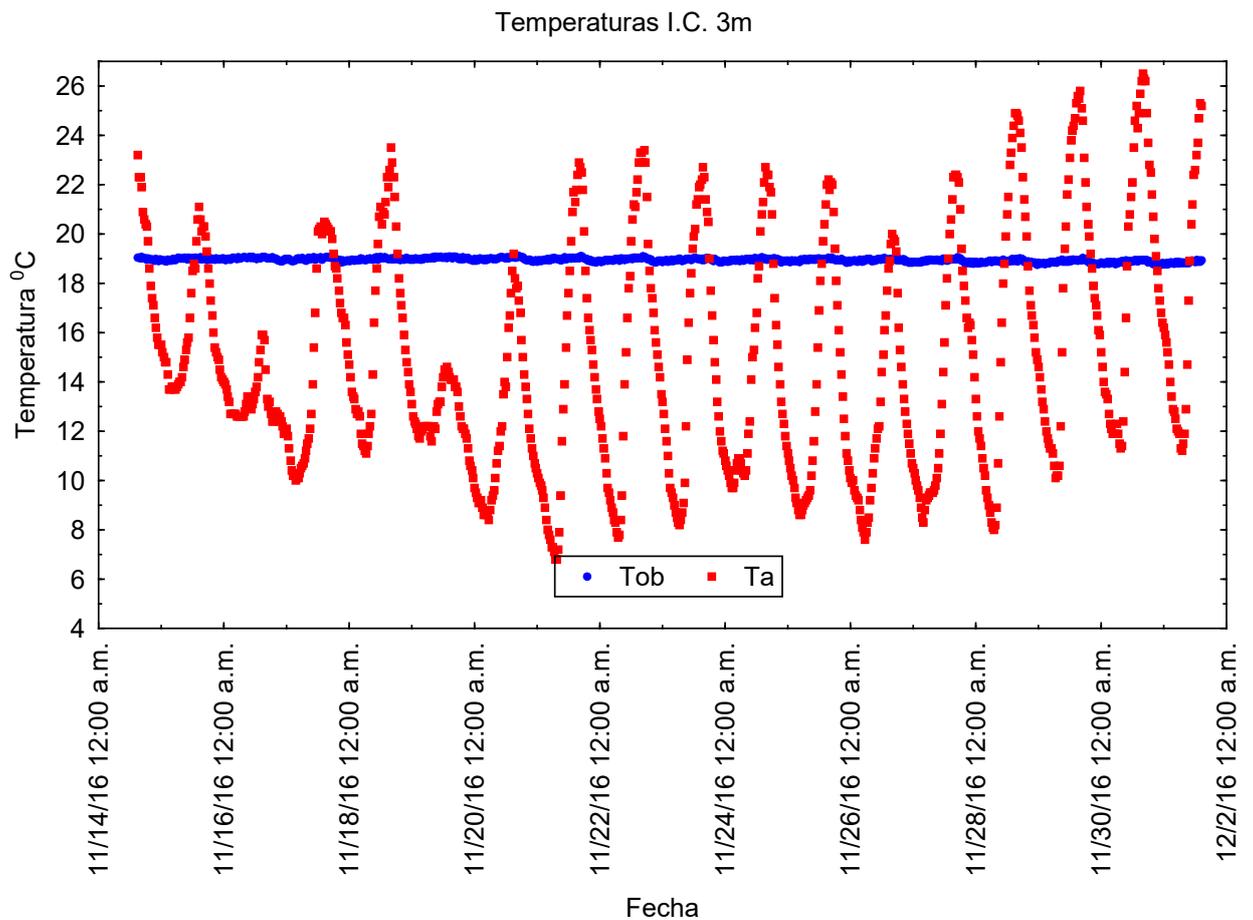


Figura 6.4. Mediciones de temperatura, estación invierno 2016 en I.C. 3 m.

Las mediciones mostradas en la figura 6.4, se midieron durante el mes de noviembre con un intervalo entre medición de cada 15 minutos en la estación de invierno del año 2016, mostrando que las temperaturas del medio ambiente varían entre los 26.5°C y 6.8°C, lo que implica una variación en la temperatura del medio ambiente de 19.7 °C, las ondas diarias de temperatura que penetraron se ven reflejadas en una variación de la temperatura del suelo a los 3 metros de profundidad de entre 19.12°C y 18.75°C, teniendo una diferencia de 0.37°C, manteniendo una temperatura promedio de 18.95°C.

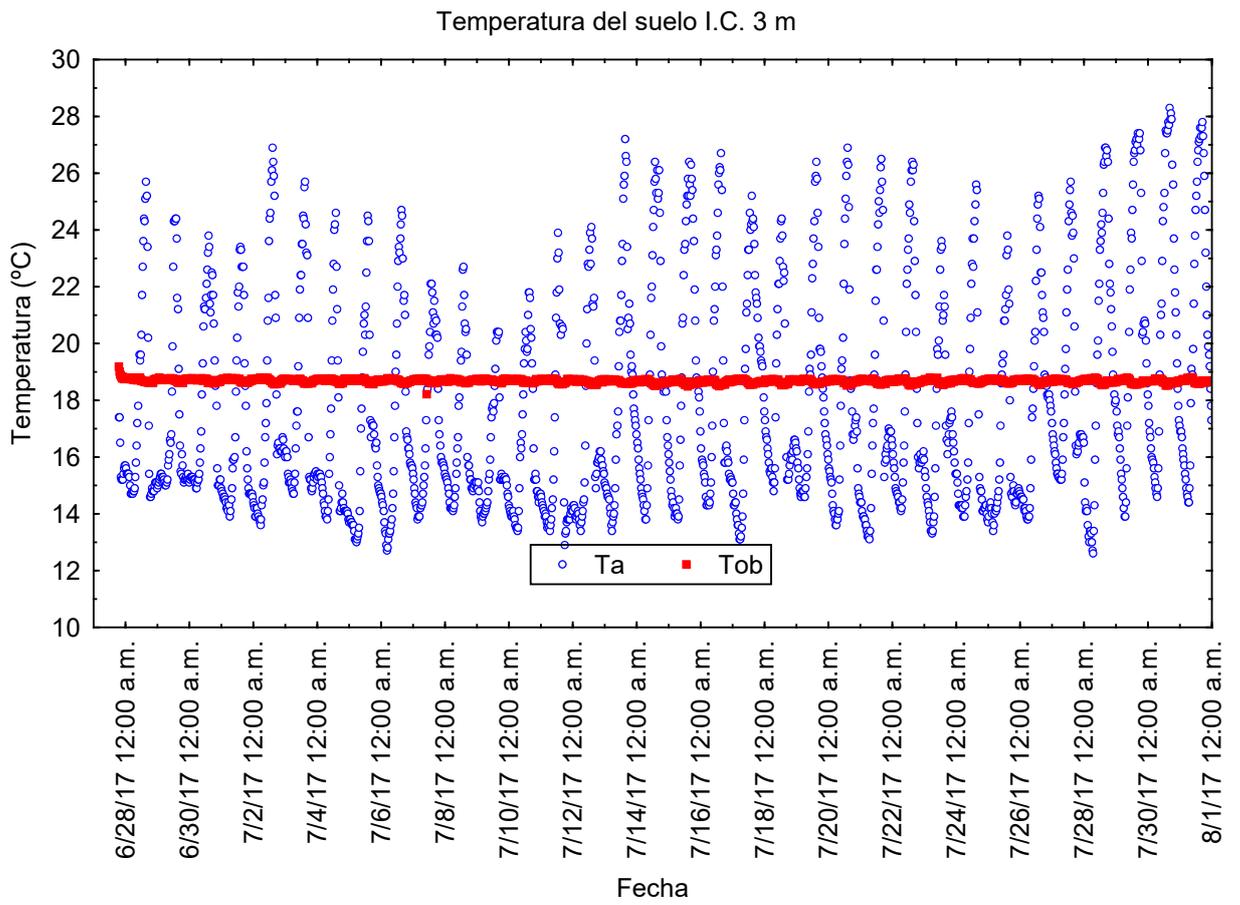


Figura 6.5. Mediciones de temperatura, estación verano 2017 en I.C. a 3 m.

