



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.

Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR
TIERRA-AIRE EN EL KARST DE YUCATÁN: UN
ESTUDIO DE VIABILIDAD.

Tesis que presenta

MAYRA NOEMI ORDÓÑEZ OCHOA

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida, Yucatán. Febrero 2019

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT por la beca número 608823 sin la cual este proyecto no se hubiera podido realizar.

A los proyectos:

- CONACYT Cátedras “3133, Desarrollo y Aprovechamiento de Energías Renovables Limpias”
- CONACYT-SENER, “Consolidación del Laboratorio de Energía Renovable del Sureste (LENERSE)”, subproyectos SP2 y SP4.

por los recursos otorgados.

A mi comité:

A mi director de tesis el Dr. Luis David Patiño López.

A mi codirector el Dr. José Gonzalo Carrillo.

A la Dra. Norma Alejandra Rodríguez Muñoz.

A la Dra. Rosa María Leal Bautista.

Y a mis revisores:

El Dr. Gilberto Acosta González.

Y el Dr. José Antonio Castillo Torres.

Por sus revisiones y comentarios hacia este trabajo.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS.....	iv
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1.	3
ANTECEDENTES.....	3
1.1. La Península de Yucatán: Energía en Números.	3
1.1.1. Consumo de energía y confort térmico.....	4
1.1.2. Encuesta de consumo eléctrico por hogar.....	8
1.1.2.1. Análisis de los resultados de la encuesta.....	8
1.1.2.2. Observaciones.....	14
1.2. El Karst y sus Propiedades Térmicas.....	14
1.3. Intercambiadores de Calor Tierra- Aire (EAHE)	16
1.3.1. Discusión sobre el estado del arte en EAHE	30
HIPÓTESIS	33
OBJETIVOS	34
CAPÍTULO 2.	35
METODOLOGÍA.	35
2.1. Evaluación de los Recursos Térmicos.	36
2.1.1. Modelo de transferencia de calor transitoria en el subsuelo kárstico.	36
2.1.1.1. Método de los cuádrupolos térmicos.....	36
2.1.1.2. Resultados de la Simulación.....	42
2.1.2. Medición anual del gradiente térmico subterráneo	47
2.1.2.1. Calibración de los sensores y ajuste de los registradores de datos.....	53

2.1.2.2. Análisis de datos experimentales.....	54
2.1.2.3. Observaciones.....	58
2.1.3. Obtención de propiedades termofísicas del subsuelo.....	59
2.1.3.1. Análisis de coeficientes de sensibilidad.	60
2.1.3.2. Método inverso.	65
2.1.3.3. Observaciones.....	72
2.1.4. Simulación numérica.	73
2.1.4.1. Método de elemento finito.....	73
2.1.4.2. Método de volumen finito.....	74
2.1.4.3. Ansys-Fluent para simulación numérica.....	76
2.1.4.4. Geometría.....	76
2.1.4.5. Mallado.....	77
2.1.4.6. Ecuaciones gobernantes.....	79
2.1.4.7. Modelo de turbulencia.....	80
2.1.4.8. Condiciones iniciales y de frontera.....	84
CAPÍTULO 3.....	87
RESULTADOS.....	87
3.1. Validación de la simulación.....	92
3.2. Discusión.....	94
CONCLUSIONES.....	96
PERSPECTIVAS.....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	103
ANEXO I.....	109
ANEXO II.....	111
ANEXO III.....	112
ANEXO IV.....	114

LISTA DE TABLAS

CAPITULO 1.

Tabla 1. 1. Características térmicas de caliza y agua [18].	15
Tabla 1. 2. Temperatura promedio para las tres ciudades [22].	18
Tabla 1. 3. Temperatura de salida del intercambiador con material aislante [23].	20
Tabla 1. 4. Investigaciones sobre intercambiadores de calor.	30

CAPITULO 2.

Tabla 2. 1. Propiedades termofísicas del subsuelo [18] [42].	42
Tabla 2. 2. Parámetros de entrada de la simulación.	43
Tabla 2. 3. Profundidad de penetración térmica en el subsuelo.	44
Tabla 2. 4. Mediciones obtenidas del pozo biblioteca PCTY.	48
Tabla 2. 5. Mediciones obtenidas en cenote PCTY.	49
Tabla 2. 6. Parámetros de interés.	61
Tabla 2. 7. Rangos de los parámetros de interés.	66
Tabla 2. 8. Parámetros termofísicos obtenidos.	67
Tabla 2. 9. Dimensiones del intercambiador de calor.	77
Tabla 2. 10. Características de la malla.	78
Tabla 2. 11. Propiedades de los materiales.	84
Tabla 2. 12. Características del fluido.	85
Tabla 2. 13. Límites de convergencia	86

CAPITULO 3.

Tabla 3. 1. Resultados de la simulación. Geometría D 10.	87
Tabla 3. 2. Diferencia entre la temperatura del subsuelo y la temperatura de salida del EAHE.	92

LISTA DE FIGURAS

CAPITULO 1.

Figura 1. 1. Porcentaje de gases de efecto invernadero en Yucatán [2].....	3
Figura 1. 2. Temperatura máxima y consumo eléctrico semanal (Dic 2014- Sep 2016). Elaboración propia con datos de CENACE [10] y de la estación meteorológica CINVESTAV-PCTY [11].....	5
Figura 1. 3. Correlación entre el consumo energético y la temperatura (Dic 2014-Sep 2016). Elaboración propia con datos de CENACE [5] y de la estación meteorológica CINVESTAV-PCTY [11].....	5
Figura 1. 4. Consumo eléctrico de aparatos electrodomésticos [13].....	6
Figura 1. 5. Relación entre el consumo energético y la temperatura del CICY, Mérida (2015-2016). Elaboración propia con datos CICY y CINVESTAV-PCTY [11].....	7
Figura 1. 6. Costo del consumo de energía del CICY, Mérida (2015-2016). Elaboración propia con datos de CFE.	7
Figura 1. 7. Equipos de acondicionamiento de aire de los encuestados.....	9
Figura 1. 8. Temperatura objetivo de trabajo de los sistemas A.A. durante la primavera- verano y el otoño-invierno.....	10
Figura 1. 9. Tiempo de uso de los sistemas A.A. durante la primavera y verano.....	10
Figura 1. 10. Tiempo de uso de los sistemas A.A durante otoño e invierno.	11
Figura 1. 11. Temperatura de ajuste de los sistemas A.A en espacio individual.....	11
Figura 1. 12. Grafica de sensación térmica.	12
Figura 1. 13. Gráfica de temperatura promedio y consumo eléctrico mensual.	12
Figura 1. 14. Temperatura de uso del A.A. durante primavera y verano.....	13
Figura 1. 15. Temperatura de uso del A.A durante otoño e invierno.....	13
Figura 1. 16. Formaciones kársticas [17].....	15
Figura 1. 17. Funcionamiento de un intercambiador de calor aire a tierra.	16
Figura 1. 18. Intercambiador de calor en el subsuelo, aplicado a 3 ciudades de México [23].	20
Figura 1. 19. Vista del intercambiador de calor tierra-aire ensamblado con aislamiento térmico [25].	22
Figura 1. 20. Funcionamiento de un intercambiador de calor de un invernadero [28].....	24

Figura 1. 21. Proceso de instalación de un intercambiador de calor helicoidal, sin excavación [36].	27
Figura 1. 22. Variación de la temperatura del aire en el ducto metálico de un intercambiador de calor [28].	28

CAPITULO 2.

Figura 2. 1. Pasos de la metodología.	35
Figura 2. 2. Transferencia de calor en el subsuelo.	37
Figura 2. 3. Representación de red de impedancias.	39
Figura 2. 4. Datos de temperatura ambiente y radiación (datos normalizados).	44
Figura 2. 5. Cálculo de la temperatura 3 a 9 de febrero 2018.	45
Figura 2. 6. Datos de temperatura ambiente y radiación (datos normalizados).	46
Figura 2. 7. Cálculo de la temperatura para 17 días del mes de marzo.	46
Figura 2. 8. Ubicación de los pozos prueba y herramientas de medición.	48
Figura 2. 9. Cueva del jardín botánico Roger Orellana, CICY-Mérida.	50
Figura 2. 10. Sitio de medición. UER CICY-PCTY.	52
Figura 2. 11. Ubicación y profundidad de las perforaciones.	52
Figura 2. 12. Aparatos de medición.	53
Figura 2. 13. Calibración y ajuste de data loggers.	54
Figura 2. 14. Temperaturas subsuelo y ambiente 3 a 6 de octubre 2017.	55
Figura 2. 15. Temperaturas subsuelo y ambiente del 8 al 12 de noviembre 2017.	55
Figura 2. 16. Temperaturas subsuelo y ambiente del 3 al 8 de febrero 2018.	56
Figura 2. 17. Temperaturas subsuelo y ambiente 17 a 20 marzo del 2018.	57
Figura 2. 18. Temperaturas subsuelo y ambiente 5 a 7 de junio del 2018.	57
Figura 2. 19. Coeficientes de sensibilidad en la superficie.	62
Figura 2. 20. Coeficientes de sensibilidad a 0.35 cm.	62
Figura 2. 21. Coeficientes de sensibilidad a 0.60 cm.	63
Figura 2. 22. Coeficientes de sensibilidad a 1.1 m.	63
Figura 2. 23. Coeficientes de sensibilidad a 1.9 m.	64
Figura 2. 24. Coeficientes de sensibilidad a 2.1 m.	64
Figura 2. 25. Temperatura real vs calculada 3-9 febrero 2018.	68
Figura 2. 26. Datos meteorológicos 3-9 febrero 2018.	68

Figura 2. 27. Temperatura real vs calculada 22-28 mayo 2018.	70
Figura 2. 28. Datos meteorológicos 22-28 mayo 2018.	70
Figura 2. 29. Temperatura real vs temperatura calculada 4-10 julio 2018.	71
Figura 2. 30. Datos meteorológicos 4-10 julio 2018.	72
Figura 2. 31. Nodo y elemento [49].	74
Figura 2. 32. A) centrado en la celda. B) centrado en los vértices [51].	75
Figura 2. 33. Geometría del sistema realizada en DesingModeler.	77
Figura 2. 34. Mallado tetraédrico, realizado en MeshTM.	78
Figura 2. 35. Zonas de Frontera de la geometría.	84
Figura 2. 36. a) Paredes isotérmicas b) Pared de salida adiabática.	86

CAPÍTULO 3.

Figura 3. 1. Temperaturas de salida (paredes isotérmicas) vs gradiente del subsuelo durante el otoño e invierno. D 10.	88
Figura 3. 2. Temperaturas de salida vs gradiente del subsuelo durante primavera y verano. D 10.	89
Figura 3. 3. a) Distribución de temperaturas en la tubería de entrada. b) Distribución de temperaturas en la tubería de salida.	90
Figura 3. 4. a) Contornos de temperatura en la entrada del intercambiador. b) Contornos de temperatura en la salida del intercambiador.	90
Figura 3. 5. Comportamiento térmico del aire dentro del intercambiador de calor D 10.	91
Figura 3. 6. Gráfica de temperatura promedio en la salida del intercambiador.	91
Figura 3. 7. Residuales escalonados.	92

RESUMEN

El relieve kárstico de Yucatán y el manto acuífero somero constituyen un almacén térmico de gran capacidad calorífica, cuyo potencial para remover o proporcionar calor merece mayor atención. Existen varias técnicas que permiten el aprovechamiento del potencial térmico del subsuelo, entre las más sencillas se encuentran los intercambiadores de calor aire a tierra (earth-to-air heat exchangers, EAHE). Los cuales son sistemas donde el subsuelo absorbe el calor excedente del aire durante el verano, o bien, cede calor durante el invierno, a través de su uso la vivienda puede lograr una temperatura confortable, reducir el uso de los sistemas de aire acondicionado (A.A), y en consecuencia el consumo de energía eléctrica.

En este proyecto se analizaron las características térmicas del subsuelo, a través de mediciones de temperatura a distintas profundidades en un sitio del PCTY (Parque Científico y Tecnológico de Yucatán). Se propuso un modelo analítico de la transferencia de calor en el subsuelo a partir del método de los cuádrupolos térmicos, a fin de caracterizar las propiedades térmicas in situ. Finalmente, ese set de parámetros termofísicos (absorbancia, conductividad y coeficiente de pérdidas térmicas por convección-radiación) en conjunto con datos climáticos locales, se introdujeron a un modelo numérico de un intercambiador EAHE, desarrollado mediante dinámica de fluidos computacional (CFD).

Los resultados descartan la viabilidad de la tecnología EAHE tradicional, pero permiten contemplar otras soluciones adaptadas a las condiciones locales, entre las que se encuentra el almacenamiento estacional del “frío invernal” para su uso posterior.

ABSTRACT

The Yucatan karst relief and the shallow aquifer are a thermal reservoir with a large heat capacity, whose potential to remove or provide heat deserves greater attention.

Currently, there are several techniques that allow the use of the thermal potential of the subsoil one of the simplest are the heat exchangers air to ground (EAHE), that are systems where the rocks absorb excess heat from the air during the summer, or they give off heat during the winter. In this way the house can reach a comfortable temperature, reducing the use of air conditioning systems, and therefore the consumption of electrical energy.

In this project the thermal characteristics of the subsoil were analyzed through temperature measurements at different depths in a PCTY site, also an analytical model of subsoil heat transfer from the thermal quadrupole method was proposed, after that some thermophysical properties of interest for the thermal evaluation of the subsoil were calculated and finally the analysis of the cooling performance of an EAHE was developed through computational fluid dynamics (CFD).

The results rule out the feasibility of traditional EAHE technology, but other solutions adapted to local conditions can be considered, including the storage of "winter cold" energy for later use.

INTRODUCCIÓN.

La generación eléctrica en Yucatán está basada en su mayoría por plantas de ciclo combinado que funcionan mediante la quema de combustibles fósiles [1], lo que explica parcialmente el auge de proyectos de generación renovable que se vive actualmente en la península.

En Yucatán, la reducción del consumo eléctrico y el impacto asociado implica dos esfuerzos simultáneos: implementar prácticas de eficiencia energética y buscar alternativas a la actividad de mayor consumo eléctrico: el uso de aires acondicionados basados en compresión-expansión de gases refrigerantes [1].

Disminuir el consumo de energía eléctrica derivado del uso del A.A convencional no es fácil especialmente en un clima cálido semi-húmedo como el que caracteriza al estado de Yucatán donde la temperatura durante la primavera llega a superar los 40.0 °C. Sin embargo, algunas investigaciones sostienen que es posible disminuir el consumo de energía del A.A al utilizar un sistema de intercambiador de calor de aire a tierra. En este trabajo se analiza si las condiciones del karst de Yucatán son apropiadas para el uso de esta tecnología, conocida como EAHE por sus siglas en inglés (Earth-Air Heat Exchangers). La organización del documento se presenta de la siguiente manera:

En la sección de antecedentes, se describe el contexto del consumo eléctrico de Yucatán el cual está fuertemente relacionado con el aumento de temperaturas durante el año. Se presentan algunos de los trabajos sobre EAHE de la literatura, haciendo hincapié en los realizados en México, además se realizó una pequeña encuesta sobre el consumo eléctrico relacionado con el A.A al personal de la unidad de energía renovable (UER) del Centro de investigación científica y tecnológica de Yucatán (CICY) para conocer los hábitos de consumo a nivel de los hogares.

En el capítulo 2 se describe la metodología empleada que comprende:

- El desarrollo de un modelo matemático de transferencia de calor unidimensional que toma en cuenta distintas profundidades del subsuelo con el objetivo de conocer la distribución de la temperatura.
- La validación del modelo matemático a partir de medidas experimentales del gradiente térmico del subsuelo las cuales fueron obtenidas mediante termistores

para conocer la variación estacional de temperatura.

- La estimación de algunos parámetros termofísicos reales del medio a través de la aplicación de un ajuste por mínimos cuadrados y,
- La elaboración de una simulación CFD de un intercambiador de calor en el subsuelo utilizado para enfriamiento pasivo a través del software ANSYS-Fluent.

En el capítulo 3 se resumen los resultados sobre las simulaciones realizadas y las temperaturas del aire alcanzadas a la salida del EAHE.

Finalmente, en las conclusiones y perspectivas se deduce que el sistema no es suficiente para el enfriamiento pasivo de viviendas, sin embargo, se presentan alternativas para aprovechar el EAHE.

CAPÍTULO 1.

ANTECEDENTES.

1.1. La Península de Yucatán: Energía en Números.

El estado de Yucatán genera 10,866,538 toneladas de gases de efecto invernadero [1], de los cuáles el sector de la energía produce más de la mitad de las emisiones, el 55.27% del total [2] (Figura 1. 1). De este porcentaje, la generación de electricidad contribuye en un 20.49% debido a que su producción proviene de plantas de ciclo combinado basadas en combustibles fósiles.

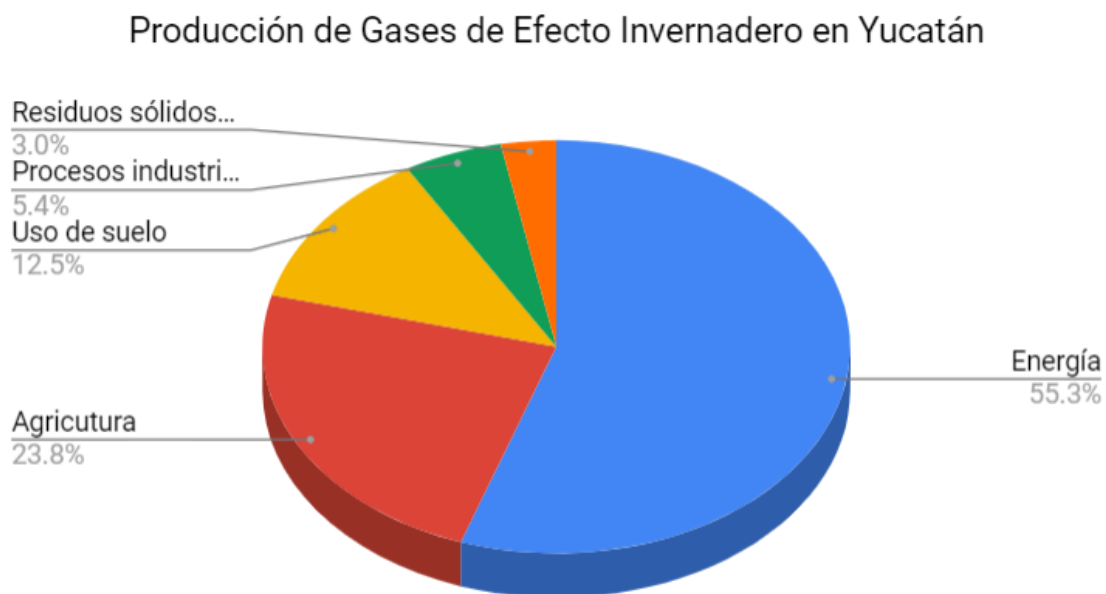


Figura 1. 1. Porcentaje de gases de efecto invernadero en Yucatán [2].

La mayor parte del consumo de energía se concentra en Mérida que acumula el 63% del consumo total del estado, destacando el sector industrial (48%) y el sector residencial (36%). El consumo anual de electricidad de la Ciudad de Mérida es de aproximadamente 1,953,315,000 kWh, correspondiente a un gasto de \$ 3,215,598,000 [3] y su consumo eléctrico per cápita supera a la Ciudad de México. Este alto consumo de energía tiene su origen en las condiciones climáticas de Yucatán.

1.1.1. Consumo de energía y confort térmico.

Mérida está catalogada con un clima cálido semi-húmedo [4]. Las altas temperaturas provocan el uso frecuente de sistemas de enfriamiento por compresión/expansión de vapor refrigerante (A.A) para proveer de condiciones de temperatura y humedad al interior de las viviendas que generen el confort térmico de los ocupantes, en consecuencia, existe un aumento importante en el consumo eléctrico en temporada de primavera y verano [5].

El confort térmico se ha definido como una condición mental que expresa satisfacción con el ambiente [6]. En consecuencia, es una sensación subjetiva ya que depende de la temperatura ambiente y el medio donde los individuos desarrollen sus actividades. Un estudio realizado por Gómez Azpeitia [7] concluye que las familias en Mérida, Yucatán que no cuentan con sistemas de A.A en sus viviendas sienten confort con temperaturas que oscilan entre los 27 a 35 °C durante la temporada más cálida del año, en otras palabras, la gente sin acceso a sistemas de A.A tolera temperaturas que superan los 30.0 °C. Por otro lado, un estudio desarrollado por Al-Ajmi [8] reporta que la mayoría de la gente siente confort en el interior de la vivienda a una temperatura entre los 22.0 y 27.0 °C en climas cálidos como el de Kuwait y que tales condiciones se logran mediante el uso del A.A.

La Ciudad de Mérida cuenta con la tarifa 1D para consumo doméstico, esta tarifa cuenta con subsidio federal. El subsidio es la diferencia entre el costo real de la energía eléctrica y el precio de venta, a través de este apoyo proporcionado por el gobierno federal el usuario realiza un pago menor por el servicio. Sin embargo, al pasar los 250 kWh, el subsidio deja de aplicar y la energía eléctrica tiene un costo aproximado de \$ 2.8 por kWh correspondiente a un consumo excedente, en consecuencia, las facturas de CFE pueden llegar a incrementar de cientos a miles de pesos [9].