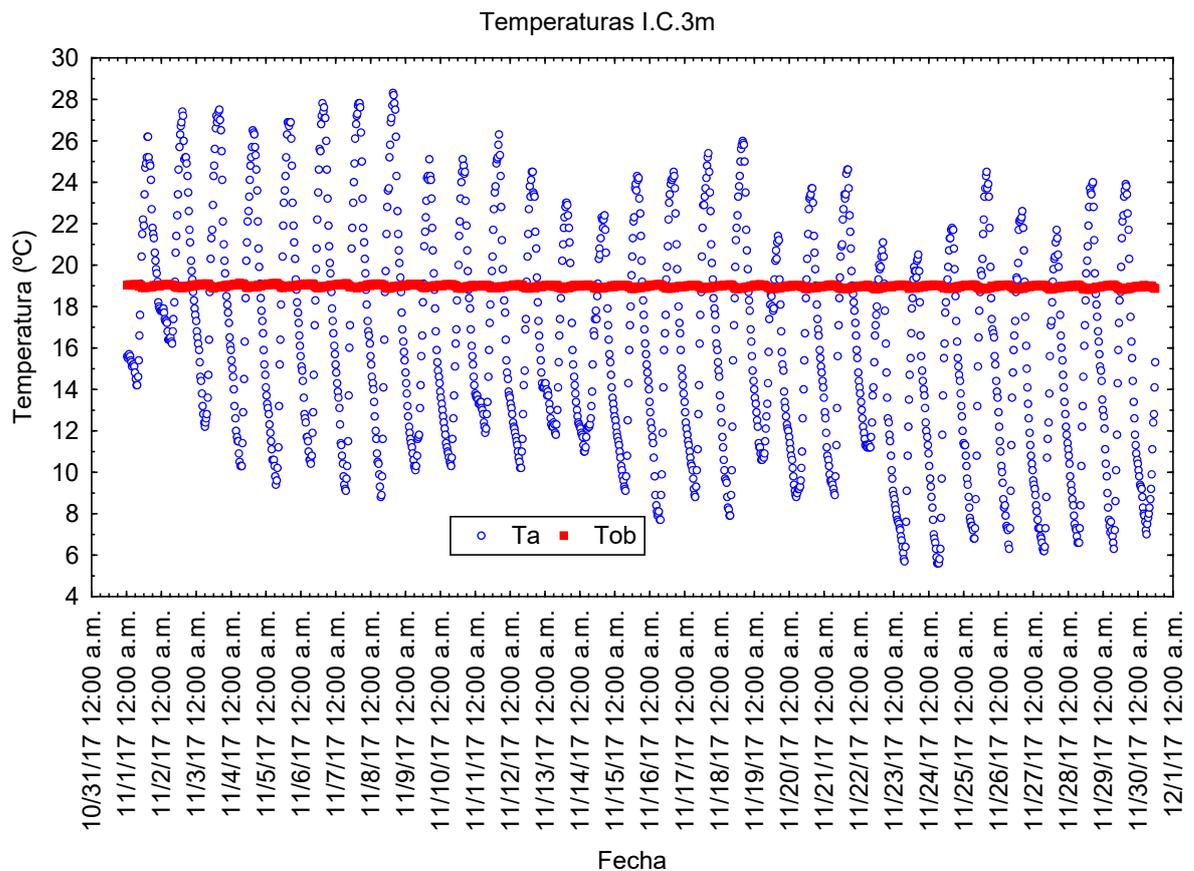


Figura 6.6. Mediciones de temperatura, estación de invierno 2017 en I.C. a 3 m.

En las mediciones de la figura 6.5, durante la estación de verano en el mes de julio del 2017, se muestra que las temperaturas del medio ambiente oscilaron entre los 28.3°C y 12.6°C, con una variación de la temperatura del medio ambiente de 17.83°C, las ondas diarias de temperatura que penetraron se ven reflejadas en una variación de la temperatura del suelo a los 3 metros de profundidad de entre 19.18°C y 18.21°C, teniendo una diferencia de 0.97°C, manteniendo una temperatura promedio de 18.68°C.

Aunque la diferencia de temperaturas del medio ambiente es menor que en el caso anterior esto se justifica por la onda de retraso estacional de la época de invierno que afecta la temperatura del suelo a un paso menos acelerado, producto de la inercia térmica del suelo, lo que se refleja en la reducción de la temperatura promedio del suelo entre las diferentes estaciones.

Las mediciones analizadas en la figura 6.6, muestran que en la estación de invierno en el mes de noviembre del 2017, se tuvo temperaturas del medio ambiente que varían entre los 28.3 y 5.6°C, con una diferencia de las temperaturas del medio ambiente de 22.7°C, las ondas diarias de temperatura que penetraron se ven reflejadas en una variación de la temperatura del suelo a los 3 metros de profundidad de entre 19.12 y 18.80°C, teniendo una diferencia de 0.32°C, manteniendo una temperatura promedio de 18.97°C.

La afectación de la variación estacional se ve reflejada haciendo una comparación de las temperaturas promedio del suelo de las figuras 6.4, 6.5 y 6.6 que dan como resultado 18.95, 18.68 y 18.97°C respectivamente, con una diferencia de 0.29°C, a lo largo de un año y medio.

Un lugar óptimo para la instalación de intercambiador de calor aire-tierra es donde la variación de la temperatura del suelo sea menor a 1°C, como se mencionó en capítulos anteriores, por lo que a partir de las mediciones antes presentadas a 3 metros de profundidad la variación de la temperatura es menor al grado, considerándose un lugar óptimo para la instalación de un intercambiador de calor aire-tierra.

6.2.2. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PRIMER MÓDULO DEL SIMULADOR.

Como ya se describió en el capítulo IV el simulador está conformado por dos módulos principales. Para esta sección nos enfocaremos en el primero donde se determina la profundidad a la que debe ser instalado el intercambiador de calor aire-tierra en paralelo, tomando en cuenta las propiedades termo físicas del suelo y las condiciones climáticas de la zona donde se va a instalar el sistema.

A continuación, se muestra en la Tabla 6.1, los parámetros de entrada que requiere el simulador y los valores que se dieron conforme a las mediciones experimentales *in situ*.

Parámetro	Valor
Temperatura promedio anual (°C)	17.3
Variación promedio anual de temperatura (°C)	6.4
Variación diaria de temperatura (°C)	9
Tipo de suelo	Sedimentario
Profundidad de capa de suelo (m)	30 m
Difusividad térmica del suelo capa A (mm ² /s) Se consideran los dos valores extremos a los que se puede someter el lugar en cuanto a humedad.	0.205 tierra seca 0.232 tierra saturada
Calor específico volumétrico (J/m ³ K)	1,268,000

Tabla 6.1. Parámetros requeridos por el simulador para los cálculos del primero módulo.

Con estos parámetros se alimentó a el simulador y como resultado se obtiene que se debe de instalar el intercambiador de calor a 2.6 m de profundidad, donde la variación de temperatura no será mayor a 1°C a lo largo del año. El resultado se compara con las mediciones experimentales en el intercambiador de calor sin el sistema en funcionamiento, con las condiciones de instalación del dispositivo experimental se tiene la medición del suelo a 3 m, que se presenta en las Figuras 6.4, 6.5, 6.6. donde se observa la medición de la temperatura ambiente y a 3 m de profundidad durante diferentes periodos de tiempo, teniendo como resultado que a 3 m no hay afectación mayor a 1°C de la temperatura a causa de las variaciones climáticas diarias y anuales, por lo que podemos apreciar que el simulador es capaz de determinar la profundidad de instalación del intercambiador.

Se analizó la temperatura a 3 metros de profundidad para comparar lo que predice el simulador contrastado con los datos experimentales, el resultado es una temperatura promedio de 18.89°C y 18.77°C con una desviación estándar de 0.13 y 0.14 respectivamente lo que nos muestra que a los 3 metros de profundidad las temperaturas promedio no tienen diferencias significativas para ambos casos. Este parámetro es uno de los más importantes para analizar la factibilidad de instalar un sistema de intercambiadores de calor aire-tierra porque a mayor profundidad los costes aumentan por lo que se espera que la profundidad del lugar de instalación sea apoyando la reducción del coste de instalación.

6.3 ANÁLISIS DE FUNCIONAMIENTO DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR UTILIZANDO AIRE CALIENTE EN LA ENTRADA.

En la entrada de aire del intercambiador de calor geotérmico enterrado a 4.8 metros de profundidad se inyectó aire caliente con el propósito de simular el desecho térmico de un proceso industrial. La inyección se llevó a cabo durante un periodo de 18 días del mes de noviembre lo que representa la estación invernal. La inyección de aire caliente se realizó sin intermitencias, lo que se significa que se dejó el equipo funcionando las 24 horas de cada día los resultados de las mediciones se muestran a continuación en la figura 6.7. Las mediciones tomadas durante esta experimentación se tomaron con intervalos de 30 minutos.

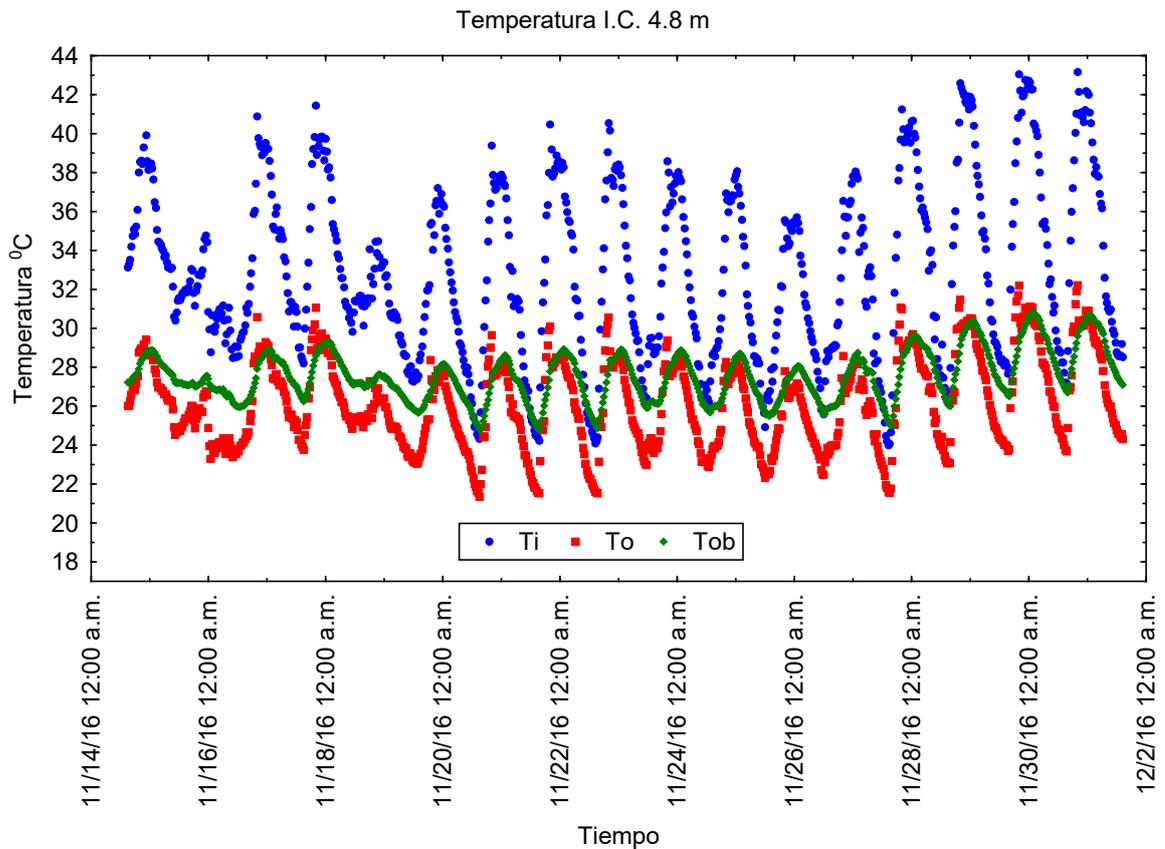


Figura 6.7. Mediciones de temperatura a 4.8m inyectando aire caliente donde Ti es Temperatura de entrada, To Temperatura de salida y Tob es la temperatura del fondo por fuera del intercambiador de calor)

La figura 6.7 muestra claramente el comportamiento a lo largo del tiempo de las temperaturas de la entrada y salida del intercambiador de calor y la temperatura del fondo por fuera del tubo. Lo que se puede analizar en cuanto al comportamiento del suelo por el uso del intercambiador de calor es que tenemos un aumento de la temperatura promedio del suelo, esto se produce debido a que el equipo estuvo en funcionamiento las 24 horas inyectando aire caliente, causando que el suelo no alcance la recuperación de temperatura necesaria, traduciéndose en su aumento de la temperatura promedio del suelo pasando de 18.95 a 27.54 °C.

A continuación, en la Tabla 6.2 se observan los valores exactos de las temperaturas medidas de entrada, salida y del fondo por la parte de a fuera del intercambiador de calor.

Descripción	Ti	To	Tob
T. Máxima	43.16	32.22	30.85
T. Mínima	23.99	21.37	24.76

Tabla 6.2. Mediciones de temperaturas a 4.8 m. de profundidad en °C, con entrada de aire caliente.

La información de la Tabla 6.2 nos permite hacer varios análisis;

i) La diferencia entre la temperatura promedio máxima de entrada y salida tienen una diferencia de 10.94 °C , lo que se traduce en una reducción de la temperatura de entrada de hasta un 25% aproximadamente, en el mejor de los casos.

ii) En los 18 días que se trabajó con alta temperatura en la entrada del intercambiador durante 24 hrs al día se pudo notar un aumento de la temperatura promedio del suelo de 8.59°C por la circulación del aire y la falta de recuperación térmica del sistema, por lo que para aplicaciones de enfriamiento en procesos se recomienda hacer estudios de la afectación del suelo a largo plazo con tiempos de recuperación y diferentes estaciones del año.

iii) Si se mantiene en funcionamiento llegará a un estado estable el suelo con una temperatura mayor lo que produciría que el sistema de intercambiador de calor sea menos eficaz.

6.4 ANÁLISIS Y RESULTADOS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR UTILIZANDO AIRE DEL MEDIO AMBIENTE EN LA ENTRADA

Se hizo pasar aire del medio ambiente a través del intercambiador de calor aire-tierra enterrado a 4.8 metros de profundidad, tomando mediciones de la temperatura de entrada, salida y en el fondo fuera del I.C, con intervalos de 30 min entre cada medición para observar su comportamiento en la estación de verano e invierno y calcular la efectividad y el coeficiente de desempeño (COP, siglas de *coefficient of performance*) del sistema para el enfriamiento y calentamiento respectivamente. Los resultados se muestran a continuación en la Figura 6.8.

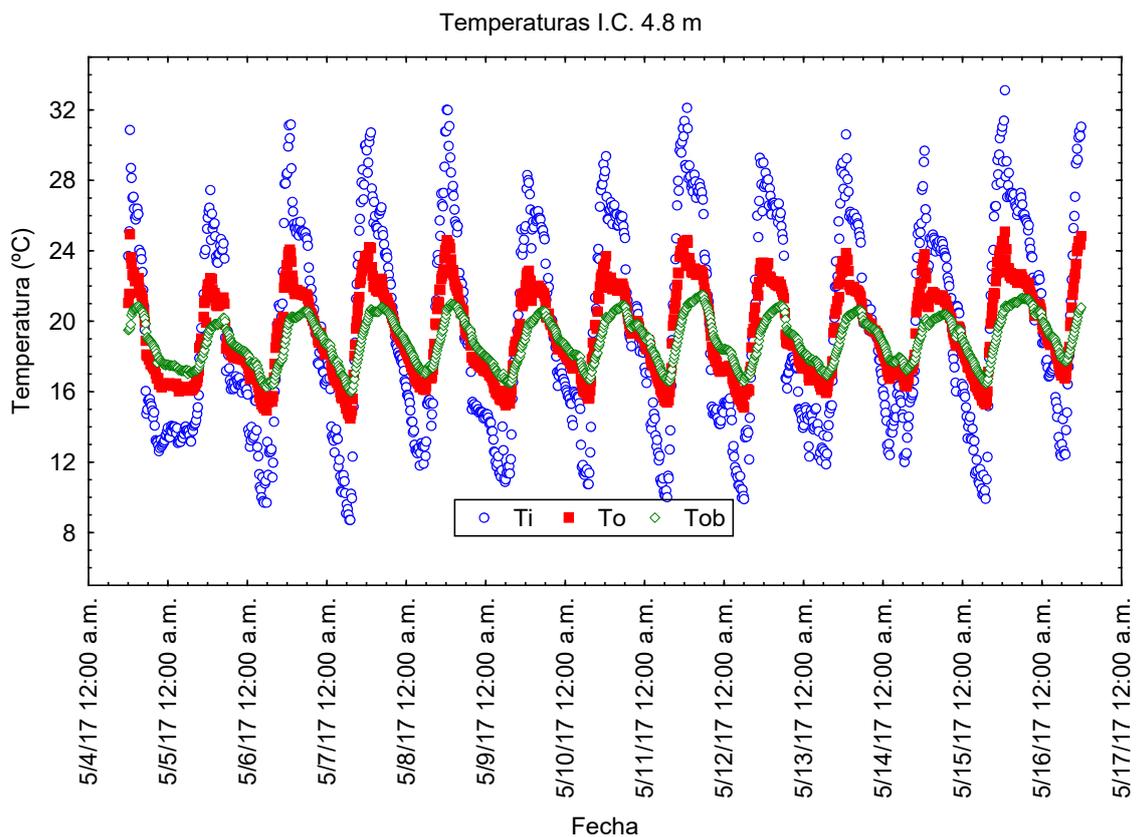


Figura 6.8. Mediciones de la temperatura, estación verano.

Para el estudio de la Figura 6.8 es importante mencionar algunas consideraciones generales; 1) La temperatura ambiente se considera como la temperatura de entrada (T_i) y 2) El sistema estuvo funcionando las 24 horas sin interrupciones, en la misma Figura 6.8 se muestra un comportamiento oscilatorio de todas las mediciones de lo que podemos realizar los siguientes análisis;

- i) El comportamiento oscilatorio de las temperaturas es producto de la diferencia de temperaturas entre el día y la noche, mostrando una temperatura mayor durante el día y menor durante la noche.
- ii) La temperatura del suelo alrededor del I.C. se ve afectada a falta de recuperación del suelo, producto del continuo funcionamiento del sistema lo que se refleja en la figura 6.8 en la temperatura T_{ob} como un ligero aumento general de la temperatura.
- iii) La máxima diferencia de temperatura encontrada entre T_i y T_o es de 8.04°C para enfriamiento y de una diferencia de 5.78°C para calentamiento.

Para la estación de verano se realizaron los calculos del coeficiente de desempeño COP de enfriamiento y la efectividad del sistema (\mathcal{E}) con las siguientes ecuaciones:

Para le efectividad (\mathcal{E}) se utilizó la ecuación (11):

$$\mathcal{E} = \frac{(T_o - T_i)}{(T_{ob} - T_i)} \quad (23)$$

Para describir el funcionamiento de los dispositivos de bomba de calor, se puede utilizar la eficiencia energetica anterior y también el coeficiente de desempeño (COP). Si el dispositivo funciona como refrigerador o algún otro aparato parecido en nuestro caso el intercambiador de calor aire-tierra que se usa para enfriar un espacio, se usa el coeficiente de refrigeración (COR). Suponiendo que sigue el ciclo de Carnot invertido, se le llamaría bomba de calor de Carnot, o refrigerador de Carnot y en terminos de la temperatura que son parametro conocidos podemos calcularlas con las siguientes ecuaciones (69):

Para el calentamiento se utiliza el COP (69):

$$COP = \frac{T_o}{T_o - T_i} \quad (24)$$

Y para el enfriamiento o *COR* (69):

$$COR = \frac{T_i}{T_o - T_i} \quad (25)$$

El COP de los sistemas de tierra es de alrededor de 4.0, el desempeño de refrigeración y acondicionadores de aire, se expresa como índice de eficiencia de la energía (EER, siglas en inglés Energy Efficiency Rating) este sirve para sistemas de enfriamiento y calentamiento llamados acondicionadores de aire. La equivalencia con los COP es

$$EER = 3.412 * COP_r \quad (26)$$

Normalmente los sistemas cumplen con un EER de entre 8 y 12 (COP de 2.3 a 3.5). Una bomba de calor de alta eficiencia tiene un COP 3.3 calentamiento y un EER de 16.9 (COP de 5) en el acondicionamiento de aire.