La Figura 1. 2 muestra los datos de las temperaturas máximas y el consumo eléctrico semanal durante los años 2016-2017 en la Ciudad de Mérida. Se aprecia una relación entre el consumo eléctrico y la temperatura ya que ocurre un incremento en el uso de energía eléctrica durante la primavera, temporada con las temperaturas más altas de todo el año. Así mismo, se aprecia que el consumo eléctrico se ha incrementado en los últimos años con una diferencia del 5.6% entre el año 2015 y el 2016, dicho aumento podría estar relacionado con el incremento en el número de habitantes en la región, al incremento de demanda energética o a una combinación de ambos factores.

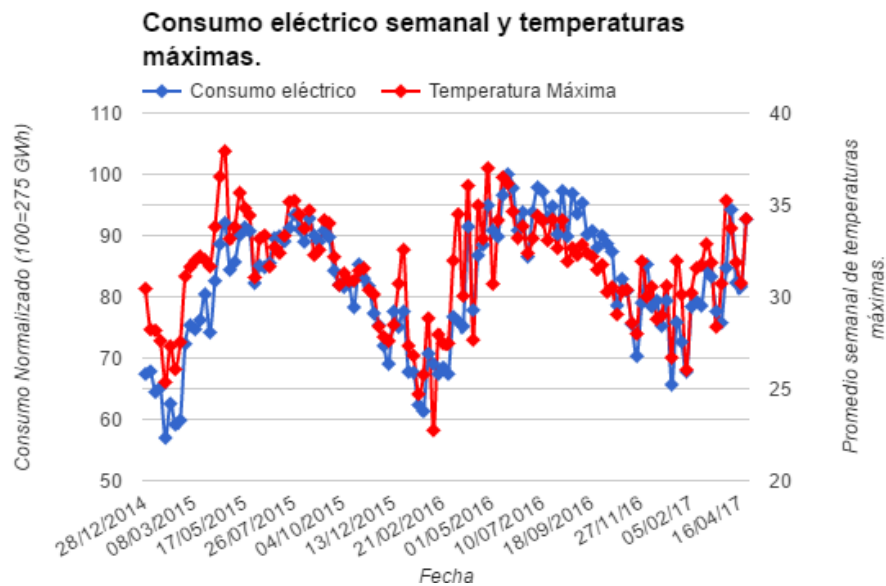


Figura 1. 2. Temperatura máxima y consumo eléctrico semanal (Dic 2014- Sep 2016).
Elaboración propia con datos de CENACE [10] y de la estación meteorológica CINVESTAV-PCTY [11]

La Figura 1. 3, ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. obtenida a partir de la Figura 1. 2, confirman una fuerte correlación de $R^2=0.708$ (valor de $p= 7.529E-34$) entre el consumo eléctrico y la temperatura, demostrando que el consumo eléctrico aumenta en función del aumento en la temperatura.

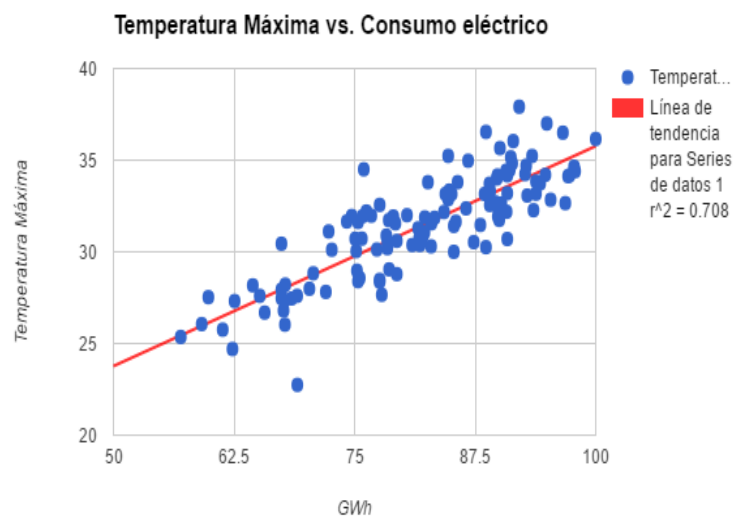


Figura 1. 3. Correlación entre el consumo energético y la temperatura (Dic 2014-Sep 2016). Elaboración propia con datos de CENACE [5] y de la estación meteorológica CINVESTAV-PCTY [11].

Una investigación realizada por la Universidad Tecnológica de Cancún encontró que de los 59 mil mega watts mensuales que consume la zona hotelera, el 70% corresponde a los equipos de A.A [12]. El mismo patrón de consumo de energía se reproduce a nivel residencial. La Figura 1. 17, muestra el consumo en watts de los aparatos electrodomésticos presentes en un hogar típico, en dónde destaca el A.A que consume más del 70 % de energía eléctrica [13], muy por encima del siguiente electrodoméstico, el refrigerador. Un sistema de A.A. mini split de 1 tonelada representa un gran gasto de energía eléctrica ya que consume aproximadamente 560 kWh por bimestre.

Consumo bimestral eléctrico de aparatos domesticos kWh

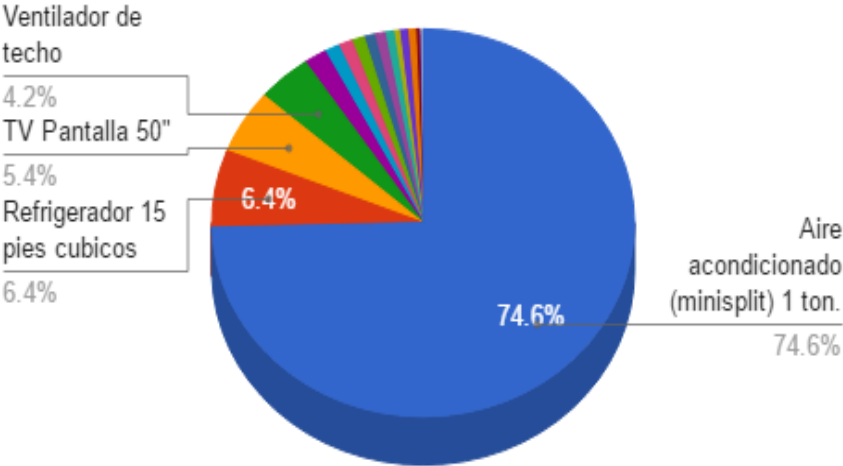


Figura 1. 4. Consumo eléctrico de aparatos electrodomésticos [13].

La Figura 1. 5, muestra la relación del consumo eléctrico del Centro de Investigación Científica de Yucatán y las temperaturas promedio mensuales, donde es posible apreciar que el consumo de electricidad aumentó del año 2015 al 2016 a pesar de que no hubo aumentos considerables en la temperatura de un año para otro. Obsérvese que la correlación del consumo de energía contra las temperaturas máximas se reproduce también a escala del CICY de forma similar a la tendencia general del estado de Yucatán mostrada en la Figura 1. 2.

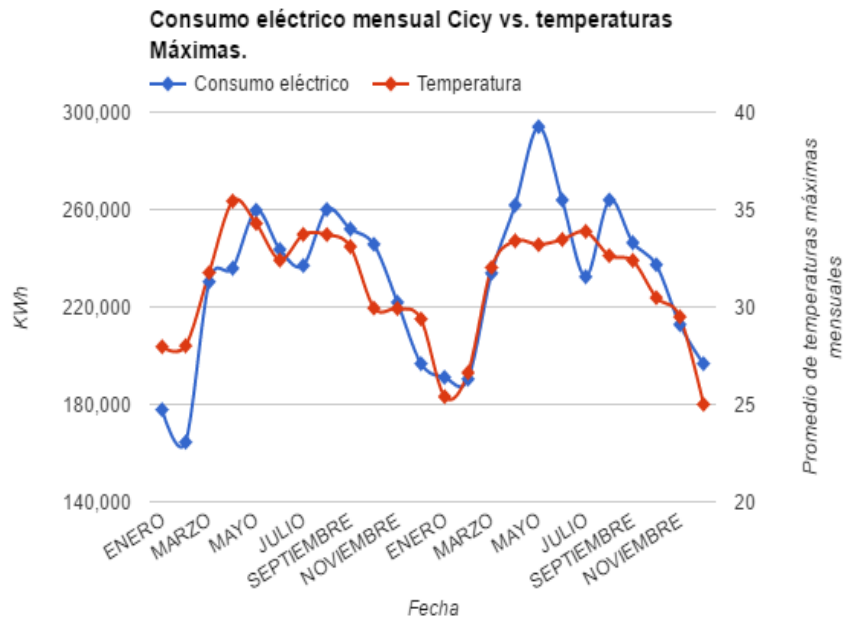


Figura 1. 5. Relación entre el consumo energético y la temperatura del CICY, Mérida (2015-2016). Elaboración propia con datos CICY y CINVESTAV-PCTY [11]

La Figura 1. 6 indica el costo mensual del consumo eléctrico del Centro de Investigación científica de Yucatán (campus Mérida) durante los años 2015 y 2016, donde las facturas por el servicio sobrepasan los 250,000 pesos mensuales.

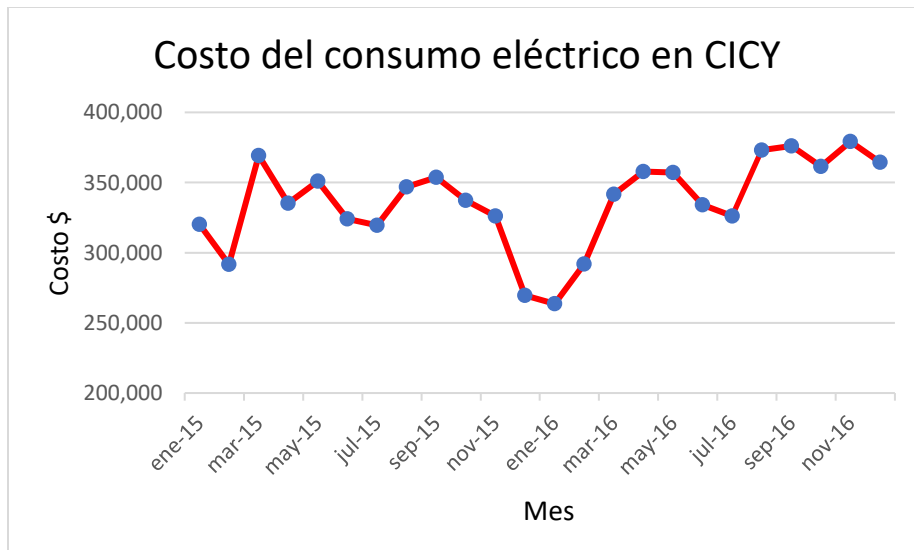


Figura 1. 6. Costo del consumo de energía del CICY, Mérida (2015-2016). Elaboración propia con datos de CFE.

1.1.2. Encuesta de consumo eléctrico por hogar.

Los comportamientos y tendencias similares de la temperatura y el consumo de energía medidas en el CICY pueden tomarse como una primera aproximación del comportamiento que se tiene en una casa habitación en la Ciudad de Mérida. Para tener una visión de lo que ocurre a nivel de los hogares se recolectaron datos sobre los hábitos de consumo de energía eléctrica de una muestra a través de un cuestionario realizado al personal y estudiantes de la UER del PCTY, enfocado en conocer la forma de uso de los A.A para lograr el confort térmico. El mecanismo de aplicación fue a través de un formulario web, en el que el encuestado pudo compartir su historial de facturación mediante una foto de su recibo de CFE. Luego, se desarrolló el análisis de los datos para establecer la correlación consumo, número de aires acondicionados, tipo de tecnología, número de habitantes, etc. Este ejercicio sirvió también para sensibilizar al personal de nuestro centro a la gran problemática de consumo de energía para climatización en el interior del instituto. En efecto, el CICY destina decenas de miles de pesos mensuales a los pagos de facturación eléctrica, como se mostró en la Figura 1. 6. Los resultados de este análisis se contrastaron con la distribución típica de consumo por electrodoméstico reportada por Carrocera M. (Figura 1. 4), y también con la gráfica de consumo semanal y temperaturas máximas registradas semanalmente (Figura 1. 2), se verificó que si existe correlación entre el aumento medio de consumo por hogar y las variaciones mensuales de temperaturas. El objetivo de este estudio se limita a tener un primer acercamiento a la relación entre el consumo eléctrico y el uso de aires acondicionados. Por esas razones, se consideró que el personal del CICY era una muestra apropiada, dado que el rango de ingresos permite financiar dichos sistemas. La búsqueda de una muestra representativa de todo el espectro socioeconómico de Mérida cae fuera de los objetivos de este trabajo: un estudio así en un fraccionamiento del sur de la ciudad (zona de menor poder adquisitivo) quizás no arrojaría datos en esa dirección debido al uso reducido de sistemas de A.A.

1.1.2.1. Análisis de los resultados de la encuesta.

La encuesta se aplicó en abril del 2017, la parte inicial está relacionada con los sistemas de acondicionamiento térmico, el tipo de equipo; ya sea A.A o ventilador, la capacidad y la tecnología de los sistemas, las temperaturas y el tiempo de uso, el consumo mensual en kWh y se tomó en cuenta la sensación térmica del entorno de los participantes.

El tamaño final de la muestra fue de 27 encuestados, de los cuales 16 fueron hombres y 11 mujeres, se encontró que la edad preponderante correspondía a un rango de 20 a 29 años con 11 encuestados, seguido por los participantes con edades en el rango de 30 y 39 años que 10 representantes y finalmente los encuestados con edades entre 41 y 55 años con 7 encuestados. La mayor parte de los participantes reside en el norte de Mérida, de acuerdo con los resultados, sus hogares se localizan en la colonia Francisco de Montejó (5), seguido de la colonia Las Américas (2) y la colonia Centro (2). Además, se encontró que 11 de los hogares de los encuestados son ocupados por 2 personas, 7 hogares por un ocupante, 4 hogares por 3 ocupantes y los 5 hogares restantes son ocupados con 4 o 6 ocupantes. De los encuestados, 18 cuentan con A.A y ventilador como sistemas de acondicionamiento térmico, 8 con ventilador, tal como se observa en la Figura 1. 7.

¿Con qué equipos de acondicionamiento de aire cuenta en casa?

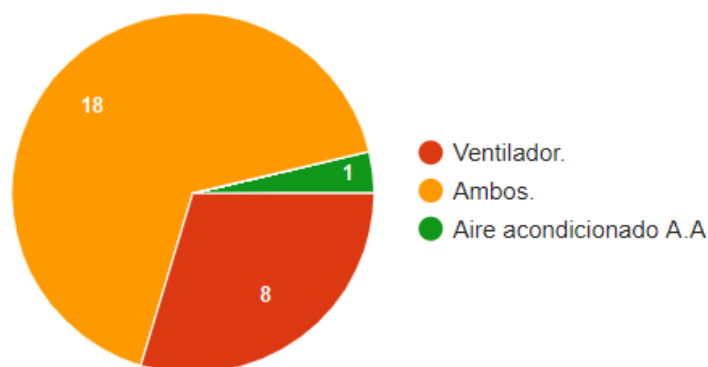


Figura 1. 7. Equipos de acondicionamiento de aire de los encuestados.

Los resultados mostraron que, para la temporada de primavera y verano, 11 de los encuestados que cuentan con A.A ajustan su equipo a una temperatura en un rango de 24 a 26 °C, mientras que 5 la adecuan en un rango de 21 a 23 °C y únicamente 3 encuestados lo utilizan a una temperatura superior a los 27 °C (Figura 1. 8).

¿A que temperatura suele ajustar su sistema A.A?

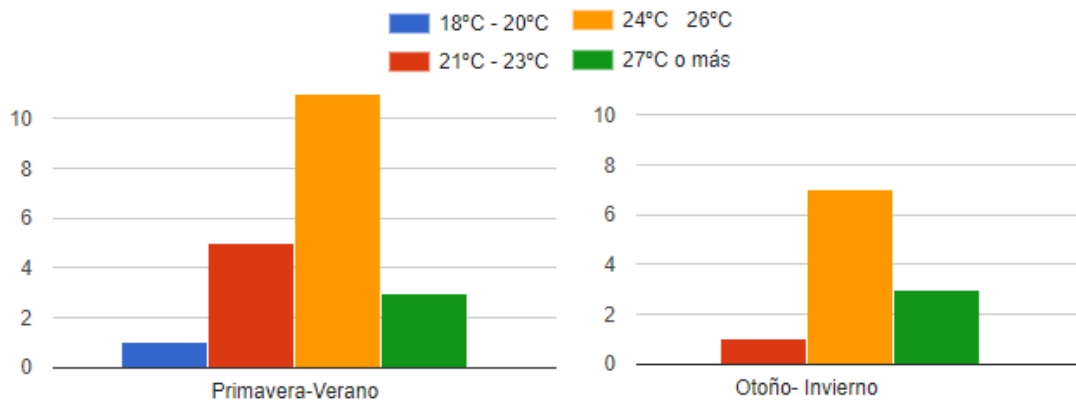


Figura 1. 8. Temperatura objetivo de trabajo de los sistemas A.A. durante la primavera-verano y el otoño-invierno.

Así mismo, durante la temporada de otoño e invierno, las distribuciones del ajuste de temperatura son similares donde 7 encuestados ajustan su A.A en el rango de 24.0 a 26.0°C, y solamente uno lo ajusta a temperaturas superiores de 27.0 °C.

Sin embargo, existe una diferencia importante entre las horas de uso de los sistemas de A.A durante la primavera y el verano, los resultados muestran que durante esta temporada se presenta un incremento en el uso del A.A durante el día provocado por las elevadas temperaturas, mientras que en la temporada de otoño e invierno las horas de uso disminuyen notablemente (Figura 1. 9 y Figura 1. 10).

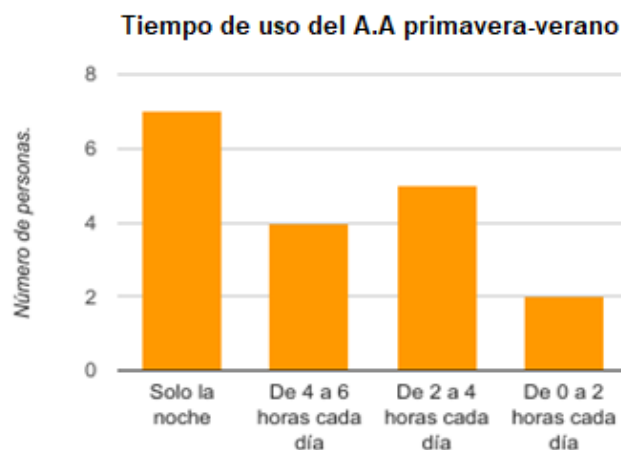


Figura 1. 9. Tiempo de uso de los sistemas A.A. durante la primavera y verano.

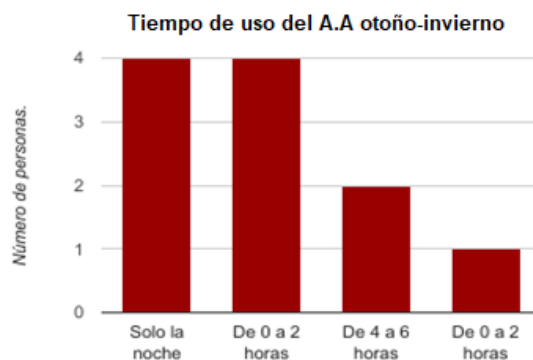


Figura 1. 10. Tiempo de uso de los sistemas A.A durante otoño e invierno.

Se encontró que 15 de las personas que disponen de un A.A individual en su área de trabajo y ajustan su temperatura de uso en un rango de 24.0 a 26.0 °C, mientras que 4 prefieren una temperatura en el rango de 21.0 a 23.0 °C (Figura 1. 11).

En caso de contar con A.A individual.
¿A qué temperatura lo suele ajustar?

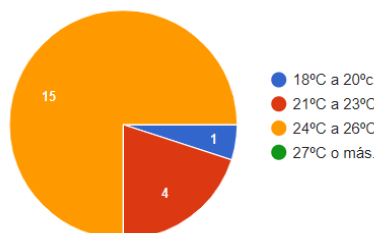


Figura 1. 11. Temperatura de ajuste de los sistemas A.A en espacio individual.

Además, la encuesta incluyó algunas preguntas relacionadas con la sensación térmica de los participantes en sus áreas laborales (Figura 1. 12) tomando en cuenta 7 niveles de sensación térmica. Los resultados obtenidos mostraron que para el nivel 1, sensación de mucho calor, 11 encuestados respondieron “nunca” y solo 1 “frecuentemente”, para el nivel 2, sensación de calor, 10 encuestados respondieron “ocasionalmente” y 1 “siempre”, para el nivel 3 sensación; ligeramente calurosa, 12 participantes respondieron “ocasionalmente”, para el nivel 4; sensación neutra, 11 encuestados respondieron “frecuentemente” y 2 “nunca”, para el nivel 5; sensación térmica ligeramente frío, 11 participantes respondieron “ocasionalmente”, y 2 “nunca”, para el nivel 6; sensación de frío, 6 encuestados respondieron “nunca” y 2 “siempre”, en el último nivel, correspondiente a una sensación de mucho frío, 10 encuestados respondieron “nunca” y 1 “siempre”.

En su lugar de trabajo ¿cual es su sensación térmica?

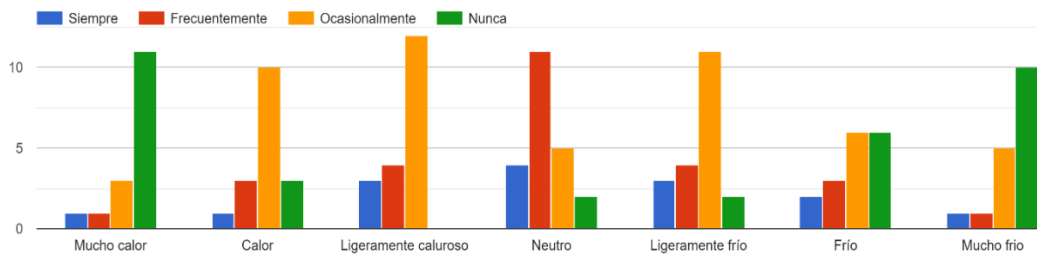


Figura 1. 12. Grafica de sensación térmica.

Por último, se invitó a los participantes a colaborar con la investigación proporcionando sus datos de consumo eléctrico, sin embargo, del total de las encuestas realizadas, únicamente 12 encuestados compartieron su información. Los datos obtenidos fueron de gran utilidad para evidenciar la relación que existe entre el aumento de temperatura y el aumento en el consumo eléctrico. La Figura 1. 13, muestra el consumo eléctrico por bimestre contra la temperatura promedio bimestral durante los últimos dos años (2015-2016), es evidente que la temperatura y el consumo eléctrico mantienen la misma tendencia durante las temporadas de primavera y verano en ambos años debido al incremento de la temperatura y por consiguiente el del uso del A.A.

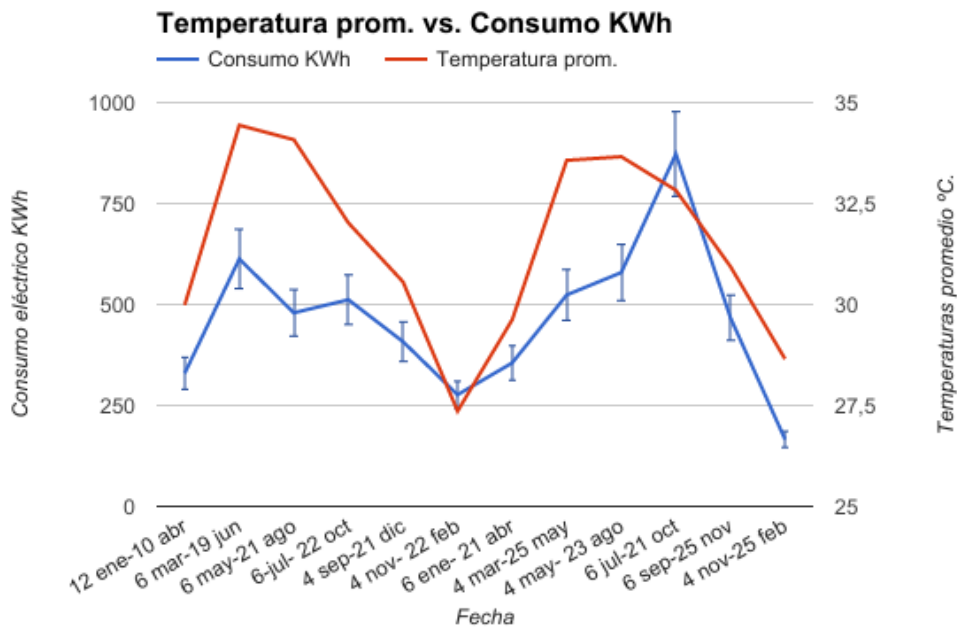


Figura 1. 13. Gráfica de temperatura promedio y consumo eléctrico mensual.

La Figura 1. 14 muestra la correspondencia que existe entre el consumo eléctrico durante la primavera y verano, y la temperatura a la que usualmente los encuestados ajustan sus sistemas de A.A.

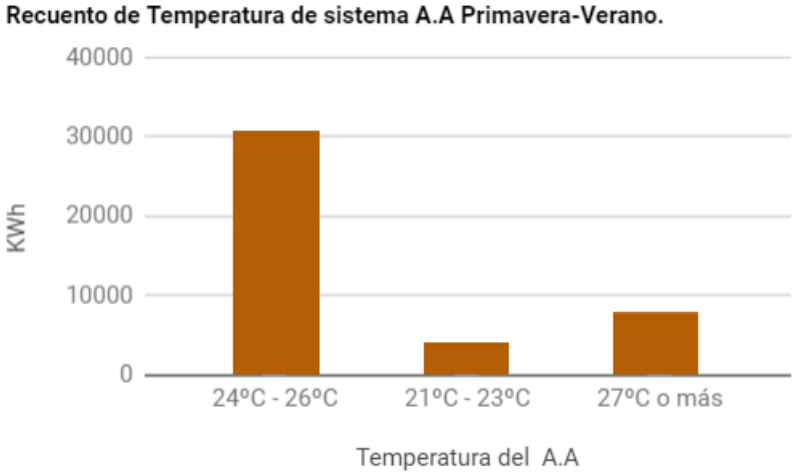


Figura 1. 14. Temperatura de uso del A.A. durante primavera y verano.

Para la temporada de otoño e invierno, la Figura 1. 15 muestra que el consumo eléctrico disminuye de manera importante debido a que las temperaturas en estas estaciones del año son menores por lo que no necesariamente los participantes requieren de un sistema de A.A para lograr el confort térmico.

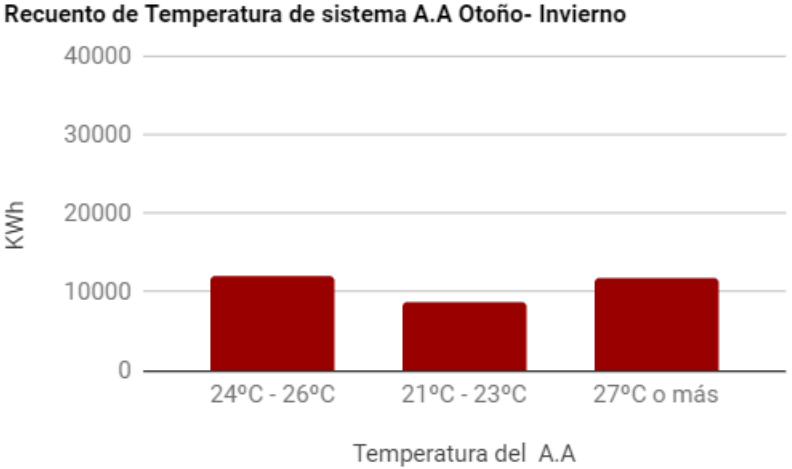


Figura 1. 15. Temperatura de uso del A.A durante otoño e invierno

1.1.2.2. Observaciones.

- Los resultados obtenidos confirman que el incremento en el consumo de energía eléctrica está relacionado con las condiciones meteorológicas de Yucatán, la temperatura máxima mensual tiene una influencia importante en las variaciones de consumo eléctrico, este comportamiento puede observarse en la Figura 1. 2, donde el comportamiento del consumo eléctrico es proporcional al aumento de la temperatura.
- El uso de los sistemas de A.A es notablemente mayor durante la primavera y el verano, durante este periodo los participantes pueden llegar a consumir aproximadamente 20,000 KWh, reduciendo su consumo a 11,000 KWh durante el otoño y el invierno.
- En términos de sensación térmica del entorno, los resultados obtenidos convalidan que este aspecto es subjetivo y depende de la percepción de los participantes (ANEXO I).

1.2. El Karst y sus Propiedades Térmicas.

La península de Yucatán se encuentra sobre un bloque tectónico único, sin plegamientos o deformaciones, constituido por rocas calcáreas del terciario [14], cuyos sedimentos se encuentran aproximadamente en los primeros 120 m con calizas masivas recristalizadas, cavernosas de buena permeabilidad [15].

El relieve cárstico se debe a la actividad de la disolución de rocas solubles tales como caliza, dolomita, yeso y sal por aguas subsuperficiales y subterráneas, lo que ocasiona que el acuífero se encuentre cerca de la superficie en casi toda la región (Figura 1. 16), excepto en la parte sur donde las profundidades máximas son del orden de 100 m [16], el acuífero tiene una marcada heterogeneidad en toda la región respecto a sus características hidráulicas y a las profundidades de los niveles estáticos varían de acuerdo con su lejanía de las costas (costa 1-5 m de profundidad).

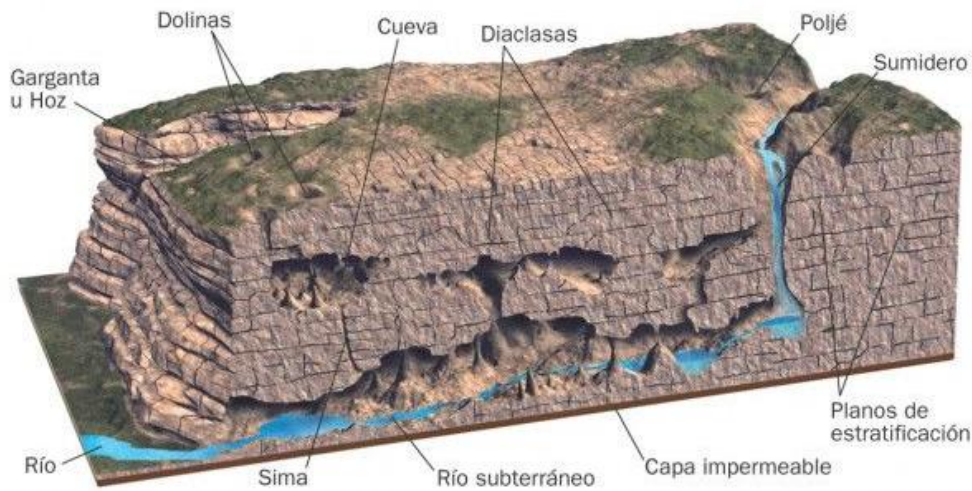


Figura 1. 16. Formaciones kársticas [17].

La combinación de roca y agua constituye un almacén de gran capacidad calorífica (Tabla 1. 1) susceptible de remover o proporcionar calor, cuya viabilidad para el acondicionamiento térmico interior es objeto de este trabajo de tesis.

Tabla 1. 1. Características térmicas de caliza y agua [18].

Material	Conductividad	Calor
	térmica	específico
	W/m K	J/kg K
Caliza	2.3	1000
Agua	0.582	4187

La geología superficial de Yucatán se caracteriza por la abundancia de suelos someros y pedregosos con fragmentos de roca (10-15 cm de diámetro), tanto en la superficie como en el interior de su breve perfil, además, se ve acompañado de afloramientos de la típica coraza calcárea yucateca. Los suelos presentes son las rendzinas, litosoles, luvisoles, colonchaks, cambisoles, regosoles, vertisoles, nitosoles, histosoles y gleysoles; sin embargo, en términos de extensión superficial se aprecia la amplia predominancia de los tres primeros, en el noroeste, noreste y centro del estado, los cuales se caracterizan por

ser muy delgados (menores a 30 cm), pedregosos y con una gran cantidad de material calcáreo y una capa superficial rica en materia orgánica, es común encontrarlos dentro de pequeñas asociaciones de dos o más tipos de suelos [19].

1.3. Intercambiadores de Calor Tierra- Aire (EAHE)

La posición geográfica; la cercanía con el trópico de Cáncer y la ausencia de orografía considerable, hacen que la región tenga un clima cálido-semihúmedo, las altas temperaturas alcanzan hasta los 41 °C durante la primavera, provocando que los sistemas de enfriamiento mecánico sean necesarios para climatizar las viviendas y edificaciones. El desarrollo tecnológico de los últimos años ha ocasionado grandes avances en la ventilación mecánica. Sin embargo, debido a la crisis energética, los problemas ambientales producidos por el cambio climático y el constante aumento en el costo de la energía eléctrica, ha sido necesario desarrollar métodos alternativos para el enfriamiento de espacios, sin la necesidad de consumir tanta energía eléctrica [4].

Actualmente existen sistemas capaces de proveer condiciones para el confort térmico con requerimientos mínimos de electricidad, tal es el caso de los EAHE (Figura 1. 17), utilizados hace ya más de 30 años en los países europeos, para satisfacer las necesidades de calentamiento y enfriamiento en viviendas y edificios. Su principio se fundamenta en el uso de la energía geotérmica de baja temperatura [20], es decir, la energía térmica almacenada a poca profundidad (hasta 15 m) en suelos, rocas y aguas subterráneas (entre 10 y 30 °C), con el objetivo de adecuar la temperatura del aire en el interior de las viviendas.

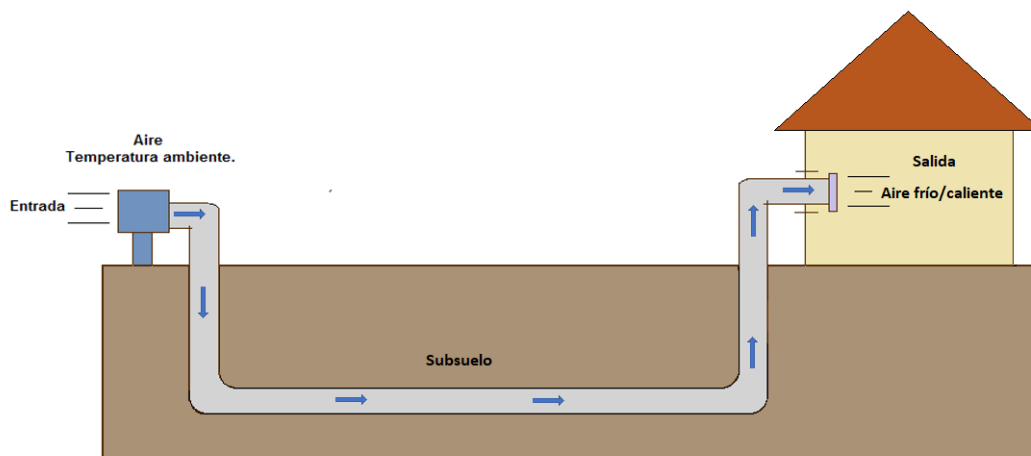


Figura 1. 17. Funcionamiento de un intercambiador de calor aire a tierra.

Los EAHE aparecen como una opción para mitigar el problema del consumo excesivo de energía eléctrica asociado a los aires acondicionados. Sin embargo, antes de considerar un intercambiador de calor aire-tierra, es necesario evaluar el gradiente térmico del subsuelo a lo largo del año, coleccionar datos sobre las temperaturas más bajas que se llegan a registrar en el subsuelo, así como las propiedades termofísicas de las rocas que lo componen con el objetivo de estimar el potencial de funcionamiento, ya que en México se han realizado muy pocos estudios sobre la transferencia de calor en el subsuelo.

A continuación, se describen algunos de los pocos estudios realizados en México acerca de la transferencia de calor en el subsuelo:

Vidal et al. (2010) realizaron el monitoreo de los perfiles de temperatura del suelo arenoso de los patios de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Veracruz, localizada a 500 m del mar y donde el manto freático se encuentra a no más de 2 m de profundidad. Para obtener las medidas de temperatura, se utilizaron termorresistencias (sensores Pt100), los sensores se fijaron a un tubo de PVC que permitiera introducirlos en el subsuelo y fueron colocados con una separación de 50 cm cada uno, el primero de los sensores se encontraba a 2 m de profundidad, el segundo de ellos a 1.5 m, el tercero a 1 m y el último de los sensores estaba sobre la superficie del suelo, el tiempo de muestreo se programó cada 60 segundos. El sistema de adquisición de datos fue diseñado en la plataforma del software LabVIEW. Según los datos obtenidos, se pudo apreciar que la temperatura aproximada en la superficie fue de 39 °C y la temperatura registrada a 2 m de profundidad fue de alrededor de 18 °C, lo cual crea un diferencial de temperatura cercano a los 20 °C, resultando un gradiente adecuado para la implementación de un sistema de enfriamiento pasivo en la costa Veracruzana [21].

Xamán et al. (2014) realizaron un estudio numérico para la estimación del comportamiento térmico de un EAHE para tres ciudades de México; la Ciudad de México con clima templado, la Ciudad de Mérida, Yucatán con clima húmedo y Cd. Juárez, Chihuahua con clima extremo. El suelo se consideró como un medio sólido donde el calor se transfiere por conducción, además se tomó en cuenta la transferencia de calor por convección en régimen de flujo laminar, a través de la tubería, aplicando variaciones al número de Reynolds (Re de 100, 500, 1000, 1500) y un intercambio de calor entre las paredes de la tubería y el

suelo. Estos fenómenos fueron modelados mediante las ecuaciones de masa, momento y energía, aplicando un código CFD basado en el método de volumen finito. El comportamiento térmico fue evaluado a partir de las condiciones climáticas de las tres ciudades. Se consideró una tubería enterrada a 10 m de profundidad con una longitud de 5 m en su parte horizontal, para la temperatura del subsuelo se utilizó una temperatura similar a la temperatura promedio anual de cada ciudad, tomando en cuenta un suelo de arena para Ciudad Juárez, limo para la Ciudad de México y arcilla para la Ciudad de Mérida.

En Ciudad Juárez, para fines de calefacción el EAHE aumentó la temperatura del aire hasta 3.7 ° C por encima de la temperatura de entrada durante el mes de diciembre. Durante los meses cálidos de abril hasta septiembre las reducciones de temperatura promediaron 6.6 °C y el efecto máximo de enfriamiento del aire fue de 9.7 °C en el mes de junio. Para la Ciudad de México durante los meses fríos (enero-marzo, octubre-diciembre), el EAHE aumentó la temperatura entre 1.5 y 3.7 °C respectivamente. Por otro lado, para fines de enfriamiento pasivo, el EAHE funcionó mejor durante los meses cálidos (abril-septiembre), ya que logró disminuir la temperatura entre 1.9 y 5.4 °C. En la Ciudad de Mérida el EAHE logró su objetivo durante la estación fría (enero-marzo y octubre-diciembre), ya que aumentó la temperatura de salida independientemente del número de Reynolds (3 a 4.8 °C). Sin embargo, el EAHE tuvo un bajo rendimiento con fines de enfriamiento, durante la temporada cálida disminuyó la temperatura de salida únicamente en 3 meses (abril, agosto y septiembre), con una disminución máxima de solo 1.7 ° C en abril [22]. Los resultados de la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida del intercambiador obtenidos para las tres ciudades se muestran en la Tabla 1. 2 donde los números positivos representan ganancias de calor y los negativos, pérdidas.

Tabla 1. 2. Temperatura promedio para las tres ciudades [22].

Mes	T promedio= T entrada – T salida (°C)		
	Cd. de Mérida	Cd. de México	Cd. Juárez
Enero	3.2	3.7	1.8
Febrero	3.9	2.1	2.1
Marzo	3.2	1.5	0.8
Abril	-1.7	-5.4	-5.2
Mayo	0.9	-3.5	-4.0

Junio	3.5	-3.9	-9.5
Julio	0.5	-2.3	-8.0
Agosto	-0.4	-2	-6.9
Septiembre	-1.1	-1.9	-6.2
Octubre	4.8	1.9	2.5
Noviembre	3	3.5	2.1
Diciembre	4.5	3.5	3.7

Xamán et al. (2015) realizaron un estudio numérico de un intercambiador de calor aire-tierra y el efecto del aislamiento térmico en su salida aplicándolo en tres ciudades del país, Cd. Juárez, Cd de México y Mérida, se analizó la transferencia de calor pseudo transitorio en 2D de un intercambiador de calor (Figura 1. 18). Se consideró un suelo de arena para ciudad Juárez, limo para la Ciudad de México y arcilla para Mérida, se realizaron diferentes simulaciones para obtener la diferencia entre la temperatura de entrada y salida del intercambiador, las simulaciones se realizaron para el día más cálido y el más frío de cada ciudad, con intervalos de 1 h. Los resultados numéricos para el EAHE se obtuvieron con un número de Reynolds de 1500, primero, se consideró la salida de la tubería sin ningún material de aislamiento y después, considerando distintos espesores del aislamiento (0.025 m, 0.050 m y 0.075 m). De acuerdo con los resultados, para la Ciudad de México, se recomienda el aislamiento con un espesor de 0.05 m ya que mejoró el efecto de calentamiento, en enero, aumentando hasta 5.7 °C por encima de la temperatura de entrada (2.0 °C más alta que la temperatura de salida del EAHE sin aislamiento), durante agosto y septiembre, proporcionó un efecto de enfriamiento de 1.3 °C con respecto al caso sin aislamiento. En la Ciudad de Mérida, el aislamiento térmico con un espesor de 0.05 m mejoro el rendimiento del EAHE, durante el invierno la temperatura de salida del aire alcanzó hasta 5.8 °C por encima de la temperatura de entrada (2.6 °C por encima que el EAHE sin aislamiento). Al aplicar el aislamiento de 0.05 m de espesor hubo un aumento en el efecto de enfriamiento durante los meses cálidos, en junio, la temperatura en la salida logró 1.5 °C por debajo de la temperatura de entrada (5 °C por debajo de la temperatura de salida del EAHE sin aislamiento). Finalmente, para Cd. Juárez, durante el primer período de meses fríos (enero-marzo), el EAHE tuvo un buen rendimiento con un aislamiento térmico de 0.05 m de espesor, con un incremento máximo de temperatura de 3.3 °C, con respecto a la temperatura de salida del EAHE sin aislamiento. Resultados similares se

obtienen para el segundo período de meses fríos (octubre-diciembre). Por otro lado, durante la mayor parte del verano (de abril a septiembre), el aislamiento térmico no proporciona una reducción de la temperatura del aire a la salida con respecto al EAHE sin aislamiento [23]. Los resultados obtenidos para cada ciudad se muestran en la Tabla 1. 3.