Para analizar el enfriamiento que se logra con el sistema propuesto se hacen las siguientes consideraciones:

- a) Las temperaturas consideradas para los cálculos del COR de enfriamiento son todas aquellas mayores a 25°C tomando en cuenta que se encuentran fuera del confort térmico para la época de verano.
- b) La efectividad del sistema se calculó considerando que el equipo debe funcionar solamente cuando las temperaturas sean menores a 17°C y mayores a 25°C.
- c) Para el cálculo de las efectividades se utilizó la medición de la temperatura del suelo T_{ob} con sus respectivas variaciones por el paso del aire como temperatura del suelo.

Los resultados del cálculo del COR para enfriamiento se muestran a continuación en la Figura 6.9, que muestra un histograma con la frecuencia de los COR calculados bajo las consideraciones antes mencionadas.

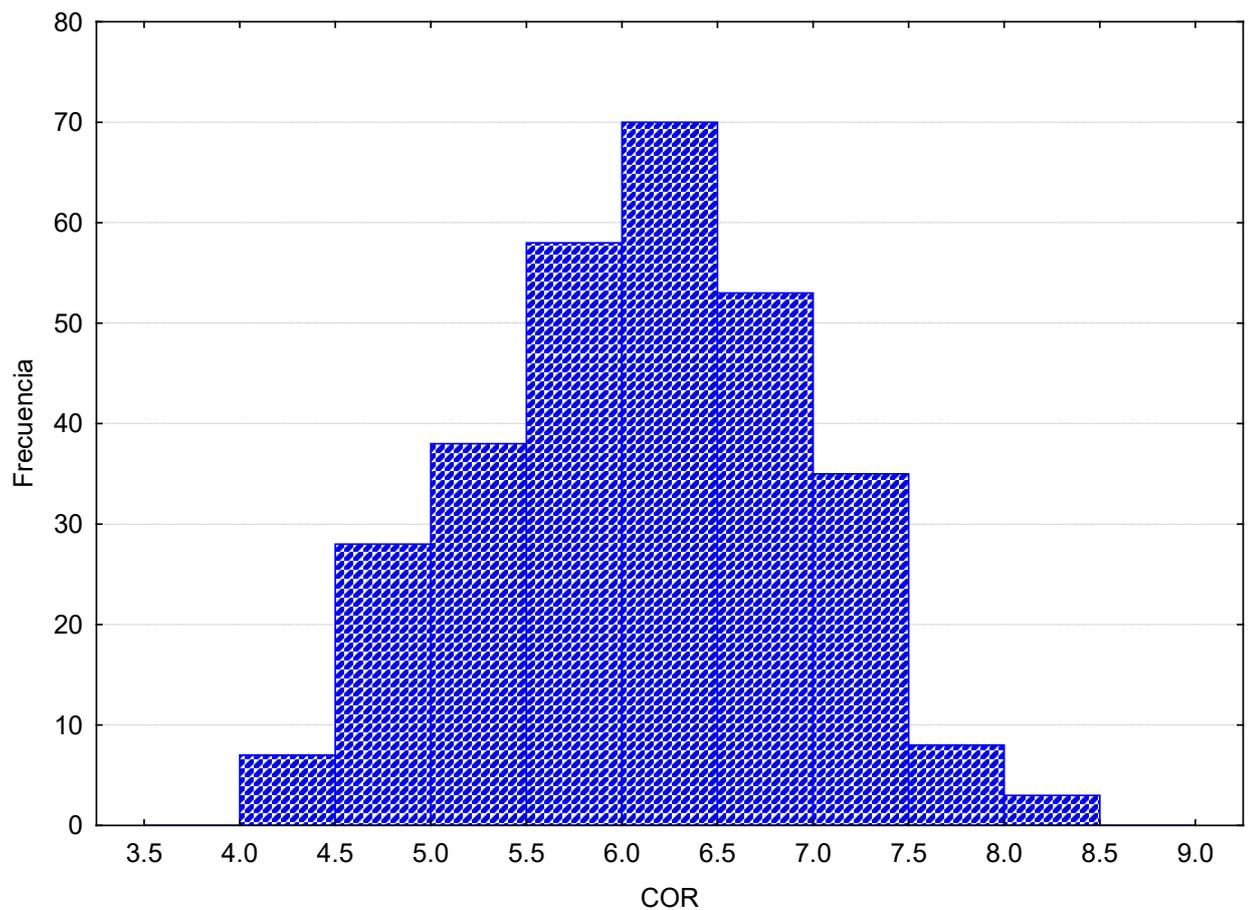


Figura 6.9. Histograma de cálculos del COR para enfriamiento con temperaturas $17 > T > 25$, °C.

Como se muestra en el histograma anterior, la mayor frecuencia de COR se encuentra entre los 6 - 6.5, mostrándose superior a lo que muestra la literatura para una bomba de calor de alta eficiencia que muestra un COP de 5 para acondicionamiento de aire.

Haciendo los cálculos para cada medición experimental utilizando los datos del mes de Mayo 2017 que se muestran en la figura 6.8 se obtuvo una efectividad promedio de 67.2% con una desviación estándar de 29.7%, con los parámetros de diseño experimental para un intercambiador de calor aire – tierra instalado a una profundidad de 4.8 m, lo que nos da una longitud total de 9.6m, funcionando para reducir la temperatura del aire de entrada a un espacio a climatizar en la estación de verano.

6.4.1 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL SIMULADOR DE AHE, RESPECTO AL DISEÑO Y EFECTIVIDADES DEL INTERCAMBIADOR CALOR AIRE-TIERRA

Como se mencionó anteriormente el simulador consta de dos módulos el primer módulo se validó y explicó en la sección anterior. El segundo módulo del simulador se enfoca en el diseño del intercambiador de calor enterrado, determinando el dimensionamiento para su funcionamiento tomando en cuenta flujo másico, área de terreno disponible, diámetro de tubo a utilizar, con esta información del lugar el simulador determina para diversas efectividades la longitud del intercambiador de calor a instalar.

Con la información experimental que se muestran en la Tabla 6.1, utilizados como datos de entrada en el simulador se determinaron los parámetros de diseño y condiciones de operación. En el caso del diseño el simulador obtuvo para diferentes efectividades la longitud del tubo requerido, estos datos se presentan en la tabla 6.3 a continuación.

Efectividades	Longitud del tubo (m)
55	8.6
60	9.9
65	11.3
70	13
75	15
80	17.3
85	20.4
90	24.8

Tabla 6.3. Efectividades dependiendo de la longitud del tubo.

A continuación en la Figura 6.10, se muestra las mediciones de la temperatura en los termopares colocados en la entrada, salida y el fondo fuera del tubo, en el intercambiador de calor a 4.8 m de profundidad, para la estación de invierno, señalando las diferencias de temperatura máximos para calentamiento y enfriamiento.

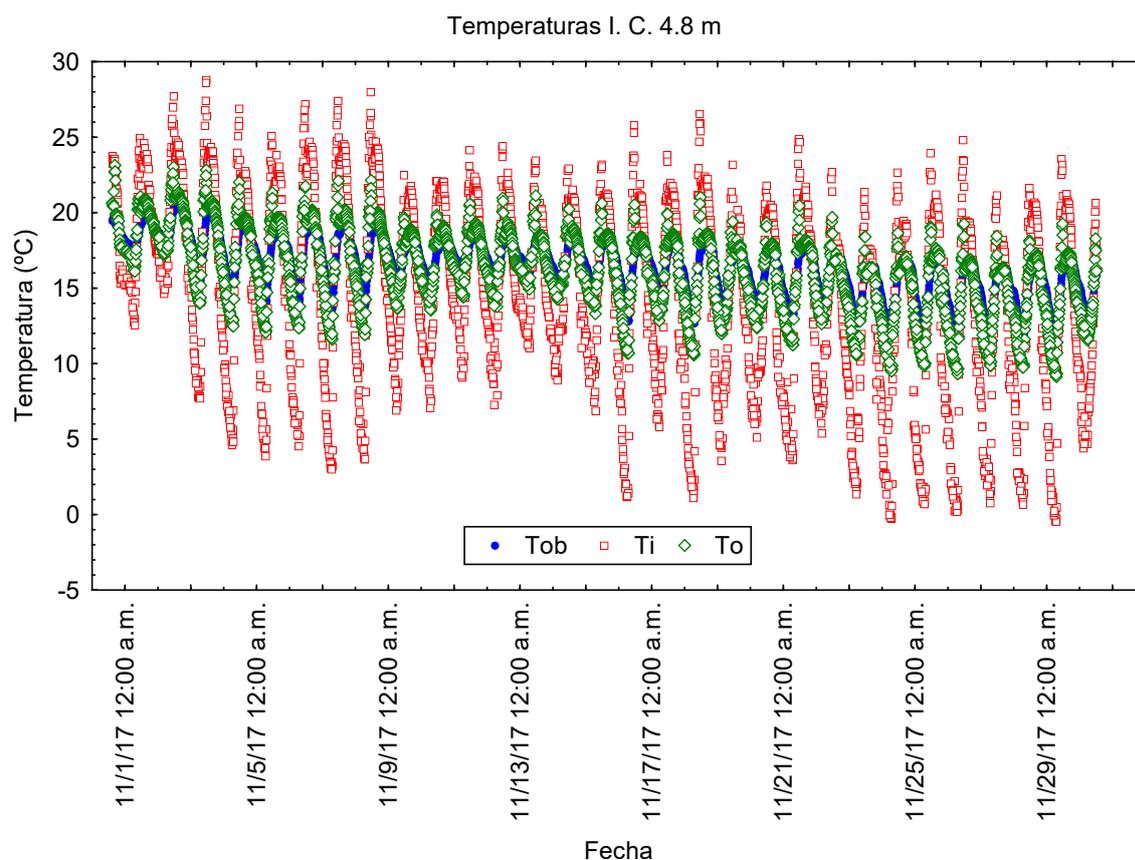


Figura 6.10 Mediciones de la temperatura, estación invierno.