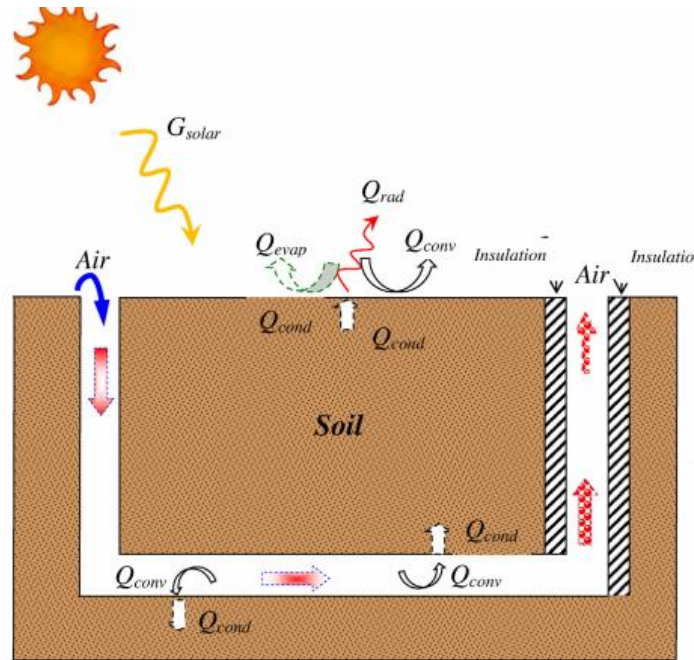


Figura 1. 18. Intercambiador de calor en el subsuelo, aplicado a 3 ciudades de México [23].

Tabla 1. 3. Temperatura de salida del intercambiador con material aislante [23].

Mes	Mérida		Ciudad de México		Ciudad Juárez	
	T de entrada °C	T salida °C aislante de 0.05m	T de entrada °C	T salida °C aislante de 0.05m	T de entrada °C	T salida °C aislante de 0.05m
Enero	10.1	15.18	1.8	7.5	-0.6	5.7
Febrero	12	17.6	4.1	4.4	3.2	8.1
Marzo	14.3	18.9	6.8	10.1	7.5	9.9
Abril	39.6	35.3	27.2	21.8	25.3	21

Mayo	41.2	37.8	28	23.4	31.1	26
Junio	38.2	36.7	27.9	23.1	33.3	24.9
Julio	38.4	35.5	25.1	21.8	33.6	25.9
Agosto	37.0	34	25	21.7	31.3	24.7
Septiembre	36.3	32.9	25.2	22	29.1	23.4
Octubre	16.8	21.6	7.0	10.5	11.3	14.4
Noviembre	14.2	18.8	3.1	8.3	3.3	8.2
Diciembre	12.3	18.1	3.2	8.4	0.8	7.1

Ochoa R. (2011) realizó una investigación para probar las posibilidades del uso de sistemas de climatización hidrogeotérmica para uso doméstico en Yucatán de un diseño conceptual de un equipo para acondicionamiento de aire, estos equipos aprovechan la diferencia de temperaturas con cuerpos de agua profundos para acondicionar térmicamente espacios habitables. Además, desarrolló un método para caracterizar el subsuelo cárstico, a partir de sus propiedades termodinámicas (capacidad calorífica, conductividad térmica, porosidad y difusividad térmica utilizando muestras de roca (110 mg). Por último, realizó un modelo matemático para la simulación de distintas condiciones de operación del equipo que incluyeron: operación con energía residual, operación durante las horas de día, operación constante y operación bajo un escenario de cambio climático (aumento de 0.5 °C sobre la temperatura media). De acuerdo con los resultados obtenidos, el aprovechamiento de la energía térmica del agua para climatización hidrogeotérmica es factible, y que adicionalmente puede generar un ahorro energético de hasta un 33%, en comparación con sistemas convencionales porque minimizan las etapas de transformación de la energía, y contribuyen a la conservación ambiental porque no dependen de refrigerantes [24].

Arcos M. (2016) realizó un estudio experimental del funcionamiento de un intercambiador de calor tierra-aire instalado en las Villas de la Universidad de Quintana Roo el sistema fue construido con una tubería de Policloruro de vinilo (PVC) de 15.24 cm de diámetro enterradas a 2 m de profundidad, la longitud del sistema fue de 6 m (Figura 1. 19). Para reducir la pérdida o ganancia de calor a la salida del intercambiador de calor, este fue

aislado térmicamente en la sección de salida con espuma rígida de poliestireno extruido de 5.08 cm de espesor, con un flujo másico de 1.1×10^{-2} kg/s. El intercambiador de calor fue estudiado durante dos semanas bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Chetumal, Quintana Roo, para lo cual el sistema fue instrumentado con sondas compuestas por un conjunto de 5 sensores de temperatura (termopares tipo T) colocados a lo largo del sistema, los datos fueron adquiridos y almacenados para su posterior análisis. Los resultados mostraron una reducción de temperatura en la salida de hasta 4°C . Se encontró que, durante la noche, la temperatura del aire a la entrada del intercambiador de calor es menor que a la salida, mostrando un efecto inverso al deseado, por lo que únicamente se recomienda el uso diurno del EAHE para la temporada de primavera-verano en la Ciudad de Chetumal. Finalmente, se encontró que las variables meteorológicas tienen un impacto importante en el rendimiento de estos sistemas [25].

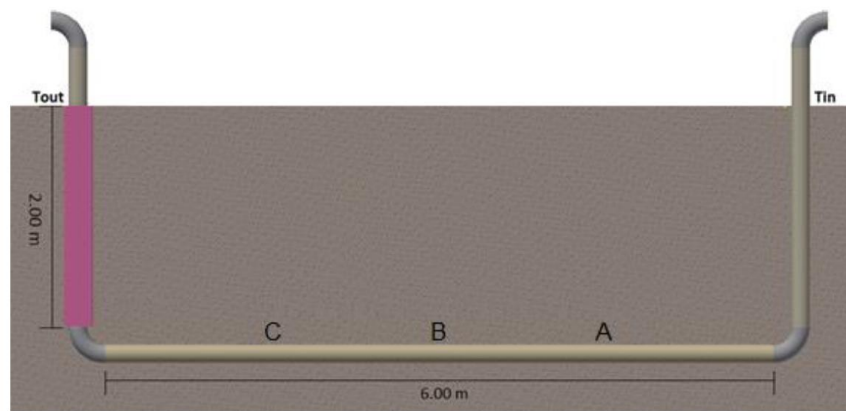


Figura 1. 19. Vista del intercambiador de calor tierra-aire ensamblado con aislamiento térmico [25].

En los últimos años ha incrementado el estudio de los sistemas de enfriamiento pasivo con apoyo de herramientas computacionales, modelos matemáticos, estudios teóricos y experimentales, etc., con el objetivo de conocer más a fondo el comportamiento y rendimiento térmico, y así obtener su óptimo aprovechamiento.

A continuación, se presenta bibliografía general sobre el estudio de los EAHE:

Mihalakakou et al. (1995) propusieron un modelo paramétrico para la estimación del comportamiento térmico, del sistema de los intercambiadores de calor aire-tierra. Utilizaron un modelo numérico implícito transitorio basado en el transporte acoplado y simultáneo de

calor y masa en el suelo y en la tubería definieron un parámetro adimensional (U) que consideraba las temperaturas de entrada y salida de la tubería así como la temperatura del subsuelo y desarrollaron un código numérico con el objetivo de calcular los valores del parámetro U para varios conjuntos de parámetros de entrada, entre los cuales se consideró, la longitud del tubo (L), el radio de la tubería (r), la velocidad del aire a través del tubo (V) y la profundidad de enterramiento de la tubería (D). Las simulaciones realizadas abarcaron un amplio rango de valores de cada parámetro. Posteriormente, realizaron un análisis de regresión parabólica de un conjunto de los datos de U para expresar U en función de los otros parámetros, finalmente para evaluar la precisión del procedimiento estadístico, los resultados del modelo paramétrico se compararon con las predicciones numéricas teóricas mostrando una buena correlación [26].

Santamouris et al. (1995) utilizaron intercambiadores de calor para el enfriamiento y calentamiento de los invernaderos agrícolas. Realizaron un análisis paramétrico en un invernadero de vidrio típico de 1000 m² ubicado en Atenas, Grecia, el cual estaba conectado a cuatro tuberías de plástico en paralelo (enterradas en el subsuelo) para mostrar el efecto que tiene la longitud de la tubería a 10, 20, 30, 40 y 50 m, el radio de las tuberías a 0.05, 0.08, 0.1 and 0.125 m, la profundidad de enterramiento a 1, 2, 3, 4 y 5 m, y la velocidad del aire dentro de los tubos sobre el rendimiento del sistema a 4, 6, 8 y 10 m/s. La temperatura del aire del invernadero se calculó utilizando el programa de simulación de sistemas transitorios TRNSYS, el modelo numérico utilizado fue el propuesto por Mihalakakou [27], el cual toma en cuenta el movimiento simultáneo de calor, la humedad del suelo y la estratificación térmica vertical en el suelo. El modelo fue validado contra conjuntos de datos experimentales y se encontró que podía predecir con precisión la temperatura y la humedad del aire, la distribución de la temperatura y la humedad en el suelo, así como el rendimiento térmico general del intercambiador de calor enterrado (Figura 1. 20). Los cálculos fueron realizados durante un período de 9 años (1981-1990), durante los meses de verano de junio, julio, agosto y septiembre, utilizando datos de temperatura ambiente y terrestre; suelo cubierto de pasto, desnudo y corto, a 0.3 m, 0.6 m, 0.9 m y a 1.2 m muestreadas cada hora entre las 9 a. m. y 7 p.m. Se determinó que la temperatura del aire en el interior del invernadero disminuye: al aumentar la longitud de la tubería hasta 50 m, debido a que al aumentar la longitud del intercambiador el aire ambiente permanece bajo el suelo por un mayor lapso lo que retrasa la variación de temperatura. Un radio de 0.05 m, ya que al

disminuir el tamaño del radio de la tubería aumenta el coeficiente de transferencia de calor por convección. Una profundidad de enterramiento de hasta 4 m, debido a que la capacidad de enfriamiento del suelo aumenta con la profundidad y una velocidad del aire dentro de las tuberías de 4 m/s ya que al considerar velocidades bajas el caudal másico disminuye; lo que provoca una disminución de la temperatura del aire en la salida de las tuberías. Los datos medidos de la temperatura del aire en el interior del invernadero fueron comparados con los datos calculados y los resultados fueron satisfactorios [28].

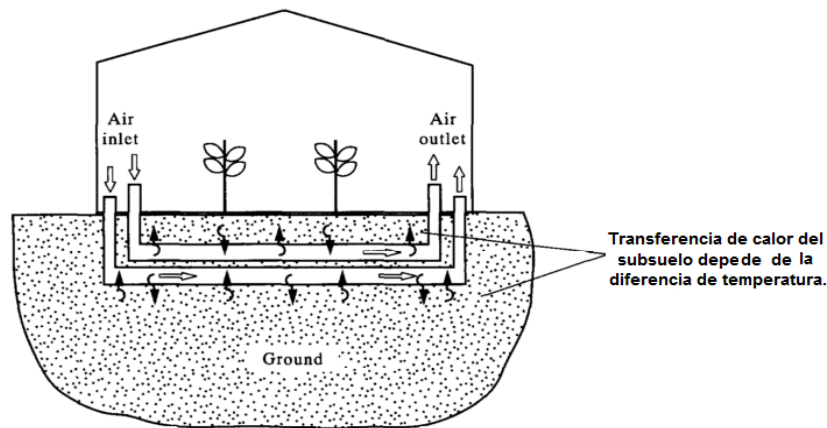


Figura 1. 20. Funcionamiento de un intercambiador de calor de un invernadero [28].

Kumar et al. (2003) desarrollaron un modelo numérico para predecir el potencial de rendimiento térmico de un sistema intercambiador de calor aire a tierra, el cual incorpora un mayor número de parámetros tales como los efectos del gradiente de temperatura del suelo, transferencia de calor latente y sensible, contenido de humedad del aire circulante y diversos aspectos de diseño del intercambiador de calor. El modelo se basa en la ecuación de transferencia de calor y la de transporte de masa, se desarrolló con la técnica numérica de diferencia finita y transformada rápida de Fourier, fue validado con datos experimentales de un túnel similar en Mathura, India, además de hacer una comparación con los resultados teóricos obtenidos en el trabajo de Sodha [29] Las simulaciones realizadas sobre el potencial de enfriamiento del EAHE incluyeron cuatro diferentes longitudes de tubería 20, 40, 60 y 80 m, las longitudes más pequeñas (20, 40 y 60 m) no pudieron reducir suficientemente las temperaturas interiores en las últimas horas de la noche y en las primeras horas de la mañana. Los resultados predijeron una temperatura promedio de 32.1

°C para una tubería de longitud de 20 m, pero para la longitud de tubería de 80 m la temperatura disminuyó hasta los 27.6 °C. Se determinó que la temperatura del aire después de 24 m (longitud de la tubería) no es afectada por las fluctuaciones de temperatura del suelo en la entrada del intercambiador. Se calculó que una disminución del flujo de aire de 2.58 a 1.2 kg /s disminuye la temperatura promedio de 27.65 °C a 25.9 °C, es decir, la disminución de la tasa de aire en la entrada disminuye la temperatura en la salida de la tubería. Finalmente, realizaron una comparación entre el potencial de enfriamiento para varios radios de la tubería (0.41, 0.48, 0.52, 0.58, 0.70 m). Los resultados mostraron un aumento en la temperatura de salida de la tubería con un radio creciente por encima del valor crítico de 0.52 m en el radio. En general, las estimaciones numéricas de la temperatura de salida del EAHE para varias características de la tubería revelaron una buena correlación con los datos experimentales [30].

Sharan et al. (2003) instalaron un EAHE simple para estudiar su rendimiento en modo de enfriamiento y calentamiento en un campo del pueblo, Thor, a unos 40 km del Instituto Indio de Administración de Ahmedabad, donde el suelo está compuesto de arena-limo y el contenido de humedad de 12.61%. Para la instalación del EAHE se colocó una cama de arena de 15 cm de espesor, después se colocó la tubería y se cubrió con arena hasta unos 15 cm por encima, finalmente se llenó completamente con el suelo original. El EAHE estuvo constituido por una tubería de hierro galvanizado de 50 m de longitud horizontal con un diámetro de 10 cm y un espesor de pared de 3 mm, se enterró a 3 m de profundidad donde la temperatura promedio es de 27.0 °C [31]. Se colocaron aletas hechas de una fina tira de hierro galvanizado enrollada en espiral sobre la superficie exterior de la tubería, a lo largo de los 50 m de longitud. El aire fue bombeado por un ventilador de 400 W a una velocidad de 11 m/s. Se realizaron tres medidas de temperatura del aire mediante termistores AD590 colocados; en la entrada de la tubería, en medio (25 m), y en la salida (50 m). Las pruebas de enfriamiento se llevaron a cabo el 28, 29 y 30 de mayo, el sistema se encendió a las 10 a.m. y apagó a las 5 p.m. Las temperaturas fueron obtenidas en intervalos de una hora. El EAHE logró reducir la temperatura del aire hasta en 14.0 °C. La temperatura del suelo durante ese mes fue de 26.6 °C. Las pruebas de calentamiento se llevaron a cabo el 28, 29 y 30 de enero, el sistema se encendió a las 6 p.m. y funcionó durante 12 horas de forma continua, hasta las 6 a.m. del día siguiente. El EAHE fue capaz de calentar el aire a una temperatura promedio de 23 °C durante las noches de enero. La temperatura del suelo

durante este mes fue de 24.2 °C. El coeficiente de rendimiento promedio por hora fue de 3.8 durante la prueba [32].

Al-Ajmi et al. (2005) desarrollaron un modelo teórico para predecir la temperatura del aire de salida y el potencial de enfriamiento de un EAHE en un edificio en Kuwait, Kuwait dentro del entorno TRNSYS-IISIBAT. El sistema EAHE se modeló mediante dos procesos de transferencia de calor acoplados; 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 tomó en cuenta que el suelo que rodeaba la tubería era isotrópico, y su conductividad térmica homogénea, el espesor de la tubería es muy pequeño por lo que la resistencia térmica de su material es insignificante, la temperatura de la superficie del suelo se aproxima a la temperatura del aire ambiente y la tubería tiene una sección transversal circular uniforme. El modelo fue validado frente a otros modelos publicados de Mihalakakou [33], Dhaliwal [34] y Shingari [35]. y mostró una buena concordancia con los mismos. Además, se presentó un modelo matemático para predecir las temperaturas del subsuelo utilizando parámetros de entrada obtenidos experimentalmente en dos sitios de Kuwait, una región desértica y una región costera a profundidades de 1, 2 y 3 m en ambas regiones. Los resultados de la ecuación fueron validados contra valores medidos de la temperatura del suelo (Aeropuerto internacional de Kuwait, 1983). De acuerdo con los resultados la tasa máxima de eliminación de calor de un edificio usando A.A fue de 4370 W mientras que la del uso combinado de A.A y el EAHE fue de 2670 W. La temperatura interior del edificio sin A.A mostró una reducción de 2.8 °C en las horas punta mediante el uso del sistema EAHE. Los resultados mostraron que la demanda total de enfriamiento del sistema de A.A puede reducirse si se emplea el sistema un EAHE [8].

Hamada et al. (2006) realizaron experimentos de un EAHE mejorado el cual utiliza un método sin excavación (Figura 1. 21), no se basa ni en el tipo horizontal ni en el tipo vertical convencional, por lo que tiene un beneficio económico en comparación con los otros métodos. Se estimó que la tasa de reducción de energía primaria que incluye la instalación y el funcionamiento del sistema fue del 29%. El EAHE se instaló en el campus de la Universidad de Hokkaido, se utilizaron tubos de polietileno (diámetro 52 mm, grosor 4 mm), la profundidad fue de 3m y el radio de curvatura del intercambiador de aproximadamente

12 m, la longitud total es de 83.2 m. Además, desarrollaron un análisis numérico sobre la evaluación enfriamiento y calentamiento pasivo del intercambiador de calor y se verificó que el programa proporcionó buenas predicciones al compararlos con los resultados experimentales. Al inicio se adoptó un sistema de enfriamiento directo sin una bomba de calor y se accionó una bomba de calor cuando la temperatura de retorno del subsuelo estaba por encima de la temperatura establecida. Para la calefacción se adoptó un sistema de bomba de calor de fuente de tierra. El consumo de potencia nominal de la bomba de calor es de 0.82 kW y la salida térmica nominal es de 2.9 kW. El período de enfriamiento fue del 5 de julio al 29 de agosto de 2000, con tasas de flujo volumétrico de 16 y 8 L/min, donde el sistema mantuvo una temperatura interior confortable de 23.9 °C. Durante el período de calefacción de 12 de octubre al 1 de mayo de 2001 las tasas de flujo volumétrico fueron las mismas y la temperatura máxima diaria del aire interior fue de 19 °C, mientras que la temperatura máxima diaria del aire exterior fue de 0.6 °C [36].

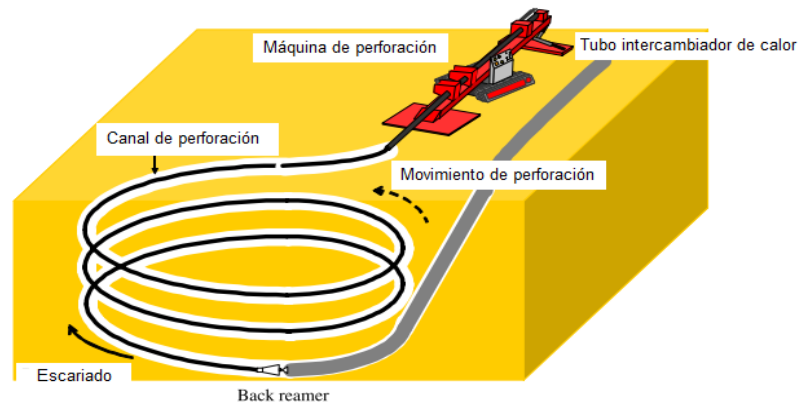


Figura 1. 21. Proceso de instalación de un intercambiador de calor helicoidal, sin excavación [36].

Singh et al. (2015) discutieron sobre el diseño de un EAHE de tubería metálica, tomaron en cuenta las variables como la carga de enfriamiento, carga de calefacción dentro de un salón de clases en Punjab, India, así como la temperatura subterránea óptima y el peso del suelo que actúa sobre el conducto subterráneo. Primero, realizaron el registro del gradiente de temperatura del subsuelo en función de su profundidad, para lo que se fabricó un aparato constituido de termopares de tipo T (6 en total) colocados en intervalos de 0.6 m, los cables se conectaron a un indicador de temperatura, se llevó a cabo una excavación a 10 pies de

profundidad y se insertó el aparato de termopares, después, el agujero se llenó nuevamente con tierra para obtener las lecturas durante 1 año. Donde una temperatura de aproximadamente 24.3 °C se mantuvo constante durante casi todo el año a los 3 m de profundidad. Luego se calculó la carga de enfriamiento del aula 6.1 KW, la carga de calentamiento 2.4 KW y la velocidad de entrada requerida en el ventilador 16.7 m/s. Posteriormente se diseñó el conductor, la forma de la tubería fue zigzag y la sección transversal de forma cuadrada, esta configuración dio como resultado menos área ocupada y una longitud más corta de la tubería requerida para un efecto adecuado de A.A, se dividió en tres partes, la principal, cuadrada en la sección horizontal hecha de hierro galvanizado colocada a 3 m de profundidad y conectada con tubos redondos de PVC en ambos extremos, además de un ventilador de 747 W instalado en la zona de entrada del PVC, la segunda parte del PVC se aisló para evitar ganancias térmicas del aire después de entrar en contacto con las condiciones atmosféricas el análisis del comportamiento del sistema metálico se realizó a través de software ANSYS. Los resultados mostraron una reducción de 13 °C en la temperatura durante el verano, mientras que el efecto de aumento de temperatura durante el invierno fue de solo 5 °C. De la misma manera el coeficiente de rendimiento y el efecto de enfriamiento del prototipo es mejor en los meses de mayo y junio, cuando el verano está en su apogeo y se reduce drásticamente en invierno en los meses de noviembre, diciembre, febrero y marzo [37].