El análisis de la figura 6.10 se realiza tomando en cuenta las mismas consideraciones de temperatura ambiente y de operación que para la estación de verano de la figura 6.8. A continuación se presenta el análisis de las mediciones de temperatura;

- i) El aumento y decremento de la temperatura es producto de la diferencia de temperaturas entre el día y la noche, mostrando una temperatura mayor durante el día y menor durante la noche alcanzando temperaturas de 28.7°C y -0.55°C respectivamente.

- ii) La temperatura del suelo alrededor del I.C. se ve afectada a falta de recuperación del suelo, producto del continuo funcionamiento del sistema lo que se refleja en la figura 6.10 en la temperatura T_{ob} como una ligera disminución de la temperatura.
- iii) La máxima diferencia de temperatura encontrada entre T_i y T_o es de 7.34°C para enfriamiento y de una diferencia de 10.01°C para calentamiento, ambos puntos se encuentran señalados en la figura 6.10.

Para la estación de verano se realizaron los calculos del COP de enfriamiento y la efectividad del sistema con las siguientes consideraciones:

- a) Las temperaturas consideradas para los calculos del COP de calentamiento son todos aquellos menores a 17°C tomando en cuenta que se encuentran fuera del confort térmico.
- b) La efectividad del sistema se calculó considerando que el equipo debe funcionar solamente cuando las temperaturas son menor a 17°C y mayor a 25°C .
- c) Para el cálculo de las efectividades se utilizó la medición de la temperatura del suelo T_{ob} como un valor fijo de 18.97°C que es la temperatura promedio medida, suponiendo la recuperación del suelo se completa.

Los resultados del cálculo del COP para calentamiento se muestran a continuación en la Figura 6.11, que muestra un histograma con la frecuencia de los COP calculados bajo las consideraciones antes mencionadas.

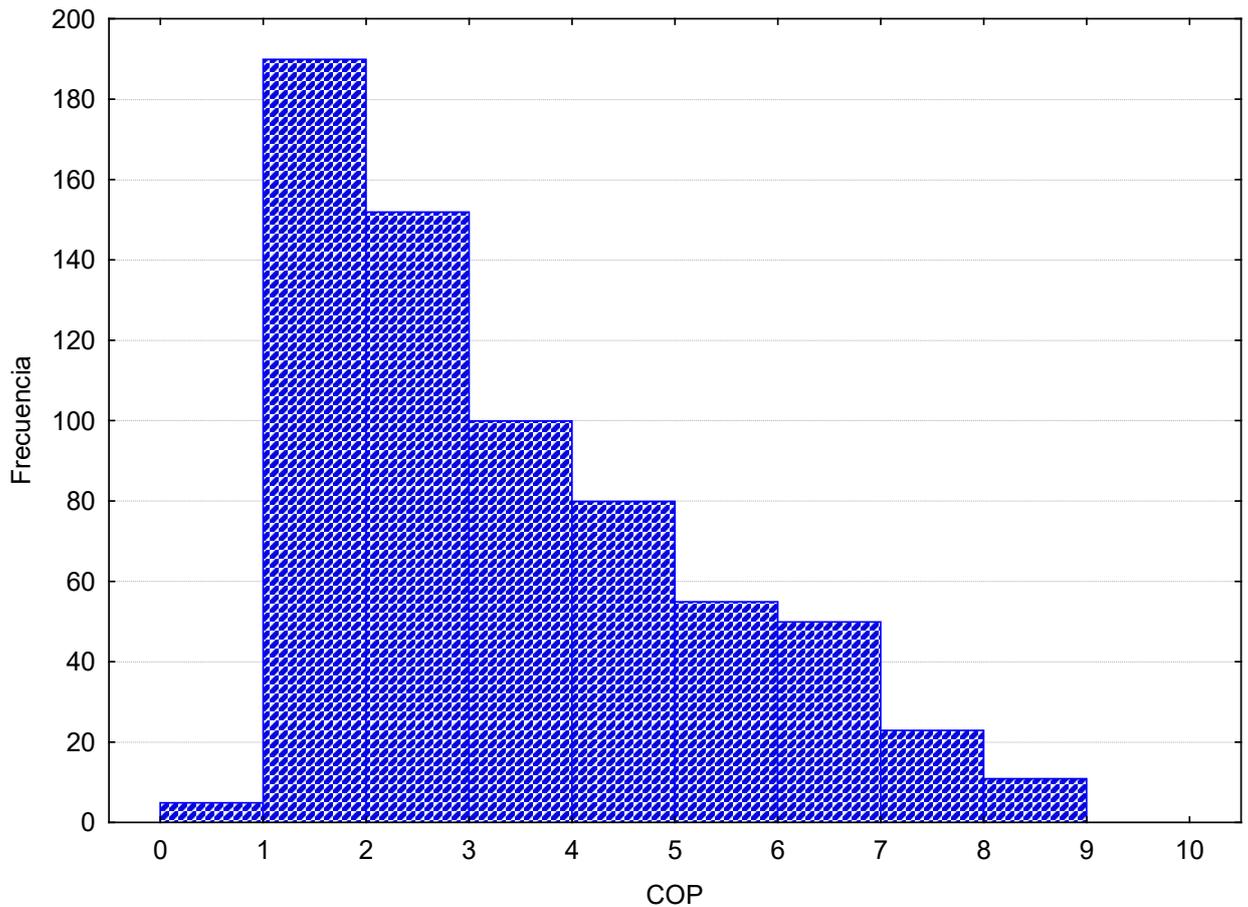


Figura 6.11. Histograma de cálculos del COP para calentamiento con temperaturas $17 > T > 25$, °C.

Los resultados muestran que la mayor frecuencia de COP para calentamiento se encuentra entre los 3 y 4.

La efectividad promedio se calculó con la ecuación 23 que se muestra anteriormente con los datos de noviembre del 2017 que se muestran en la figura 6.10 dando como resultado una efectividad promedio de 74.5% con una desviación estándar de 37.7%, respetando los parámetros de diseño experimental.

6.5 VALIDACIÓN DEL SIMULADOR CALCULANDO TEMPERATURA DE SALIDA CON EL SIMULADOR CONTRA TEMPERATURA DE SALIDA EXPERIMENTAL DEL INTERCAMBIADOR DE CALOR AIRE-TIERRA.

Se realizó una comparación estadística entre los datos obtenidos de la temperatura de salida del intercambiador de calor aire-tierra enterrado en sitio con un intercambiador de calor aire-tierra con parametros de diseño que brinda el simulador teniendo como constantes un 60% de efectividad y la temperatura de estabilidad del fondo del suelo de 18.95°C.

Con esas características de diseño se compararon las temperaturas de salida experimentales y las calculadas con el simulador DEAHE para la estación de verano que se muestran en las figuras 6.12 y 6.13 e invierno en las figuras 6.14 y 6.15 que se muestran a continuación.

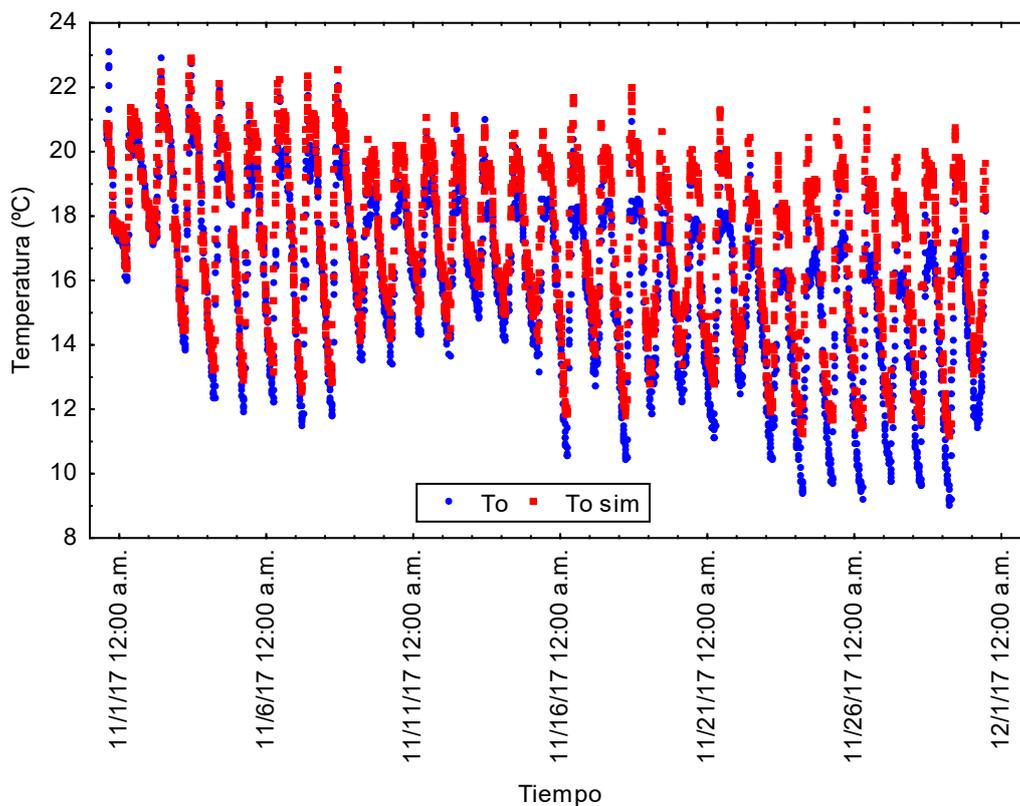


Figura 6.12. Comparación de temperatura calculada y experimentales, estación verano.

Como se puede ver en la figura 6.12 el ajuste de las temperaturas tienen un comportamiento similar la diferencia que se aprecia es que la temperatura T_o (Temperatura del suelo experimental) alcanza valores menores que los que calcula el simulador, esto ocurre por que para la T_o sim (Temperatura del fondo del suelo calculada por el simulador) no se considera la afectación del suelo con el sistema en funcionamiento las 24 hrs.

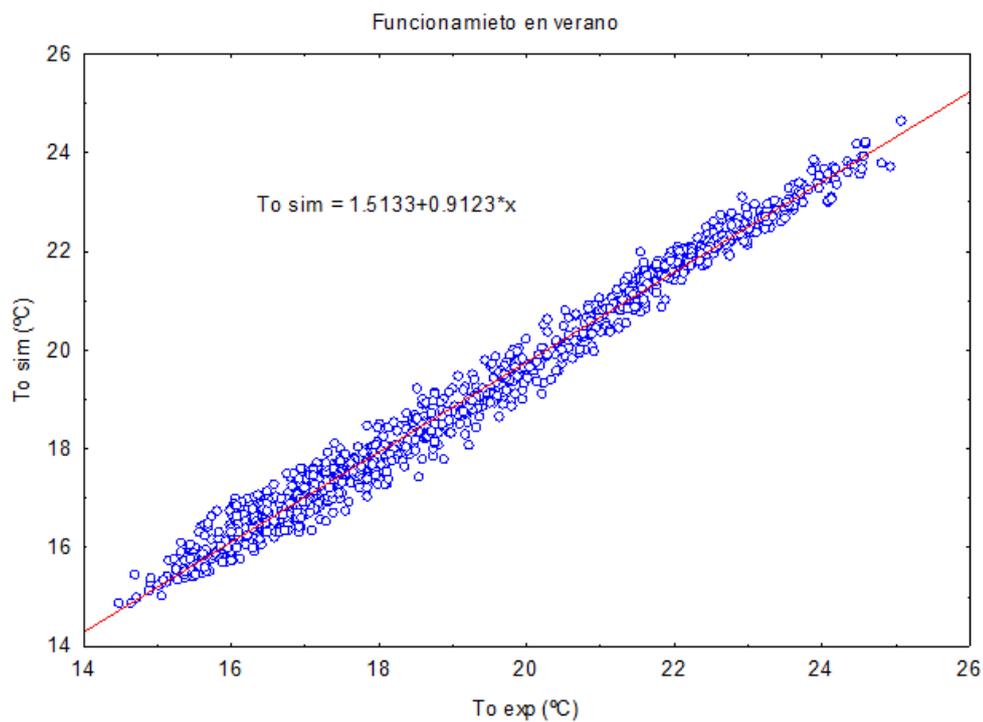


Figura 6.13. Curva de regresión ajustada para la estación de verano.

La Figura 6.13 representa el ajuste a una recta de la comparación entre la temperatura de salida del intercambiador de calor aire-tierra que calcula el simulador y la experimental donde se considera que el sistema está encendido las 24 hrs sin interrupciones, resultado en un aumento de la temperatura del suelo que no está considerado dentro de las consideraciones del simulador, otra diferencia es que el simulador considera una efectividad del sistema de un 60% y En la Figura 6.13 se puede ver que el comportamiento del funcionamiento se ajusta a una recta, lo que nos indica que la diferencia entre la temperatura experimental y la calculada con el simulador es mínima, el ajuste entre las temperaturas es lineal con pendiente cercana a 1 y ordenada con valor de 1.5. El

coeficiente de determinación es de $R^2 = 0.911$, lo cual indica una buena correlación entre los datos experimentales y los datos calculados con una subestimación de 1.5 °C.

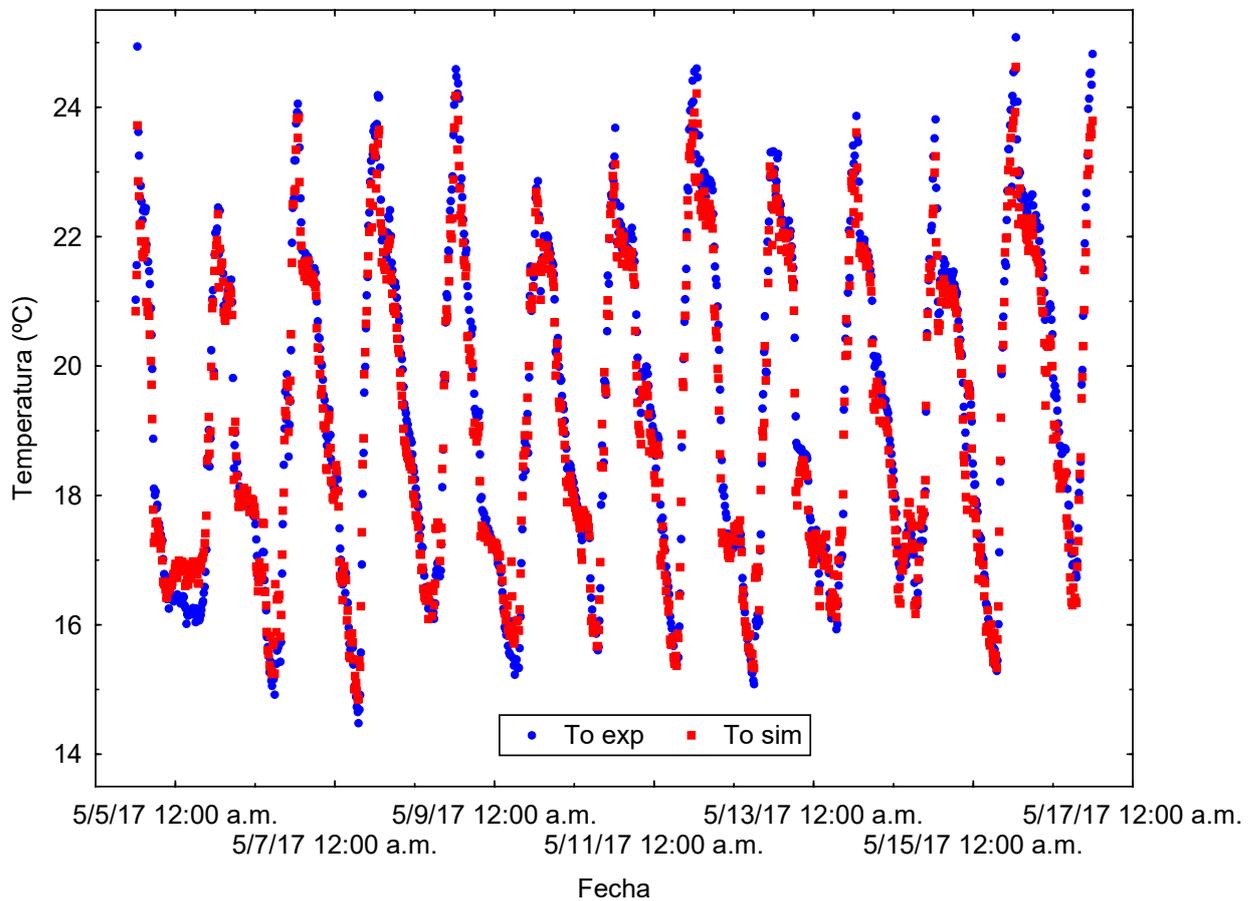


Figura 6.14. Comparación de temperatura calculada y experimental, estación invierno.

En la figura 6.12 el ajuste de las temperaturas tienen un comportamiento más parecido que en las mediciones tomadas en noviembre que se muestran en la figura 6.10, esto es producto de que la afectación de suelo por el flujo de calor del intercambiador de calor aire-tierra al suelo fue menor, al mantener el sistema en funcionamiento por menor tiempo.