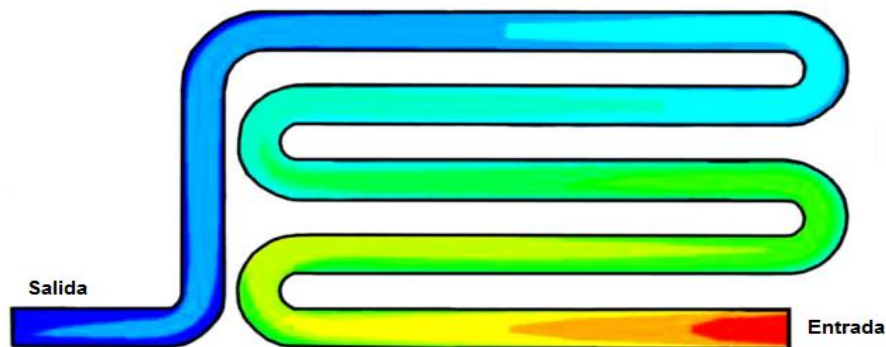


Figura 1. 22. Variación de la temperatura del aire en el ducto metálico de un intercambiador de calor [28].

Bansal et al. (2010) desarrollaron un modelo implícito y transitorio basado en la dinámica de fluidos computacional, para predecir el rendimiento térmico y la capacidad de

enfriamiento de un EAHE. El modelo se validó contra investigaciones experimentales en una instalación experimental en Ajmer (India occidental), obteniendo una buena concordancia entre los resultados simulados y los datos experimentales. Se estudiaron los efectos de los parámetros de operación; el material de la tubería y la velocidad del aire en el rendimiento térmico del sistema. El EAHE, estuvo constituido por dos tubos cilíndricos de PVC y de acero horizontales de 0.15 m de diámetro con una longitud enterrada de 23,42 m, enterrados a una profundidad de 2.7m en un terreno plano con suelo seco. Las dos tuberías, de PVC y acero, fueron conectadas a un colector común de admisión y salida para el paso del aire. Se colocaron válvulas de globo en cada conjunto de tubería para el control del flujo de aire. En el tubo de entrada, se conectó un ventilador motorizado monofásico de 1 HP. Se insertaron seis termopares (K) a una distancia fija para medir la temperatura del aire a lo largo de cada tubo. El modelado térmico del sistema se realizó utilizando FLUENT. Para el estudio se consideró el aire como fluido incompresible, la temperatura del subsuelo como constante y los materiales utilizados son isotrópicos y homogéneos. De acuerdo con los resultados se determinó que la temperatura del aire a la salida de la tubería aumenta debido al incremento de la velocidad del aire de 2 a 5 m/s (8.0 a 12.7 °C). Sin embargo, aunque la disminución de la temperatura del aire es menor, a velocidades más altas, el efecto de enfriamiento total alcanzado por unidad de tiempo es mucho mayor tanto para tuberías de PVC como de acero. Las investigaciones realizadas sobre el acero y el PVC mostraron que existe una diferencia muy pequeña en el rendimiento térmico del EAHE comparada con la afectación que produce la velocidad del fluido [38].

Benhammoua et al. (2015) desarrollaron un modelo transitorio unidimensional para estudiar el rendimiento térmico del EAHE y la eficiencia de enfriamiento durante el verano del Sahara argelino, para el modelado del intercambiador tomaron en cuenta el efecto de las extremidades de la tubería, las propiedades físicas y térmicas del suelo fueron constantes y no estuvieron influenciadas por la presencia de tubería. El intercambiador de calor estuvo formado por una tubería de PVC y un grosor de 5 mm. Se estudió el comportamiento de la longitud de la tubería a 10, 20, 30 40 y 50 m, a 10, 15, 20, 25 y 30 cm de diámetro interno y la velocidad del aire de entrada de 2 a 5 m/s. La temperatura del suelo a la profundidad del entierro fue de 22.27 °C, con un tiempo de análisis de 24 horas, donde la temperatura del aire en la entrada del EAHE fue igual a la temperatura ambiente, tomaron como referencia el comportamiento del EAHE funcionando en estado estable, es decir,

considerando que las variables que definen el comportamiento del sistema permanecían invariantes en el tiempo, para luego compararlo con el funcionamiento del EAHE en condiciones transitorias, donde las variables del sistema varían con el tiempo. Además, realizaron un estudio detallado sobre la influencia de parámetros geométricos y dinámicos sobre el comportamiento térmico del intercambiador. La validación del modelo fue realizada con datos teóricos y experimentales llevados a cabo por Bansal [38] mostrando una buena correlación. Determinaron que la eficiencia diaria del intercambiador incrementa al aumentar la longitud de la tubería, pero disminuye cuando el diámetro de la tubería o la velocidad del aire aumentan y que el rendimiento térmico de EAHE en condiciones transitorias está más influenciado por el aumento del tiempo de la operación. Para el EAHE que tiene una longitud de tubería más grande, el rendimiento térmico en condiciones transitorias es similar al de estado estable cuando funciona durante un tiempo corto [39].

La Tabla 1. 4 muestra los trabajos de investigación más relevantes sobre el funcionamiento de los intercambiadores de calor.

Tabla 1. 4. Investigaciones sobre intercambiadores de calor.

Autor	Año	Estudio	Régimen	Principios
Mihalakakou	1995	Análisis paramétrico predictivo	Transitorio	Transporte y simultaneo de calor y masa acoplado
Santamouris	1995	Experimental	Transitorio	Movimiento simultaneo de calor
Kumar	2003	Análisis paramétrico/Experimental	Transitorio	Transferencia de calor y de masa acoplada
Sharan	2003	Experimental	-	-
Al-Ajmi	2005	Análisis paramétrico predictivo	Estable	Transferencia de calor acoplada (convección-conducción)
Hamada	2006	Análisis paramétrico/Experimental	Estable	Balance de energía (calor)
Bansal	2010	Análisis paramétrico predictivo	Transitorio	Balance de energía (calor)
Singh	2015	Experimental	-	-
Benhammoua	2015	Análisis paramétrico/Experimental	Transitorio	Balance de energía (calor)

1.3.1. Discusión sobre el estado del arte en EAHE

Entre los estudios sobre EAHE para México, destacan los trabajos de Xamán [22] y [23], que publica estudios numéricos que incluyen a la Ciudad de Mérida en su análisis. Sin embargo, resaltan también una serie de detalles que comprometen las conclusiones de sus trabajos.

- El tipo de suelo utilizado es arcilla, sin embargo, la roca caliza es característica del suelo yucateco.
- Las temperaturas ambientes utilizadas para su análisis representan un promedio mensual, por lo que las temperaturas utilizadas para el análisis están por debajo de las temperaturas que caracterizan a la ciudad.
- La profundidad de 10 m, que no es práctica para el karst, si bien es un sistema con potencial para instalarse en la Ciudad de Mérida considerar esa profundidad de enterramiento complicara la implementación debido a la dureza de las rocas que lo componen.
- Se asume que la temperatura del subsuelo permanece constante después de los 10 m y que corresponde a un promedio anual de las temperaturas ambiente.

Entre los objetivos de este trabajo, está también el establecimiento de una línea de base de las condiciones locales, que incluyen medir las temperaturas disponibles en el subsuelo a lo largo del año, estimar las propiedades térmicas del subsuelo, y establecer las condiciones ambientales en superficie para una evaluación más precisa del desempeño hipotético de la tecnología EAHE en Mérida.

JUSTIFICACIÓN

El aumento en el consumo de energía eléctrica de la Ciudad de Mérida y el alto costo asociado a este servicio está relacionado con el uso de los sistemas de A.A durante los meses con las máximas temperaturas del año (mayo, junio, julio). Si bien en primera instancia se trataría de un problema de eficiencia energética por falta de aislamiento, no se excluye la posibilidad de atacar el problema con tecnología alternativa de enfriamiento. Un área de oportunidad sería aprovechar la energía geotérmica de baja temperatura a través de intercambiadores de calor en el subsuelo a fin de disminuir el uso de los sistemas de enfriamiento convencionales. Para afirmar que esta tecnología es viable y eficaz en el acondicionamiento térmico de las viviendas es necesario evaluar la temperatura en el subsuelo, así como sus propiedades térmicas.

HIPÓTESIS

El consumo eléctrico en la península de Yucatán aumenta en las épocas de mayor temperatura debido al uso intensivo de sistemas de A.A basados en tecnología de compresión/expansión de gas refrigerante. Las temperaturas registradas a profundidad moderada, así como las propiedades térmicas del subsuelo kárstico, podrían aprovecharse para enfriar aire y así ayudar a reducir el ciclo de trabajo de sistemas convencionales de enfriamiento.

OBJETIVOS

Objetivo General.

Evaluar las propiedades térmicas del subsuelo para analizar la viabilidad de los intercambiadores de calor tierra-aire en Yucatán.

Objetivos Específicos.

- Desarrollar una metodología para medir gradiente térmico estacional en el subsuelo kárstico de Yucatán
- Obtener las propiedades termofísicas del subsuelo hasta una profundidad de 2 m (conductividad térmica, absorbanza y coeficiente de pérdidas térmicas por convección-radiación)
- Obtener temperaturas del acuífero.
- Analizar un EAHE simple mediante dinámica de fluidos computacional.

CAPÍTULO 2.

METODOLOGÍA.

La metodología propuesta para cumplir los objetivos y validar o refutar la hipótesis se compone de 4 etapas (Figura 2. 1.).

- Llevar a cabo la evaluación del gradiente térmico subterráneo a través de medidas experimentales en un sitio representativo del PCTY para conocer la variación de temperatura en función de la profundidad durante todo el año.
- Desarrollar un modelo matemático de transferencia de calor en el subsuelo considerando datos reales de radiación solar y temperatura ambiente correspondientes al sitio donde se tomaron las medidas experimentales.
- Posteriormente, los resultados obtenidos en el modelo de transferencia de calor y las mediciones de temperatura se obtienen las propiedades termofísicas reales del suelo a través de un ajuste por mínimos cuadrados.
- Finalmente, se utilizan las medidas experimentales para realizar una simulación numérica de dinámica de fluidos computacional (CFD) de un intercambiador de calor tierra - aire simple para conocer la capacidad de enfriamiento del sistema.

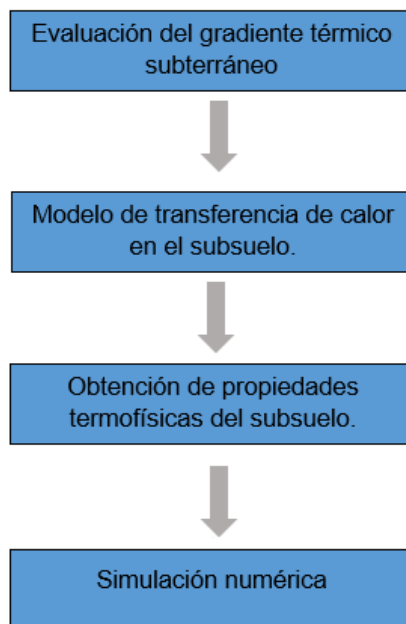


Figura 2. 1. Pasos de la metodología.

2.1. Evaluación de los Recursos Térmicos.

2.1.1. Modelo de transferencia de calor transitoria en el subsuelo kárstico.

La evaluación del recurso térmico disponible pasa por la caracterización in situ de las temperaturas del subsuelo. Estos datos a su vez pueden ser utilizados para estimar las propiedades térmicas locales. El set de parámetros obtenidos puede utilizarse para simular un sistema EAHE.

En consecuencia, el primer paso fue el desarrollo de un modelo analítico de transferencia de calor unidimensional mediante el método de los cuadripolos térmicos. Este modelo representa la transferencia de calor sobre un medio considerado a través de impedancias complejas en el espacio transformado de Fourier y/o Laplace. La temperatura y el flujo de calor tienen una relación que es representada a través de matrices con vectores de flujo y temperaturas considerando límites de frontera [40].

El modelo ofrece una solución analítica del problema de transferencia de calor en el dominio de la frecuencia y por medio de algoritmos de inversión numérica es posible obtener resultados en el dominio temporal.

2.1.1.1. Método de los cuadripolos térmicos.

Se consideró un bloque de un material sólido homogéneo del subsuelo constituido de roca caliza, con un espesor total (e) de 2.20m (Figura 2. **2jError! No se encuentra el origen de la referencia.**). Conocer la distribución de temperaturas en función de la profundidad (θ_z) fue de particular interés para los objetivos de este trabajo, se consideraron 6 diferentes profundidades a lo largo del bloque para la obtención de temperaturas $z_1=0$ m, $z_2=0.35$ m, $z_3=0.60$ m, $z_4=1.10$ m, $z_5=1.90$ m, y $z_6=2.10$ m. En el modelo, el suelo (en $z = 0$ m), recibe un flujo de calor inicial (ϕ_i) que está representado por la radiación solar ($Isol$), la temperatura ambiente (θ_a) y las pérdidas de calor por el fenómeno de convección-radiación (Z_h) ocurridas en la superficie, a su vez, el subsuelo libera un flujo de calor que sale de él definido como ϕ_f (en $z = 2.10$ m), a estos flujos corresponden las temperaturas T_i y T_f respectivamente. Se consideró que no existen pérdidas térmicas laterales, así como un transporte unidimensional, dado que el grosor del subsuelo es de mucho menos extensión que la superficie iluminada por el sol. Si bien el modelo no toma en cuenta la anisotropía

que pudiera presentar el terreno, si permite tener un acercamiento preciso de lo que serán las temperaturas promedio a distintas profundidades.

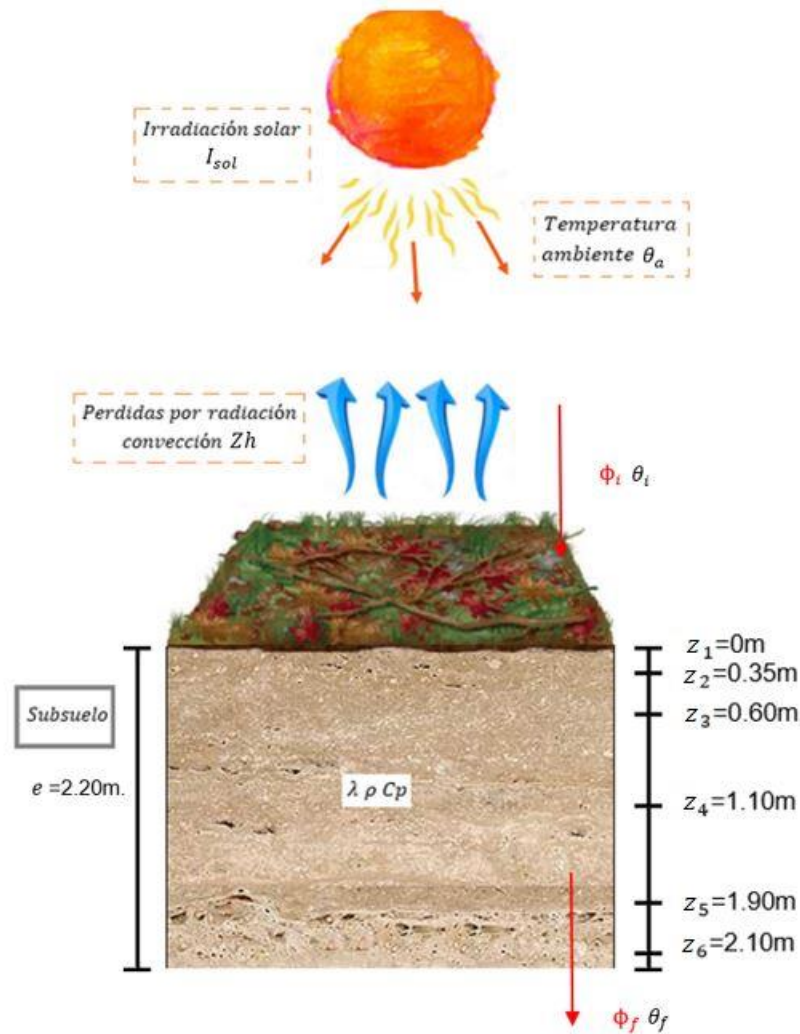


Figura 2. 2. Transferencia de calor en el subsuelo.

Además, se tomaron en cuenta las propiedades termofísicas de la roca caliza tales como la conductividad térmica λ , la difusividad térmica α , que está relacionada con la densidad ρ y el calor específico c , es decir, la capacidad calorífica volumétrica ρc .

La transferencia de calor en un cuerpo térmicamente homogéneo se expresa:

$$\frac{1}{a} \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad \text{con } t > 0 \quad (1)$$

En el modelo se considera que la temperatura inicial del medio es igual al promedio de las temperaturas reales registradas a 2.10 m de profundidad y ésta varía de acuerdo con los periodos de tiempo a evaluar.

$$T(z, t = 0) = T_{exp} \quad (2)$$

De tal forma que, el flujo de calor a cualquier profundidad del bloque (z), estará determinado por:

$$\phi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \quad (3)$$

Para eliminar la derivada de la ecuación se introducen las transformadas de Laplace para la temperatura y el flujo de calor:

$$\theta(z, p) = \int_0^{\infty} T(z, t) \exp(-pt) dt \quad (4)$$

$$\phi(z, p) = \int_0^{\infty} \phi(z, t) \exp(-pt) dt \quad (5)$$

Al utilizar el formalismo cuadripolar, los flujos de calor ϕ_i y ϕ_f y las temperaturas θ_i y θ_f transformadas pueden expresarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\begin{bmatrix} \theta_i \\ \phi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_f \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (6)$$

Con:

$$A = \cosh \beta e = D \quad (7)$$

$$B = \frac{\sinh(\beta e)}{\lambda \beta} \quad (8)$$

$$C = \lambda \beta \sinh(\beta e) \quad (9)$$

$$\beta = \sqrt{p/a} \quad e = \text{espesor} \quad (10)$$

Esta matriz caracteriza completamente al sistema. Los coeficientes A, B, C y D dependen del parámetro de Laplace p , del espesor del bloque e , y de las propiedades termofísicas que lo constituyen (λ, cp, α).

Asimismo, puede utilizarse una representación de red, la cual está constituida por impedancias térmicas complejas (Z_1, Z_2, Z_3) relacionadas con los coeficientes de la matriz (Figura 2. 3).

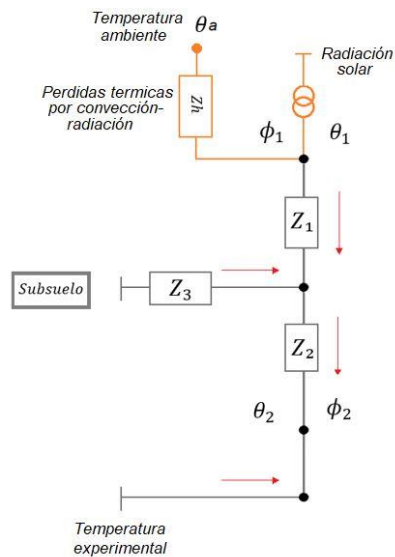


Figura 2. 3. Representación de red de impedancias.

Con:

$$Z_1 = \frac{A-1}{C}, \quad Z_2 = \frac{D-1}{C}, \quad Z_3 = \frac{1}{C} \quad (11)$$

Luego del análisis, se fijó el sistema matricial para el bloque a evaluar, además se tomó en cuenta que cuando el argumento en la función hiperbólica se vuelve demasiado grande el cálculo de la función es imposible debido a que se producen problemas numéricos ya que el valor del argumento βe debe ser menor a 700, dicho de otra forma, el espesor del bloque (e) no debe exceder los milímetros [41]. Así pues, considerando el espesor de nuestro sistema se reescribieron las funciones de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} \exp(-\beta e)\theta_i \\ \exp(-\beta e)\phi_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_f \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (12)$$

Donde la densidad de flujo de calor en la superficie ϕ_i esta influenciada por la irradiación solar (I_{sol}), la temperatura ambiente (θ_a) y las perdidas térmicas por convección (Z_h) .

$$\phi_1 = I_{sol} + \frac{\theta_a}{Z_h} - \frac{\theta_i}{Z_h} \quad (13)$$

$$\mathcal{R}a = I_{sol} + \frac{\theta_a}{Z_h} \quad (14)$$

$$\therefore \phi_i = \mathcal{R}ad - \frac{\theta_i}{Z_h} \quad (15)$$

Se resalta que el término Rad contiene en práctica los datos de radiación solar y temperatura ambiente provenientes de una estación meteorológica (CINVESTAV-PCTY).

Sustituyendo 15 en 16 obtenemos:

$$\begin{bmatrix} \exp(-\beta e)\theta_i \\ \exp(-\beta e)Rad - \frac{\theta_i}{Z_h} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_f \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (16)$$

Al resolver la matriz, se obtuvo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\exp(-\beta e)\theta_i = A\theta_f + B\phi_f \quad (17)$$

$$\exp(-\beta e)\left(Rad - \frac{\theta_i}{Z_h}\right) = C\theta_f + D\phi_f \quad (18)$$

A partir de la ecuación 17 se despeja ϕ_f :

$$\phi_f = \frac{\theta_i \exp(-\beta e)}{B} \quad (19)$$

Luego, al sustituir ϕ_f en la ecuación 15, se obtiene θ_i :

$$\theta_i = \frac{Rad B Z_h}{D(Z_h + B)} \quad (20)$$

Finalmente, para el cálculo de la temperatura a cualquier profundidad ($z_1 \dots z_6$), se utilizaron ϕ_f y θ_f , obtenidas anteriormente, siguiendo un procedimiento similar.

$$\begin{bmatrix} \theta_z \\ \phi_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_z & B_z \\ C_z & D_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_f \\ \phi_f \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\theta_z = \exp(\beta e)(A_z * \theta_f) + (B_z * \phi_f) \quad (22)$$

$$\phi_z = \exp(\beta e)(C_z * \theta_f) + (D_z * \phi_f) \quad (23)$$

2.1.1.2. Resultados de la Simulación.

Después de realizar el modelo matemático, se utilizó el programa MATLAB como herramienta de simulación para obtener los cálculos de la temperatura a diferentes profundidades del subsuelo, el cual se caracterizó por las propiedades presentadas en la Tabla 2. 1.