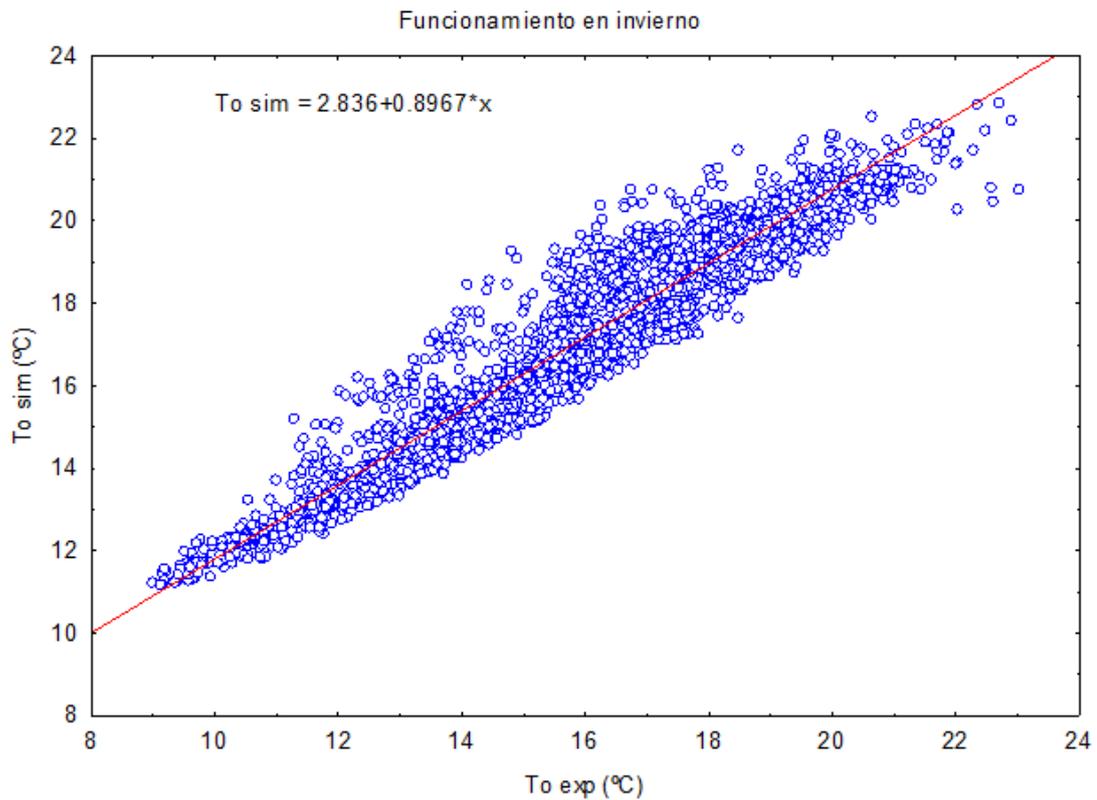


Figura 6.15. Curva de regresión ajustada para la estación de invierno.

Como se puede mostrar en la figura 6.15 se puede notar que el comportamiento del funcionamiento se ajusta a una recta, al igual que el caso anterior en la figura 6.11, lo que nos indica que la diferencia entre la temperatura experimental y la calculada con el simulador es mínimas, el ajuste entre las temperaturas es lineal con pendiente cercana a 1 y ordenada con valor de 2.8, lo cual indica una subestimación de la temperatura de salida. El coeficiente de determinación es de $R^2 = 0.984$, muy cercano a 1.

Con este análisis podemos ver que el simulador funciona adecuadamente para el diseño de intercambiadores de calor, aunque la subestimación de las temperaturas se puede deber a las simplificaciones que tiene el sistema, como el tomar como constante la temperatura de la pared del tubo, lo cual se puede modificar en un trabajo futuro.

Los datos experimentales tomados para la validación del simulador DEAHE dan como resultado un valor de COP para calentamiento entre los 3 y 4, mientras que para enfriamiento se encuentra entre los 6 - 6.5, contrastado con los valores normales una

bomba de calor de alta eficiencia en calentamiento los resultados son similares mientras que para enfriamiento el diseño propuesto tiene un COP mayor.

Dando resultados demostrados que los intercambiadores de calor aire-tierra son una opción viable para la climatización de espacios conectados directamente donde no se tengan climas extremos o como un sistema auxiliar a las bombas de calor para reducir su consumo energético.

CAPÍTULO VII CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

El objetivo central de la tesis fue validar el simulador DEAHÉ con datos experimentales, que se logró con mediciones tomadas durante la estación de invierno y verano en diferentes años, analizando las efectividades del sistema y los datos de temperatura de salida que muestra el simulador y los calculados, por lo que se puede concluir que para Ciudad de México el simulador funciona razonablemente bien, aunque hay que tomar en cuenta que se pueden tener subestimaciones de temperatura. Es necesario realizar más mediciones en diversos lugares para tener una aplicación más amplia de este simulador.

Las efectividades calculadas con los datos experimentales dan resultados de 74.5% con una desviación estándar del 37.7% y 67.2% con una desviación estándar del 29.7%, para calentamiento y enfriamiento respectivamente para un tubo de 9.6 m de longitud, mientras que el intercambiador de calor calculó una efectividad de 60% con lo que se puede concluir que el simulador funciona razonablemente bien y el objetivo del presente trabajo se cumplió.

El análisis de las temperaturas de salida del intercambiador de calor contra las calculadas con el simulador y el coeficiente de determinación dan como resultado que el acercamiento entre lo que brinda el simulador y los datos experimentales muestran una diferencia mínima.

Con la investigación y la validación realizada se concluye que el simulador DEAHÉ cumple con un acercamiento satisfactorio para la aplicación de los intercambiadores de calor aire-tierra como un sistema de climatización.

7.1 Trabajos futuros

Para futuras investigaciones se propone la mejora del simulador DEAHÉ contemplando las afectaciones térmicas del subsuelo con el intercambiador de calor aire-tierra en

funcionamiento, los tiempos de recuperación del suelo, agregar diferentes configuraciones de diseño del intercambiador de calor aire-tierra y analizar probables mejoras de efectividades con otros diseños.

Se recomienda estudiar el funcionamiento del intercambiador de calor para diferentes zonas de la república mexicana, de preferencia con climas extremos para probar el funcionamiento del diseño y analizar si pudiera existir condensación en climas con mucha humedad.

BIBLIOGRAFÍA

1. **Agency, International Energy 2013.** *Energy Efficiency Market Report*. Paris : OECD/IEA,
2. **Instituto Tecnológico de Canarias, 2008.** *Energías Renovables y Eficiencia Energética*. Canarias : s.n., Edición 1.
3. **N., Bahadori M. 1978.** *Passive Cooling Systems in Iranian Architecture*. s.l. : Scientific American.
4. **S. Wiryadinata, M. Modera, B. Jenkins and K. Kornblut 2016.** *Technical and economic feasibility of unitary, horizontal ground-loop geothermal heat pumps for space conditioning selected California climate zones*. 164-172, s.l. : Energy and buildings, Vol. 119.
5. **Phetteplace, G. 2007.** *Geothermal heat pumps*. 32-38, s.l. : American Society of Civil Engineers, Vol. 33.
6. **T. Singh Bisoniya, Anil Kumar, Prashant Baredar 2013.** *Experimental and analytical studies of earth-air heat exchanger (EAHE)*. 238-246, India : Elsevier, Vol. 19.
7. **Georgios Florides, Soteris Kalogirou 2007.** *Ground Heat Exchangers- A review of systems, models and applications*. ScienceDirect, págs. 2461-2478.
8. **Breesch H., Bossaer A. y Janssens A. 2005.** *Passive Cooling in a Low-Energy Office Building*. *Solar Energy*. Vol. 79, 682-696.
9. **Demir, Nurullah Kayaci y Hakan 2017.** *Long Time Performance Analysis of Ground Source Heat Pumps for Space Heating and Cooling Applications Based on Thermo-economic Optimization Criteria*. 121-139, Turkey : Elsevier, Vol. 163.
10. **Wenxin Li, Xiangdong Li, Yong Wang, Jiyuan Tu. 2018.** *An Integrated Predictive Model of the Long-Term Performance of Ground Source Heat Pump (GSHP) Systems*. 309-318, Energy and Buildings : Elsevier, Vol. 159.
11. **M. De Paepe, A. Janssens 2003.** *Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers*. Elsevier, págs. 389-397.
12. **Scott, N. R., Parson, R. A. and Koehler, T. A. 1965.** *Analysis and Performance of an Earth-Air Heat Exchanger*. 840, s.l. : ASAE, Vol. 65.
13. **S., Godwami D. Y. y Dhaliwal A. 1985.** *Heat Transfer Analysis in Environmental Control Using and Underground Air Tunnel*. 141-145, s.l. : JSEE, Vol. 107.
14. **Lleslamlou, D.Y. Goswami y S. 1990.** *Performance Analysis of a Closed-Loop Climate Control System Using Underground Air-Tunnel*. 76-81, Greensboro : Journal of Solas Energy Engineering, Vol. 112.
15. **B., Penrod E. 1950.** *Measurement of the Thermal Diffusivity of a Soil by the Use of a Heat Pump*. 425, s.l. : Journal of Applied Physics, Vol. 21.
16. **Hanks R. J., Austin D. D. and Ondrechen W. T. 1971** *Soil Temperature Estimario by a Numerical Method*. 5, s.l. : Soil Science Society of America, Vol. 35.
17. **N. K. Bansal, M. S. Sodha and S. S. Bharadwaj 1983.** *Performance of Earth Air Tunnels*. 333-345, s.l. : Energy Research, Vol. 7.
18. **M., Krarti 1995.** *Analytical Model to Predict Annual Soil Surface Temperature Variation*. 91, s.l. : Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 117.
19. **G., Mihalakakou 2002.** *On Estimating Soil Surface Temperature Profiles*. 251-259, s.l. : Energy and Buildings, Vol. 34.