Tabla 2. 1. Propiedades termofísicas del subsuelo [18] [42].

Material	Conductividad térmica W/m K	Calor específico J/kg K	Absorbancia	C. de perdidas térmicas W/m²	Difusividad térmica m²/s
Caliza	2.3	1000	0.57	35	9.50E-07

Debido a que los datos meteorológicos presentes en la variable Ra del modelo no podía ser representada matemáticamente en el espacio de Laplace, se introdujo una función escalón unitario como función de excitación de entrada en su lugar (ecuación 24), para llevar la función al espacio transformado Laplace-Fourier.

$$\mathcal{L} = \{u(t - a)\} = \frac{e^{-sa}}{s} \quad (24)$$

Una vez que las temperaturas y el flujo de calor están en el espacio transformado de Laplace-Fourier, es necesario regresar la temperatura al dominio del espacio-tiempo, esto se llevó a cabo a través del algoritmo de inversión numérica de Denlseger [43].

Por último, se realizó el proceso de convolución de la respuesta al impulso (ecuación 25), utilizando datos de radiación solar correspondientes a diferentes meses (noviembre y diciembre 2017, y enero, febrero, marzo 2018) así como datos sobre la temperatura ambiente (CINVESTAV-PCTY) los cuales fueron muestreados a intervalos de 15 minutos.

$$w(k) = \sum_j u(j)v(k-j+1) \quad (25)$$

Los parámetros de entrada para el cálculo fueron los siguientes:

Tabla 2. 2. Parámetros de entrada de la simulación.

Densidad (ρ)	2400 kg/m ³
Espesor total (e)	2.20 m
Profundidades (z)	0.01m, 0.35m, 0.60m, 1.10m, 1.90m, 2.10m
Tiempo (t)	No. De días en minutos
Tasa de muestreo (dt)	15 min
Temperatura base (θ_f)	Variable

Como resultado, se obtuvo el valor de las seis temperaturas correspondientes a las distintas profundidades. La simulación de la transferencia de calor permitió conocer la dinámica de la carga y descarga de calor en el subsuelo en función del tiempo.

Con el objetivo de conocer una profundidad adecuada para medir el gradiente térmico del subsuelo, se calculó la profundidad de penetración térmica utilizando la ecuación 26 [44]:

$$\delta = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}} \quad (26)$$

Con $\omega = 2\pi f$

Donde α es la difusividad térmica del medio y ω es la frecuencia (rad/s) para la cual se consideraron valores correspondientes a periodos de 15 min, 1 h, 24 h y 1 año, los resultados fueron los siguientes:

Tabla 2. 3. Profundidad de penetración térmica en el subsuelo.

Profundidad de penetración	
1 año	3.101 m
24 h	0.162 m
1 h	0.033 m
15 min	0.016 m

Algunos resultados representativos de la simulación de las temperaturas se muestran a continuación:

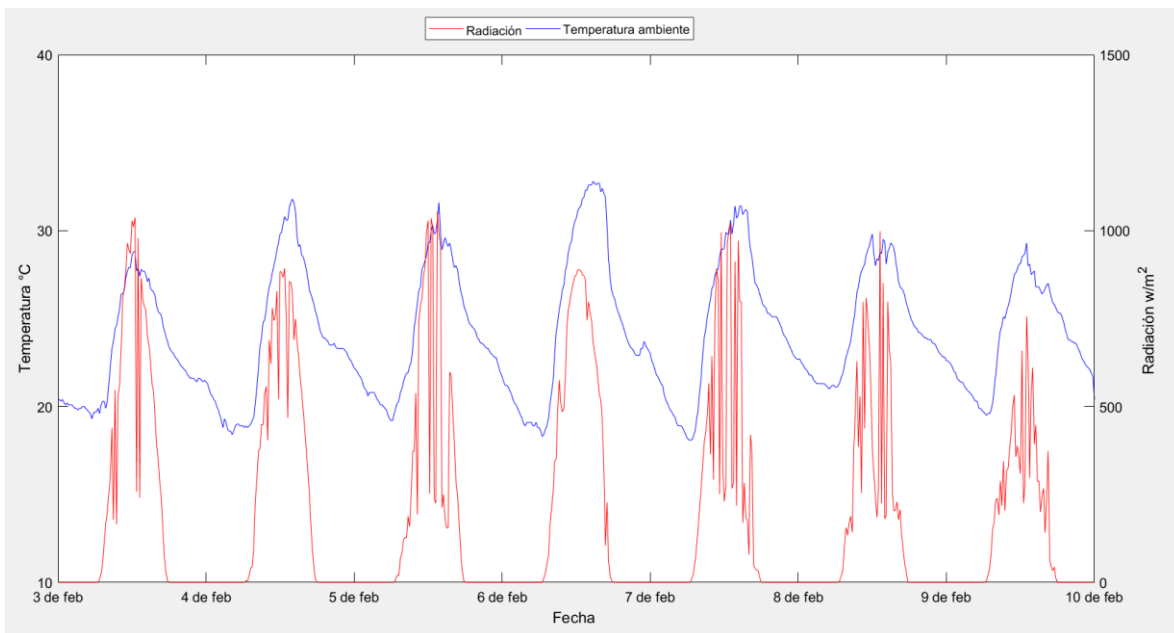


Figura 2. 4. Datos de temperatura ambiente y radiación (datos normalizados).

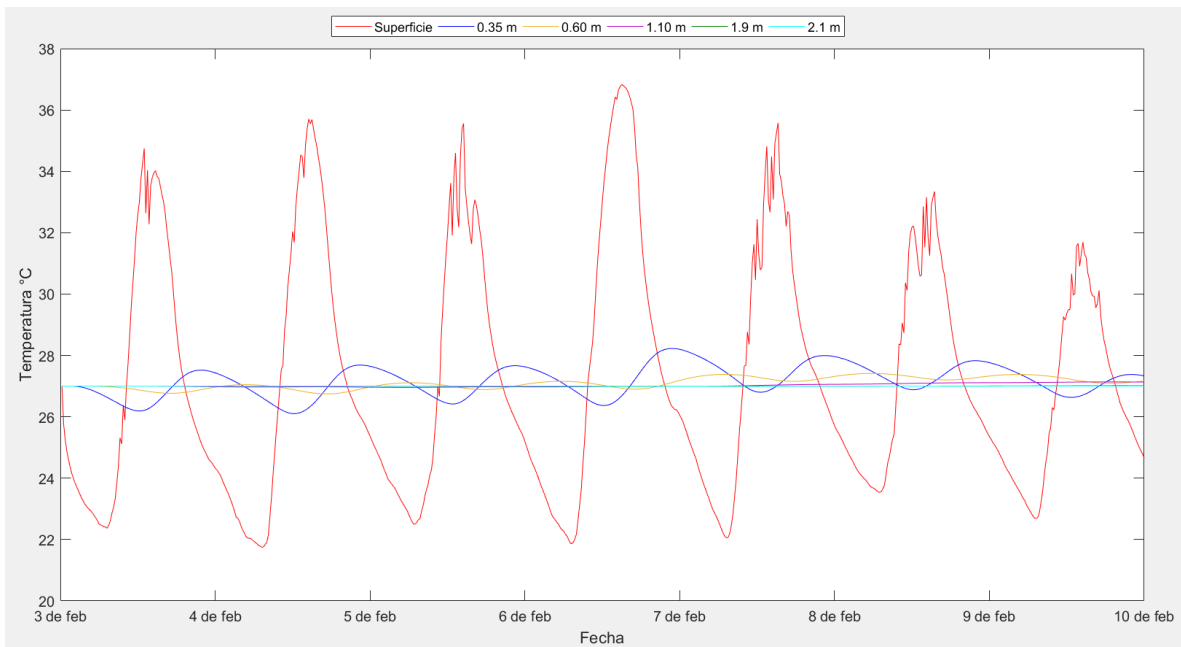


Figura 2. 5. Cálculo de la temperatura 3 a 9 de febrero 2018.

La Figura 2. 4, representa los datos reales de temperatura ambiente y radiación solar correspondientes a los días 3 a 9 de febrero obtenidos de la estación meteorológica CINVSTAV-PCTY los cuales fueron utilizados como impulso de entrada en el modelo matemático para el cálculo de las temperaturas, es posible observar que el nivel más alto de radiación se presenta el día 5 de febrero y el menor nivel corresponde al día 9 de febrero, todos los días presentaron nubosidad excepto el 6 de febrero, un día mayormente soleado y por consiguiente el día con mayor temperatura ambiente. La Figura 2. 5 **Figura 2. 5**, muestra las temperaturas calculadas para el día 3 al 9 de febrero, es posible advertir que cerca de la superficie la dinámica de carga y descarga es mayor. A partir de la superficie y hasta una profundidad de 1.10 m las variaciones disminuyen en amplitud y por debajo de esta profundidad la temperatura exhibe variaciones casi imperceptibles para períodos de 24 horas.

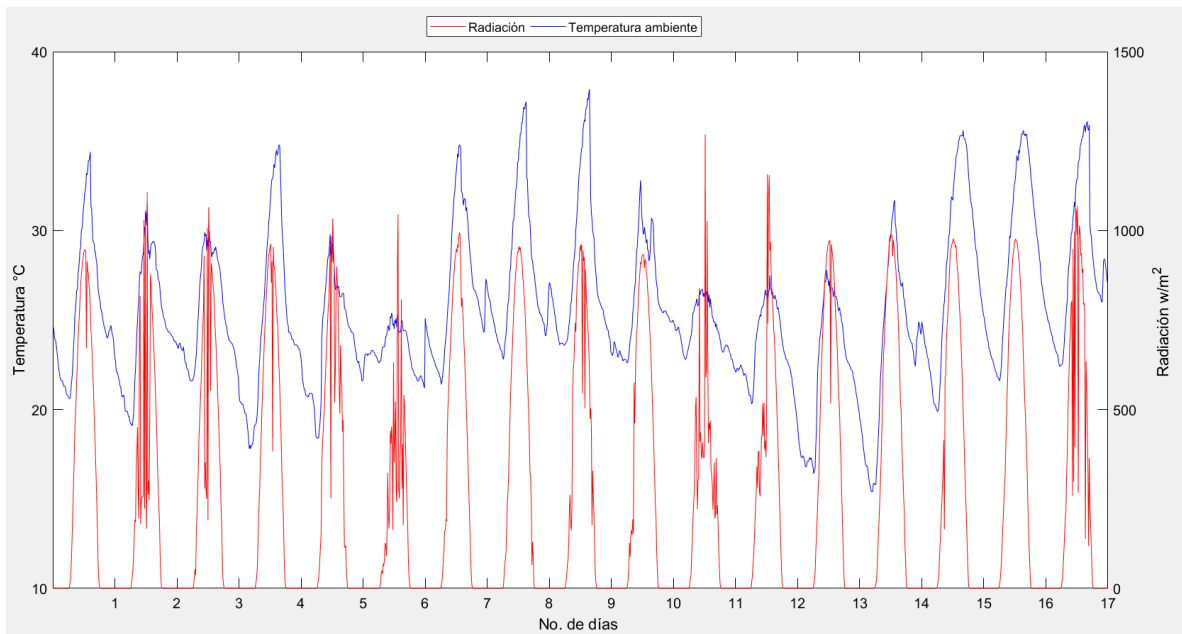


Figura 2. 6. Datos de temperatura ambiente y radiación (datos normalizados).

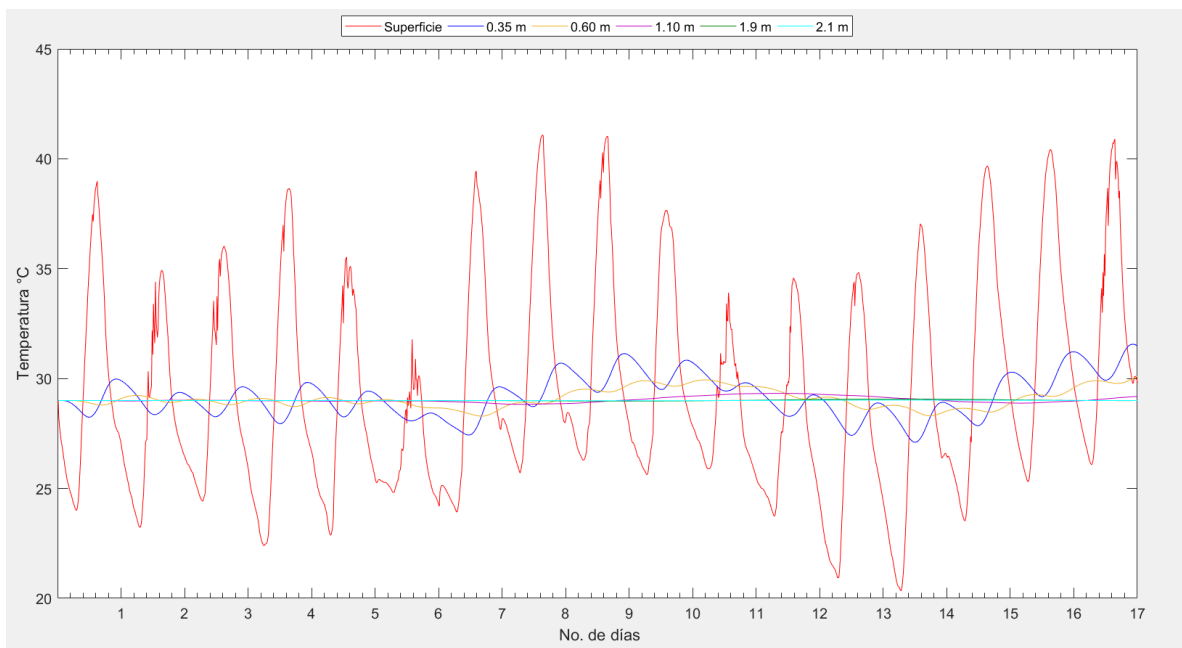


Figura 2. 7. Cálculo de la temperatura para 17 días del mes de marzo.

La Figura 2. 6, representa los datos reales de temperatura ambiente y radiación solar correspondientes a 17 días del mes de marzo los cuales fueron utilizados como impulso de

entrada en el modelo matemático, como se puede observar, durante la primavera los niveles de radiación aumentan por encima de los 1000 w/m², además se percibe que durante los 17 días del mes de marzo predominaron los días nubosos los cuales presentan una temperatura ambiente menor comparados con los días soleados que alcanzaron una temperatura mayor a los 35.0 °C. La Figura 2. 7, muestra los resultados de la simulación para 17 días del mes de marzo, donde es posible tener una mejor visión de las variaciones en la dinámica de carga y descarga. Las figuras de las temperaturas calculadas para octubre, noviembre, diciembre, y enero pueden ser consultadas en el ANEXO III.

Es importante resaltar que el comportamiento de las temperaturas calculadas a través de la simulación coincide con la dinámica de carga y descarga obtenida de las medidas experimentales. No obstante, existen ligeras variaciones en la magnitud de la temperatura, debido a que los parámetros de entrada para la simulación (Tabla 2. 2) fueron datos tomados de la literatura. Sin embargo, las propiedades características reales del subsuelo podrán obtenerse mediante el uso de un método inverso que minimice las diferencias entre el modelo y las mediciones.

A priori, destacan 3 parámetros de interés que habrán de ajustarse para minimizar las diferencias: la conductividad térmica del subsuelo, la absorbancia superficial y el coeficiente de pérdidas térmicas de convección-radiación.

2.1.2. Medición anual del gradiente térmico subterráneo

Una vez que la transferencia de calor en el subsuelo ha sido modelada, se procede a una evaluación in situ de los recursos térmicos disponibles. Eso implica recolectar la siguiente información:

- Temperaturas a distintas profundidades de interés, a lo largo de un año.
- Obtener la verdadera línea base que tendría un sistema EAHE, a saber, las temperaturas más bajas disponibles, tanto en el subsuelo, como en el ambiente.

El gradiente térmico subterráneo o geotérmico, es el cambio de temperatura en función de la profundidad y está expresado en °C/km [45]. Para dar inicio con la evaluación del gradiente geotérmico, se eligieron dos sitios cercanos y de fácil acceso en el parque

Científico y Tecnológico de Yucatán, como pozos prueba para tomar algunas mediciones de temperatura. El primero corresponde a un pozo de agua cercano a la biblioteca del PCTY y el segundo a un cenote ubicado en los terrenos del CINVESTAV (Figura 2. 8). Para las mediciones se utilizó un termistor NTC cableado (resolución 0.03 °C a 25.0 °C y un multímetro.



Figura 2. 8. Ubicación de los pozos prueba y herramientas de medición.

Las primeras temperaturas fueron registradas durante algunos días en el mes de mayo, junio y noviembre alrededor de las 3 de la tarde. Para el pozo de la biblioteca central, las mediciones se efectuaron en dos puntos: sobre el nivel del suelo y dentro del acuífero, el cual se encuentra a una profundidad aproximada de 2 m, los datos obtenidos se muestran en la Tabla 2. 4.

Tabla 2. 4. Mediciones obtenidas del pozo biblioteca PCTY.

Pozo	29/05/17	30/05/2017	31/05/1017	01/06/2017	6/11/17
Biblioteca					
T. Superficie	38	36	32	31	-
°C					
T acuífero	28	28	28	28	25
°C					

Es posible observar que, aunque la temperatura de la superficie experimenta variaciones diarias, la temperatura del manto acuífero permanece constante. Esto significa que a esta profundidad el gradiente térmico está influenciado en menor medida por los factores ambientales (radiación solar y la temperatura ambiente). Además, la diferencia de temperatura entre estos dos puntos de medición puede variar desde los 3 hasta los 10.0 °C, dicho de otra forma, hay una diferencia marcada en las temperaturas de acuerdo con la fecha de medición. Cabe mencionar que el pozo integra una tubería larga de PVC que va de la superficie al punto más bajo de medición, ésta actúa como un puente térmico entre ambos puntos, es decir la presencia de la tubería no afecta las mediciones de temperatura del subsuelo. La temperatura más baja del acuífero se registró en el mes de noviembre (25.0 °C).

Las mediciones en el cenote se realizaron en 3 puntos: sobre la superficie (suelo), sobre la superficie del agua (justo antes de tocarla), y dentro del manto acuífero, el cual se encuentra a profundidad aproximada de 4 m. La temperatura de la superficie tuvo variaciones diarias derivadas del contacto directo con la radiación, el aire y la temperatura ambiente, mientras que la temperatura del acuífero se mantuvo constante, además, se observó que la temperatura más baja fue la registrada sobre el acuífero, como se muestra a continuación:

Tabla 2. 5. Mediciones obtenidas en cenote PCTY.

Fecha	29/05/17	30/05/17	31/05/17	01/06/17	6/11/17
T Superficie °C	36	32	34	32	-
T Sobre el manto acuífero °C	-	26	27	27	22
T acuífero °C	27	27	27	27	25

En ambos sitios de medición la temperatura superficial tuvo un comportamiento similar, sin embargo, la registrada en el pozo de la biblioteca fue más elevada que la obtenida en la superficie del cenote durante algunos días. Esto podría deberse a la presencia de concreto y menor grado de vegetación alrededor del pozo o de la biblioteca mientras que la pequeña diferencia entre las temperaturas del acuífero de ambos pozos puede ser ocasionada por

el revestimiento de PVC (diámetro de 14.16 cm) del pozo de la biblioteca y a una mayor columna de aire presente en el cenote. Las primeras cuatro mediciones fueron realizadas durante la primavera (mayo- junio) y la última en otoño (noviembre) del año 2017, razón por la que el gradiente térmico tanto de la superficie como del acuífero se ve disminuido.

La temperatura a proximidad de la superficie del agua es un resultado interesante, por ser la más baja. Este fenómeno podría estar relacionado con el calor latente de evaporación en la superficie, lo que reduce la temperatura de la capa de aire más cercana al agua. Esta observación merece mayor atención, pero su estudio cae fuera de los objetivos de este trabajo.

Estos registros preliminares se llevaron a cabo en sitios de escasa o nula vegetación (pozo cercano a la biblioteca, rodeado de concreto), vegetación moderada (cenote en terrenos de CINVESTAV-PCTY), por lo que en abril del año 2018 se realizó la medición de temperatura dentro de la cueva del jardín botánico Roger Orellana del CICY (Mérida). La cueva se ubica en una zona semi arbolada rodeada de una vegetación más abundante y de mayor altitud que la presente en el PCTY, por lo que la radiación absorbida debe verse fuertemente atenuada en esa zona. Asimismo, tiene una profundidad aproximada de 4 m y dentro de ella se registró una temperatura de 25.3 °C a las 5 pm mientras que la temperatura ambiente era de 33.0 °C (Figura 2. 9).



Figura 2. 9. Cueva del jardín botánico Roger Orellana, CICY-Mérida.

Esta información confirmó que la temperatura de referencia del subsuelo oscila entre los 25 y 27 °C, este rango corresponde a temperaturas confortables para las personas de acuerdo con el estudio de Al-Ajmi [8] el cual fue tomado como referencia para este trabajo, ya que compartía similitud con la información sobre sensación térmica obtenida de la encuesta, por lo que, a priori se podría contemplar la implementación de un intercambiador de calor. De entrada, se observa que la línea de base es similar a la utilizada por Xamán ya que considera una temperatura de 26.0 °C durante todo el año para las simulaciones hechas para Mérida, sin embargo, la temperatura no se mantiene constante y cambia a lo largo del año, por esta razón, es pertinente reevaluar el desempeño para condiciones acordes a la realidad local. En ese sentido, fue necesario continuar midiendo durante un periodo de tiempo de un año para conocer con mayor exactitud las variaciones de temperatura.

Por lo tanto, para conocer los cambios en la temperatura respecto al tiempo y en función de la profundidad de una forma más precisa, se seleccionaron dos sitios de monitoreo:

- Uno desprovisto de cobertura vegetal (PCTY).
- Otro con cobertura vegetal densa (jardín botánico de CICY)

El primero es un sitio sin cobertura vegetal, libre de sombra y que se encuentra rodeado de pavimento, como ocurre en muchos fraccionamientos de la Ciudad de Mérida. Siguiendo estas características, se consideró como sitio potencial la rotonda ubicada frente al edificio de laboratorios de sistemas híbridos de CICY-PCTY (Figura 2. 10). Cabe mencionar que un sitio de esas condiciones presentará las variaciones superficiales más acentuadas, lo que a su vez permitirá hacer una caracterización de propiedades del suelo más precisa.

El sitio del Jardín Botánico nos acercaría a las condiciones de mayor frescor naturalmente disponible en el subsuelo, dado el mayor bloqueo de la radiación incidente por parte de los árboles, por lo que, para las estimaciones de desempeño de un EAHE, se considerará que el recurso de menor temperatura disponible en el subsuelo es de 25.0 °C, de acuerdo con lo registrado en la cueva del jardín.

De acuerdo con el cálculo de la sección anterior, la profundidad máxima de penetración durante todo el año es de 3 m por lo que después de esta profundidad el gradiente térmico debería ser constante durante todo el año (variación estacional).

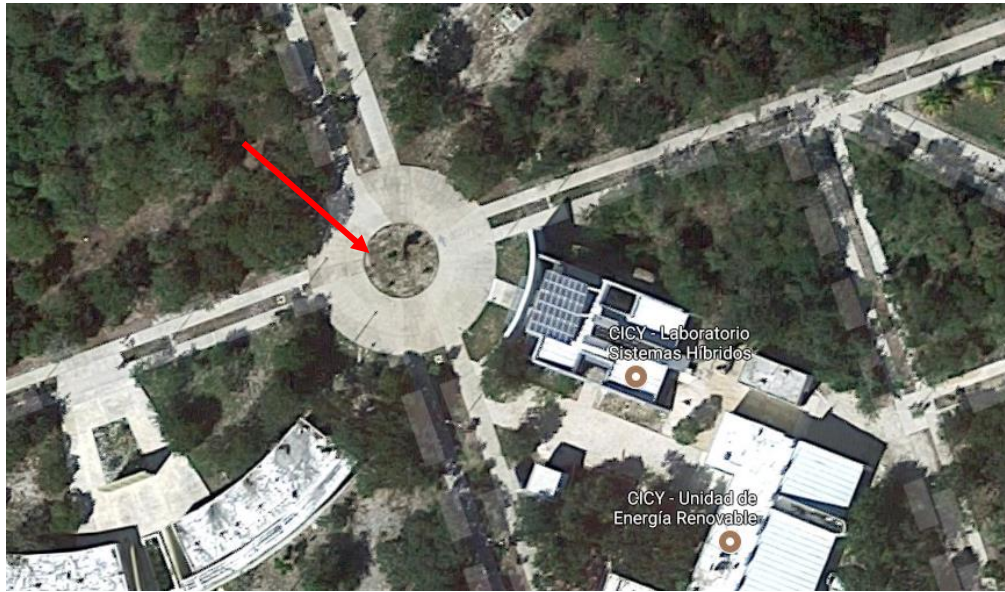


Figura 2. 10. Sitio de medición. UER CICY-PCTY.

Con base en la estimación de la profundidad máxima de penetración térmica, se realizó la perforación de 6 pozos (de diámetro aproximado de 5 cm) a diferentes profundidades. Estos fueron realizados con una perforadora para pozos de agua, sin embargo, días después de haber hecho la perforación algunos pozos colapsaron o bien perdieron profundidad. Este fue el caso del pozo a 3 m donde se pudo rescatar una profundidad de 2.10 m. Los pozos de acuerdo con su profundidad se ubican de la siguiente manera en la rotonda del PCTY cercana al edificio LENERSE:



Figura 2. 11. Ubicación y profundidad de las perforaciones.

Para la medición y registro de temperatura, se utilizaron aproximadamente 25 m de cable termopar tipo k, dos sistemas de registro de datos de temperatura hh309a Omega y dos baterías data shield de 12 V para el suministro de energía. La tasa de muestreo para la grabación de temperatura se realizó cada 15 minutos y se comenzó a grabar en el mes de septiembre del año 2017 (Figura 2. 12). Simultáneamente se recabaron datos de la temperatura del ambiente, humedad, velocidad del viento, tasa de precipitación, precipitación acumulada y radiación solar de las estaciones meteorológicas de CINVESTAV-PCTY [11].



Figura 2. 12. Aparatos de medición

2.1.2.1. Calibración de los sensores y ajuste de los registradores de datos.

Para tener menor incertidumbre en las mediciones, se realizó la calibración de los termopares colocándolos en un recipiente con agua. Se evaluó la variación del aumento de temperatura al calentar el agua a través de una célula peltier conectada a una fuente de poder y posteriormente la variación en la disminución de la temperatura al enfriarla. Se tomó como temperatura de referencia, la obtenida a partir de un termistor NTC 55016 conectado a un multímetro. La temperatura fue muestreada cada 15 segundos, con el objetivo de obtener un diferencial de temperatura para cada cable. El ajuste de los registradores de datos llevó un procedimiento similar realizado en el departamento de metrología del CICY. Se utilizó hielo fabricado con agua destilada dentro de un recipiente aislado térmicamente, se conectaron cables termopares a los sistemas de adquisición y se tomó como temperatura de referencia un termómetro de platino y un termopar tipo k. Después que la temperatura

estuvo estable en los 0 °C se reguló el botón de ajuste de los registradores hasta que la temperatura de éste coincidiera con la temperatura de referencia, más tarde se probaron utilizando agua a temperatura ambiente ocupando un termistor NTC 55016 como temperatura de referencia.



Figura 2. 13. Calibración y ajuste de data loggers.

2.1.2.2. Análisis de datos experimentales.

Las siguientes graficas (Figura 2. 14, Figura 2. 15, Figura 2. 16, Figura 2. 17 y Figura 2. 18) presentan las temperaturas registradas por los sensores colocados en el PCTY. La línea en color rojo representa la temperatura ambiente obtenida a través de datos de la estación meteorológica CINVESTAC-PCTY. La línea gris corresponde a la temperatura de superficie y su comportamiento está fuertemente asociado con la temperatura ambiental y fenómenos meteorológicos, como la precipitación, frentes fríos, etc. La línea morada representa la temperatura a 35 cm de profundidad, la café a 60 cm, la verde a 1.10 m, la azul a 1.90 m y la naranja a 2.12 m. Todas las temperaturas fueron muestreadas en intervalos de 15 minutos.

A continuación, se muestran algunas gráficas de temperatura del subsuelo correspondientes a distintos periodos de tiempo durante el año en que se realizó el registro de datos.

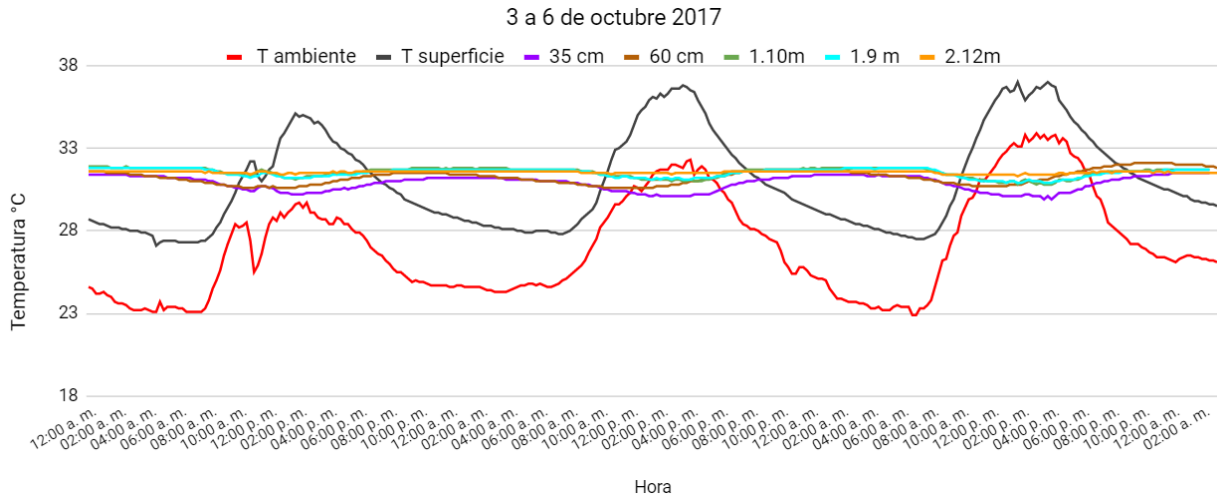


Figura 2. 14. Temperaturas subsuelo y ambiente 3 a 6 de octubre 2017.

En la Figura 2. 14 corresponde a las mediciones de temperatura del subsuelo tomadas del 3 al 6 de octubre del 2017. Es posible observar que la temperatura de la superficie (T superficie) es mayor que la temperatura ambiental. Esto se debe a la capacidad calorífica de la roca, es la temperatura con el ciclo de carga y descarga de calor más rápido y sus cambios están fuertemente asociados con la temperatura ambiente y fenómenos meteorológicos, como la precipitación, frentes fríos, etc.

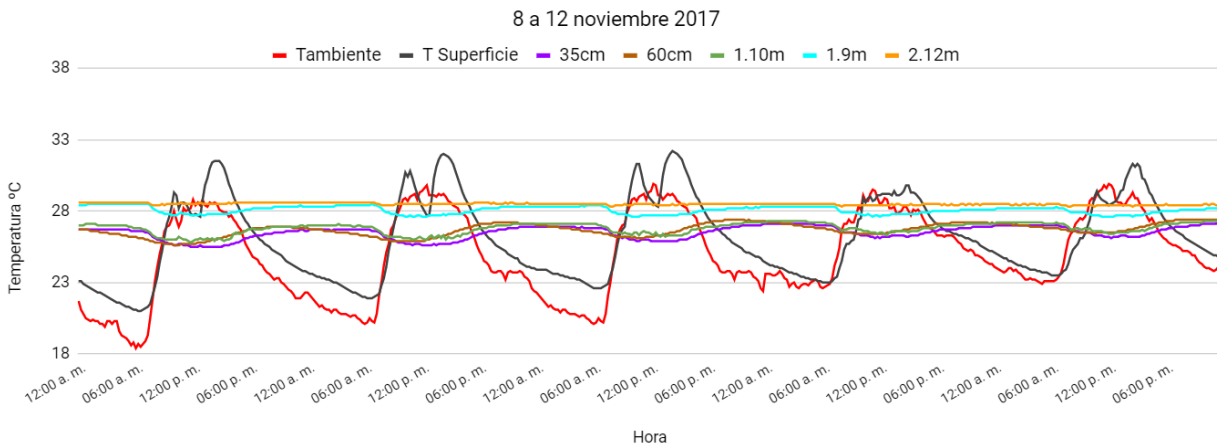


Figura 2. 15. Temperaturas subsuelo y ambiente del 8 al 12 de noviembre 2017.

La Figura 2. 15 muestra las temperaturas de los días 8 al 12 de noviembre del 2017, donde la temperatura cercana a la superficie (superficie, 0.35 y 0.60 cm) es más baja que la temperatura registrada luego de 1.10 m de profundidad, esa temperatura es de alrededor de 29 °C y corresponde al calor almacenado por la roca. Debido a que el proceso de carga y descarga de calor en el subsuelo es muy lento, esa temperatura pudo haberse generado durante el verano y conservar su gradiente durante una buena parte del otoño a pesar de que el ambiente presente temperaturas inferiores a las del verano.

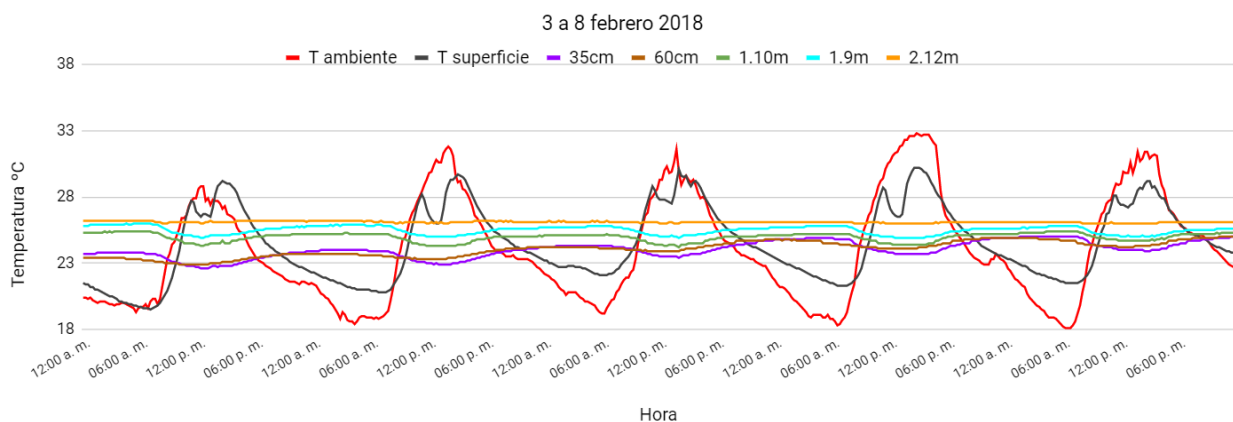


Figura 2. 16. Temperaturas subsuelo y ambiente del 3 al 8 de febrero 2018.

La Figura 2. 16 representa las temperaturas registradas del día 3 al 8 de febrero del 2018, donde se aprecia un comportamiento similar a las figuras anteriores. La temperatura del subsuelo luego de 1.10 m sigue conservando una temperatura superior a la de la superficie, sin embargo, pasó de tener una temperatura de 29.0 °C a 27.0 °C. Nótese como las temperaturas en la capa superficial son menores a las de la línea base de mayor profundidad.

De estas observaciones se desprende la posibilidad de favorecer el intercambio de calor subsuelo-aire ambiente durante los momentos en que la temperatura del ambiente sea menor que la del subsuelo y evitar el intercambio durante los momentos en que la temperatura ambiente sea mayor que la del subsuelo. Sería una especie de almacenamiento selectivo, que solo implique almacenar el “frío” (definido como una

diferencia negativa entre la temperatura ambiente y la del subsuelo) cuando esté disponible. Este esquema, fuera de los objetivos de este trabajo, se discute en la sección de perspectivas.

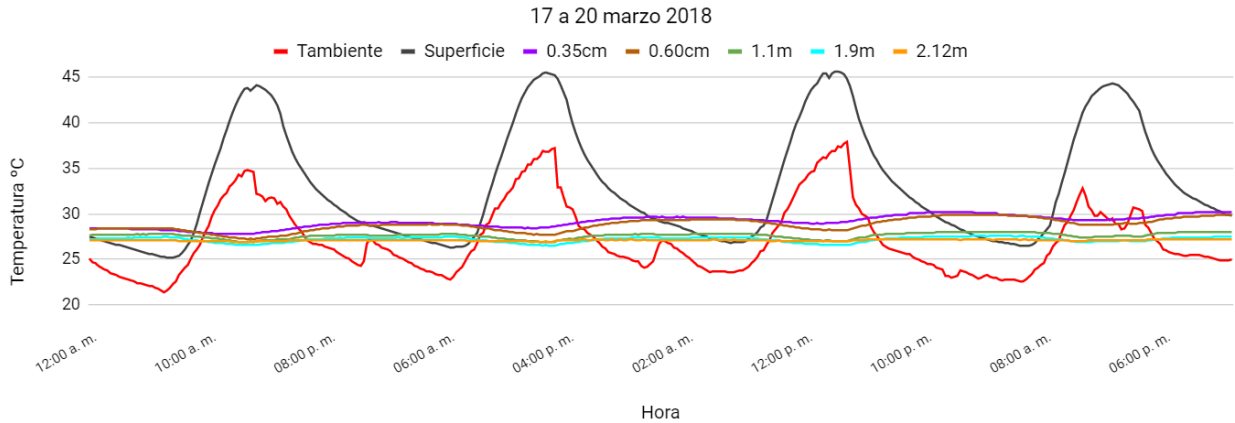


Figura 2. 17. Temperaturas subsuelo y ambiente 17 a 20 marzo del 2018.

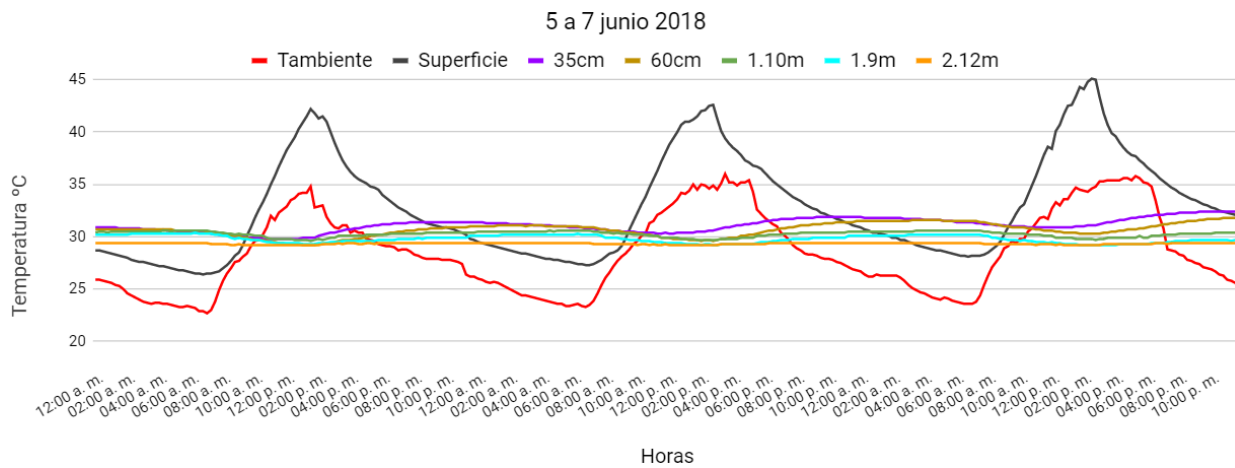


Figura 2. 18. Temperaturas subsuelo y ambiente 5 a 7 de junio del 2018.

A partir del inicio de la primavera (Figura 2. 17 y Figura 2. 18) se puede apreciar el comienzo de un proceso inverso, es decir la temperatura cerca de la superficie comienza a ser mayor debido al aumento de la temperatura ambiente y la temperatura por debajo de 1.10m comienza a descender hasta llegar a los 27.0 °C, gradiente originado durante el invierno.

De acuerdo con el análisis de las gráficas la transferencia de calor desde la superficie hacia el subsuelo durante el día tiene un periodo de carga y descarga de calor similar a un ciclo

sinusoidal de amplitud variable, a medida que la temperatura ambiente aumenta, la amplitud del ciclo incrementa, en las figuras es posible apreciar que este ciclo térmico varía en función de la profundidad sufriendo cierto retraso de fase debido a la inercia térmica de la roca, dicho de otra forma, el calor que se acumula en la superficie durante el día, se transfiere en menor cantidad y de una manera más lenta hacia la profundidad, tanto que, cuando la temperatura es máxima en la superficie, la temperatura a 0.35 m de profundidad se acerca a la mínima temperatura y así sucesivamente.

Es posible observar que, durante la primavera, la temperatura ambiental y la de la superficie del suelo es mayor que la temperatura a 2 m de profundidad, esto se debe a que el proceso de transferencia de calor en el subsuelo es muy lento, por lo que el gradiente térmico registrado a 2 m de profundidad corresponde al generado durante el invierno y ha conservado su temperatura durante una parte de la primavera, a pesar de que el ambiente presente temperaturas altas. Durante el verano el gradiente térmico a 2 m de profundidad presenta una elevación en su temperatura derivada de las altas temperaturas registradas en primavera, no obstante, la temperatura a 2 m de profundidad sigue siendo menor que la temperatura ambiente. Finalmente, en el otoño e invierno el proceso se invierte, la temperatura cerca de la superficie es menor debido a la disminución de la temperatura ambiente y la temperatura luego de 2 m es mayor, a causa del gradiente originado durante el verano.

Los datos de todos los meses muestreados y sus gráficas correspondientes se encuentran siguiendo el enlace ubicado en el ANEXO II.

2.1.2.3. Observaciones.

- Durante el otoño e invierno (octubre-febrero) la temperatura más baja fue de 16.0 °C y se encontró en la superficie, esta se registró durante el mes de diciembre a las 6:30 am. Diciembre presentó varios días con temperaturas similares (ANEXO II), este comportamiento se relaciona con los frentes fríos ocurridos en la temporada.
- La temperatura desde la superficie aumentó en función de la profundidad, manteniendo una temperatura aproximada de 29.0 °C a los 2.10 m de profundidad, sin embargo, no se mantuvo constante ya que para el mes de noviembre la temperatura disminuyó a 27.0 °C.