20. **Masoomeh Delbari, Salman Sharifazari y Ehsan Mohammadi 2018.** Modeling Daily Soil Temperature Over Diverse Climate Conditions in Iran-a Comparison of Multiple Linear Regression and Support Vector Regression Techniques. *Theoretical and Applied Climatology*.
21. **Sodha M. S., Mahajan Usha y Sawhney R.L. 1994.** Thermal Performance of a Parallel Earth Air-pipes System. *International Journal of Energy Research*. Vol. 18, 437-447.
22. **Usha, Sawhney R.L. y Mahajan 1994.** Heating and Cooling Potential of an Underground Air-pipe System. *International Journal of Energy Research* . Vol. 18, 509-524.
23. **Cucumo M., Cucumo S., Montoro L. y Vulcano A 2008.** A One-dimensional Transient Analytical Model for Earth-to-airheat Exchangers, Taking Into Account Condensation Phenomenaand Thermal Perturbation From the Upper Free Surfacesas Well as Around the Buried Pipes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. Vol. 51, 506-516.
24. **Ozgener, Leyla. 2011.** *A review on the experimental and analytical analysis of earth to air heat exchanger (EAHE) systems in Turkey*. Elsevier, págs. 4483-4490.
25. **Trilok Singh Bisoniya, Anil Kumar y Prashant Baredar 2014.** Study on Calculation Models of Earth-Air.
26. **Demir, Nurullah Kayaci y Hakan 2018.** Numerical Modelling of Trasiient Soil Temperature Distribution for Horizontal Ground Heat Exchanger of Ground Source Heat Pump. *Geothermics*. Vol. 73, 33-47.
27. **S., Mavroyanopoulos G.N. y Kyritsis 1986.** The Performance of a Greenhouse Heated by an Earth-Air Heat Exchanger. *Agricultural and Forest Meteorology*. Vol. 36, 263-268.
28. **Ghosal M. K., Tiwari G. N. y Srivastava N.S. L. 2004.** Thermal Modeling of a Greenhouse With an Integrated Earth to Air Heat Exchanger> an experimental validation. *Energy and Buildings*. Vol. 36, 219-227.
29. **Al-Ajmi F., Loveday D. L. y Hanby V. I. 2006.** The Cooling Potential of Earth-Air Heat Exchangers for Domestic Buildings in a Desert Climate. *Buildings and Environment*. Vol. 41, 235-244.
30. **Wong-Loya J. A., Andaverde J y Rivera Blanco Carlos 2011.** *Air Conditioning in a Station of Subway New Line in Mexico City Using Geothermal Heat Exchangers*. Perugia, Italy : Third International Conference on Applied Energy, 3223-3232.
31. **Huai Li, Wei Xu, Zhen Yu, Jianlin Wu, Zhenyu Yu 2018.** Discussion of a Combined Solar Thermal and Ground Source Heat Pump System Operation Strategy for Office Heating. *Ebergy and Buildings*. Vol. 162, 42-53.
32. **D., Tzaferis A. y Lipparakis 1992.** Analysis of the Scuracy and Sensitivity of Eight Models to Predict the Performance of Earth-to-Air Heat Exchangers. *Energy and Buildings*. Vol. 18, 35-43.
33. **Mihalakakou G., Santamouris M. y Asimakopoulos D. 1994.** Modelling the Thermal Performance of Earth-to-Air Heat Exchangers. *Solar Energy*. Vol. 53, 301-305.
34. **B., Hollmuller P. y Lachal 2001.** Cooling and Preheating With Buried Pipe Systems, Monitoring, Simulation and Economic Aspects. *Energy and Buildings*. Vol. 33, 509-518.
35. **V., Badescu 2007.** Simple and Accurate Model for the Ground Heat Exchanger of a Passive House. *Renewable Energy*. Vol. 32, 845-855.

36. **Wong Loya J. A., Andaverde A. y Alberto J. 2010.** *Simulation of Subsoil Conditions for Ground Heat Exchanger for Application of Heating and Cooling Building.* s.l. : International Conference on Applied Energy.
37. **Muhammad M. A. B., Nasir H., Muhammad H. B., Ahmer R. H., Kanwar N. A. y Sarfaraz K. 2012.** CFD Applications in Various Heat Exchangers Design, A Review. *Applied Thermal Engineering.* Vol. 32, 1-12.
38. **G., Guohui 2017.** Dynamic Thermal Simulation of Horizontal Ground Heat Exchangers for Renewable Heating and Ventilation of Buildings. *Renewable Energy* . Vol. 103, 361-371.
39. **Aguilar, Hildegardo Córdova 2002.** *Naturaleza y sociedad: una introducción a la geografía.* Perú : CIGA,
40. **II, William B. Meyer y B. L. Turner 1994.** *Changes in Land Use and Land Cover.* s.l. : Cambridge.
41. **Vicente Torres Luna, y otros. 2016.** *Proyecto 13 del CeMIE. Geo: Bombas de Calor Geotérmico para acondicionamiento de espacios habitacionales y comerciales - Primeros resultados.* Morelia : Memorias del XXIII Congreso Anual, Asociación Geotérmica Mexicana.
42. **Soil Management Support Services 1986.** *Designations for Master Horizons and Layers in Soils.* United States : Agency for International Development.
43. **Panayiotis D. Pouloupatis, Savvas A. Tassou, Paul Christodoulides, Georgios A. Florides 2016.** *Parametric analysis of the factors affecting the efficiency of ground heat exchangers and design application aspects in Cyprus.* Cyprus : Renewable Energy, Vol. XXX.
44. **Frank P. Incropera, David P. DeWitt 1999.** *Fundamentos de transferencia de calor.* s.l. : Pearson Educación, 4ta edición.
45. **Ghuman B.S. y Lal, R. 1985.** *Thermal Conductivity, Thermal Diffusivity, and Thermal Capacity of Some Nigerian Soils.* s.l. : Soil Science.
46. **Nidal H., Abu-Hamdeh y Randall C. Reeder 2000.** *Soil Thermal Conductivity: Effects of Density, Moisture, Salt Concentration and Organic Matter.* 1285-1290, s.l. : Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 64.
47. **Fröb, Katrin 2011..** Measuring and Modeling of Soil Thermal Properties and Ground Heat Flux at two Different Sites at Lena Delta, Siberia. *Diploma Thesis.* s.l. : Universität Leipzig.
48. **Konrad, Jean Côté y Jean-Marie 2005.** *A Generalized Thermal Conductivity Model for Soils and Construction Materials.* 443-458, Québec : Geotech, Vol. 42.
49. **Campbell G. S., Jungbauer J. D. JR, Bidlake W. R. y Hungerford R. D. 1994.** *Predicting the Effect of Temperature on Soil Thermal Conductivity.* 307-313, s.l. : Soil Science, Vol. 158.
50. **Serra, Miquel Estruch 2002.** *Topografía para minería subterránea.* Barcelona : UPC.
51. **Georgios Florides, Soteris Kalogirou 2004.** *Annual ground temperature measurements at various depths.* Cyprus : Gender:males.
52. **US Department of Agriculture, 2005.** UIDAHO. [En línea] 11 de 2005. [Citado el: 10 de 06 de 2018.] <http://www.uidaho.edu/cals/soil-orders>.
53. **United Nations Educational 1975.** *Soil map of the world.* Paris : Unesco, Vol III.
54. **P. Cosenza, R. Guerin y A. Tabbagh 2008.** *Relationship Between Thermal Conductivity and Water Content of Soils Numerical Modelling.* 581-587, Paris : European Journal of Soil Science, Vol. 54.

55. **Johnson, William C. Whitman y William M. 2000.** *Tecnología de la refrigeración y aire acondicionado*. Madrid : Paraninfo, Vol. 4.
56. **Jaramillo, O. A. 2007.** [www.cie.unam.mx. www.cie.unam.mx.](http://www.cie.unam.mx/~ojs/pub/HeatExchanger/Intercambiadores.pdf) [En línea] 20 de Noviembre de 2017.
57. **Incropera, Frank P. 1999.** *Fundamentos de transferencia de calor*. s.l. : Pearson Educación,
58. **Bose JE, Smith MD, Spitler JD. 2002.** *Advances in ground source heat pump systems an international overview*. Beijing : s.n., Seventh international energy agency heat pump conference.
59. **Yang, W., y otros. 2009.** *A two-region simulation model of vertical U-tube ground heat exchanger and its experimental verification*. Appl. Energy, pág. 86.
60. **Jorge alejandro Wong-Loya, Jorge Andaverde, Carlos Rivera Blanco 2011.** *Air conditioning in a station of subway new line in México City using geothermal heat exchangers*. Perugia, Italy : s.n., Third International Conference on Applied Energy. págs. 3223-3232.
61. **W., Versteeg H. K. and Malalasekera 1995.** *An Introduction to Computational Fluid Dynamics the Finite Volume Method*. s.l. : Pearson Prentice Hall.
62. **J.C., Carslaw H. S. and Jaeger 1959.** *Conduction of Heat in Solids*. s.l. : Oxford Science Publishing, 2 edn.
63. **Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen 2010.** *VDI Heat Atlas*. Alemania : Springer, 2da Edición.
64. **Annex, IEA 1999.** *Early Design Guidance for Low Energy Cooling Technologies, Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme*. s.l. : International Energy Agency, Report 2.
65. **Agilent Technologies 2003.** *User's Guide*. s.l. : Agilent Technologies, 3 edición.
66. **W., Marquardt D 1963.** *An Algorithm for Least-squares Stimulation of Nonlinear Parameters*. 431-441, s.l. : J. Soc. Indust. Appl. Math., Vol. 11.
67. **Decagon Devices, Inc. 2016.** *KD2 pro Thermal Properties Analyzer, Operator's Manual*. s.l. : Decagon Devices, Inc.,
68. **WindSonic 2015.** *User Manual*. Reino Unido : Gill Instruments Limited.
69. **Rolle, Kurt C 2006.** *Termodinámica*. s.l. : Pearson.