- La temperatura en la superficie comenzó a aumentar durante la primavera y la dinámica de carga y descarga de calor se invirtió, por lo que la temperatura empezó a disminuir en función de la profundidad.
- La variación más importante de temperatura se encuentra en la superficie y comprende los primeros 60 cm.
- La temperatura a 2.10 m (27.0 °C) se mantuvo constante desde el mes de noviembre hasta febrero, sin embargo, para finales del mes de marzo aumentó hasta quedar cerca de los 30.0 °C, por lo que se deduce que el gradiente térmico a 2.10 m no es constante durante todo el año ya que a esa profundidad la temperatura del subsuelo sigue siendo afectado por los fenómenos atmosféricos.
- Con base en los datos obtenidos, se puede afirmar que durante los meses de octubre a febrero el uso de un intercambiador de calor aire -tierra no funcionará como sistema de enfriamiento sino de calentamiento, debido a que la temperatura ambiente mínima registrada fue de 11.9 °C y la del subsuelo de 28.0 °C a una profundidad de 2 m, al utilizar el intercambiador de calor el aire ganaría calor durante su recorrido, es decir, aumentaría su temperatura hasta alcanzar una temperatura similar a la del subsuelo.
- El gradiente térmico registrado a 2.1 m durante la primavera (aprox. 30.0 °C) es menor que la temperatura ambiente presente durante la temporada, sin embargo, el gradiente no es suficiente para brindar confort térmico, razón que vuelve poco viable la implementación de los intercambiadores de calor en sitios desprovistos de vegetación, lo que excluiría la viabilidad de la tecnología para muchos fraccionamientos de la Ciudad de Mérida.
- Una de las temperaturas más bajas obtenidas, fue la registrada en el cenote, en la transición aire-agua, hecho que evidencia la gran capacidad calorífica del subsuelo yucateco en su conjunto agua + roca, por tanto, los sitios con características similares permiten contemplar otras alternativas de implementación de un intercambiador de calor las cuales se discuten en el apartado de perspectivas.

2.1.3. Obtención de propiedades termofísicas del subsuelo.

La evaluación de la difusión y absorción de calor en el subsuelo requiere el conocimiento de las propiedades térmicas de las rocas que lo componen. La estimación de los parámetros termofísicos se realizó a través de un método inverso, utilizando los datos de temperatura

real, adquiridos experimentalmente (T_{exp}) en conjunto con los resultados del modelo de cuadripolos térmicos (T_{cal}) con el objetivo de obtener la conductividad térmica (λ) la absorbancia (A) y el coeficiente de pérdidas térmicas por convección-radiación (h). La absorbancia térmica es la parte de la radiación total que absorbe un cuerpo, la conductividad térmica mide la capacidad que tiene un cuerpo de conducir calor y el coeficiente de transferencia de calor por convección-radiación establece la tasa de transferencia de calor entre una superficie y un fluido a diferente temperatura.

2.1.3.1. Análisis de coeficientes de sensibilidad.

Es necesario conocer, corregir y/o reducir los errores en las mediciones obtenidas para la solución del problema inverso. Los errores pueden ser caracterizados utilizando algunos supuestos estadísticos, que se pueden enumerar, verificar y cuantificar. Para esto, es necesario filtrar las mediciones sobre los errores de medición y seleccionar una función objetiva apropiada para la minimización [46]. El método que ayuda a determinar qué parámetros pueden ser estimados involucra el estudio de los coeficientes de sensibilidad, por esta razón, se realizó un análisis de la sensibilidad de las respuestas a las variaciones en algunos parámetros de interés con el propósito de encontrar las mejores condiciones para su estimación. Con el propósito de generar los coeficientes de sensibilidad, se realizó la linealización de los parámetros de interés, escribiendo el desarrollo de primer orden de la temperatura:

$$T = T_0(z, \theta_a, t, I_{sol}, B_0) + X\Delta B = T_0(z, \theta_a, t, I_{sol}, \bar{\lambda}, \bar{A}, \bar{h}) + \begin{bmatrix} \Delta\lambda \\ \Delta A \\ \Delta h \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$B_0 = \lambda_{exp}, A_{exp}, h_{exp}$$

Donde X es la matriz de sensibilidad, cuyas columnas T_0 son derivadas parciales de primer orden con respecto a los parámetros. Las dimensiones de T_0 pueden ser $[m \times 1]$, y los de X son $[m \times p]$, donde m y p son el número de datos y parámetros respectivamente. La condición $m \geq p$ debe respetarse, la condición de no singularidad es bien conocida [38].

$$|X^T X| \neq 0 \quad (28)$$

El procedimiento se probó con éxito aplicándolo a diversas muestras correspondientes de distintos periodos de tiempo durante el año. Los valores de entrada para los parametros de interés se indican en la Tabla 2. 6:

Tabla 2. 6. Parámetros de interés.

Absorbancia	Conductividad térmica	Pérdidas térmicas
30%	2.4 W/m °C	35 W/m ² °C

El objetivo del análisis fue encontrar una zona con buen ajuste entre el tiempo de adquisición y la sensibilidad e insensibilidad a las propiedades deseadas, por lo que las curvas que no presentan sensibilidad (comportamiento plano) no deben ser consideradas para el análisis debido a que pueden causar errores en la estimación de los parámetros.

A continuación, se presentan los coeficientes de sensibilidad de los parámetros; λ (Conductividad), A (absorbancia) y h (coeficiente de pérdidas térmicas) utilizados en el modelo de cuadripolos térmicos para el cálculo de la temperatura a distintas profundidades en el subsuelo, el análisis corresponde al día 18 de marzo del 2018 el cual presentó una de las temperaturas más altas durante la primavera, no presento nublados ni lluvia, el tamaño de la muestra fue de $m = 96$ datos y el rango de tiempo de 24 horas, los resultados se muestran respecto a cada profundidad calculada.

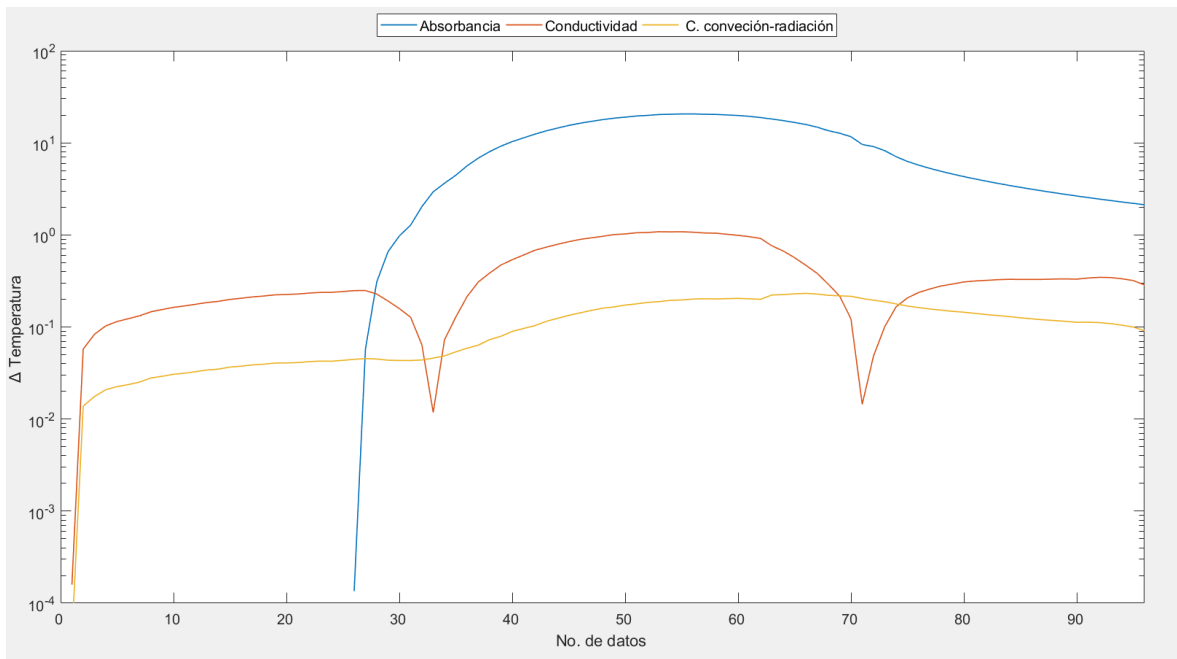


Figura 2. 19. Coeficientes de sensibilidad en la superficie.

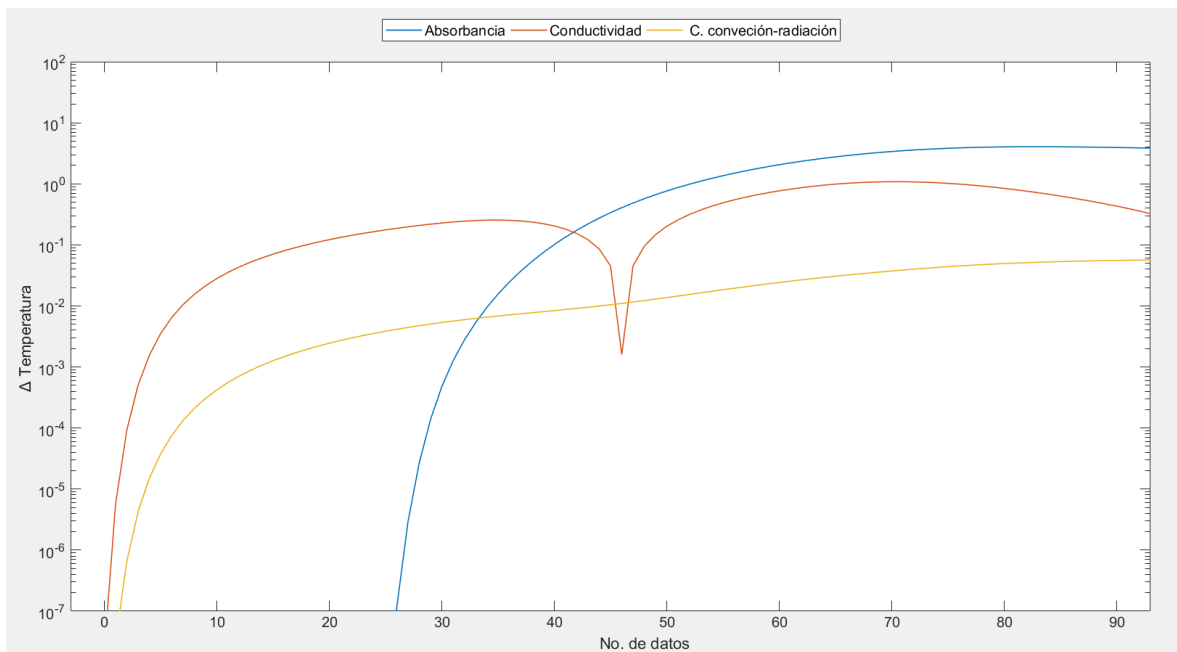


Figura 2. 20. Coeficientes de sensibilidad a 0.35 cm.

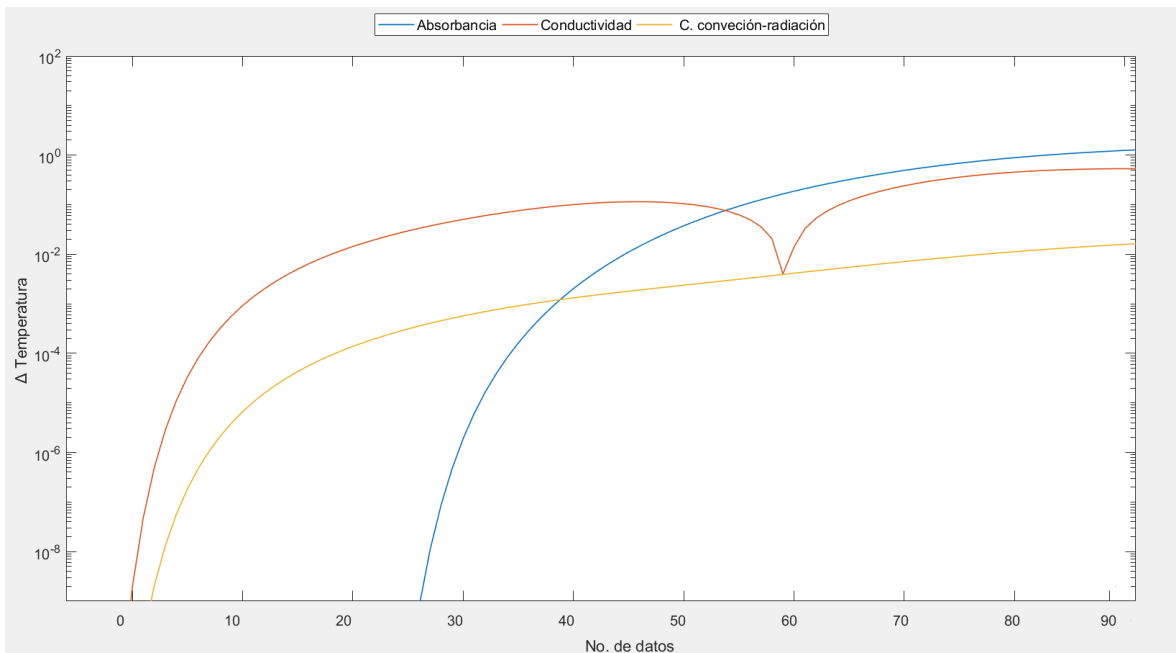


Figura 2. 21. Coeficientes de sensibilidad a 0.60 cm

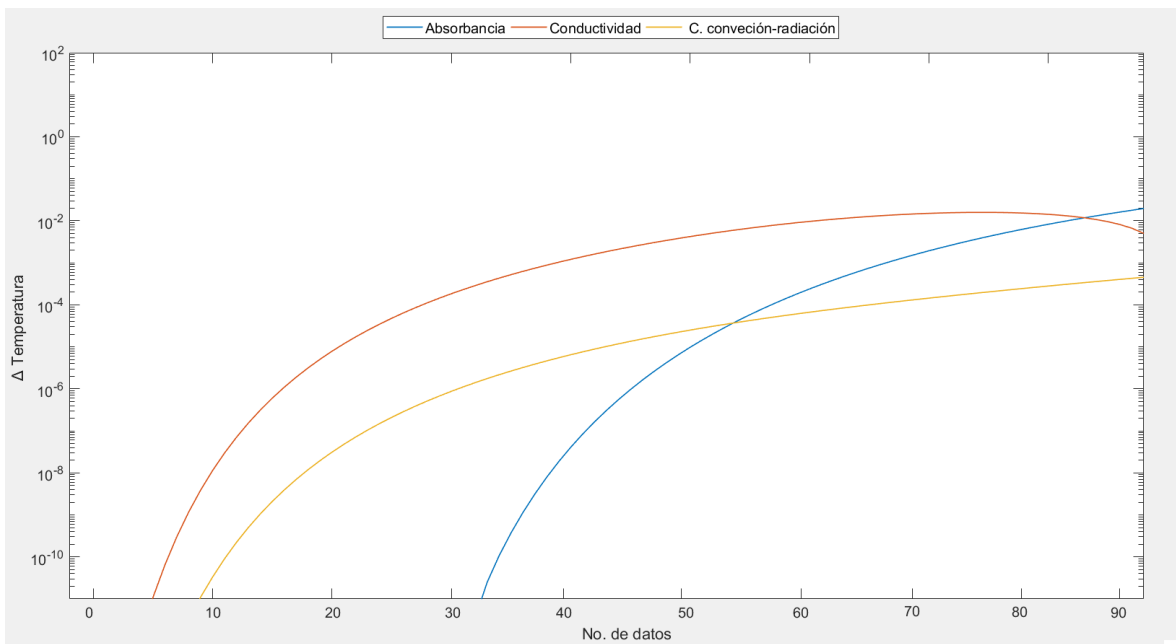


Figura 2. 22. Coeficientes de sensibilidad a 1.1 m

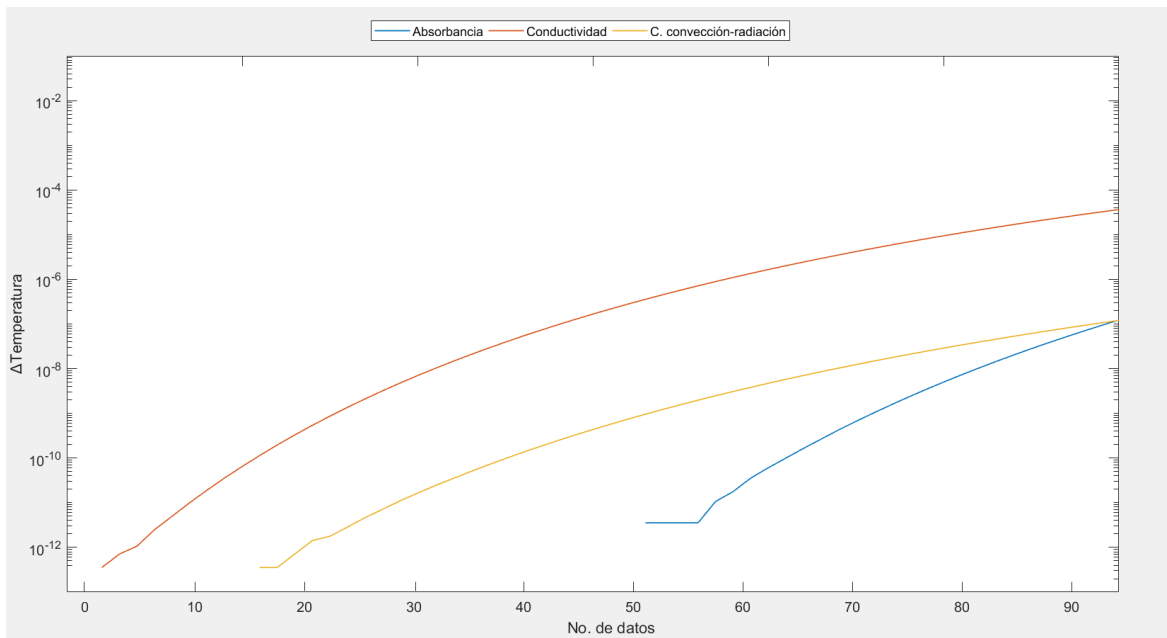


Figura 2. 23. Coeficientes de sensibilidad a 1.9 m.

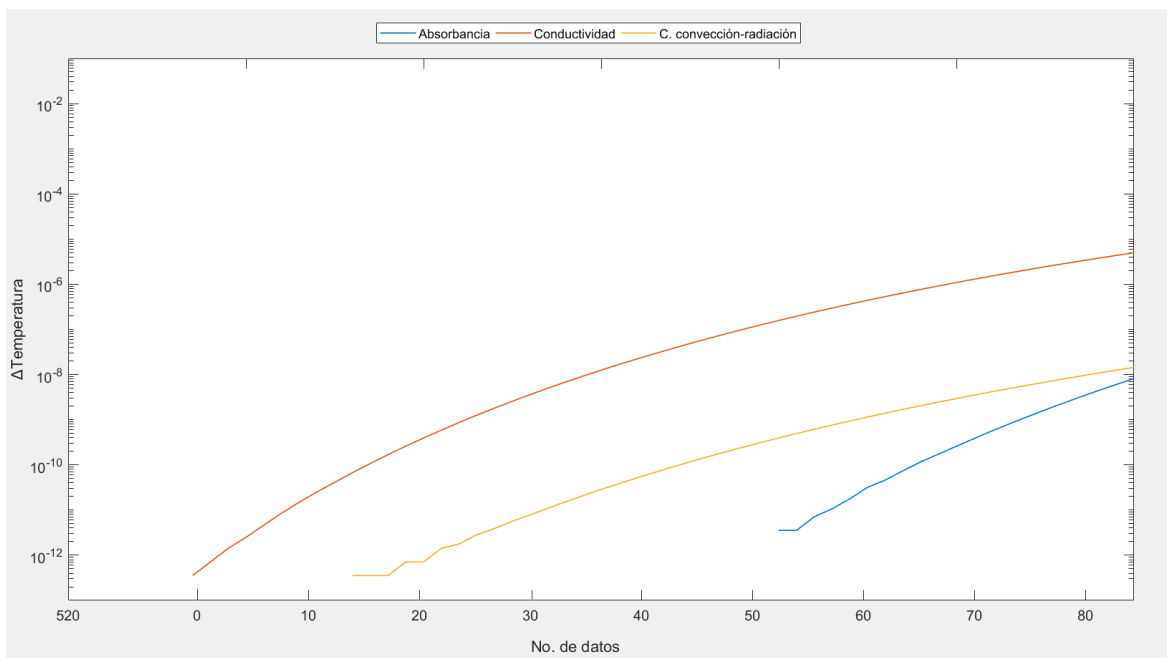


Figura 2. 24. Coeficientes de sensibilidad a 2.1 m

De acuerdo con las figuras, se observa una mayor sensibilidad de los parámetros utilizados para el cálculo de la temperatura a nivel de superficie (Figura 2. 19) el comportamiento de los tres parámetros presenta disimilitud durante el periodo, así como distinto orden de magnitud, estas características pueden ayudar a calcular con precisión los valores de los parámetros. Se destaca que la absorbancia (A) a diferencia de los otros parámetros se muestra más sensible ya que presenta variaciones notables mientras que la conductividad (λ) y el coeficiente de pérdidas térmicas (h) muestran un comportamiento más plano, lo que hace que ambos parámetros sean difíciles de estimar de forma simultánea al mostrar correlación. Para el caso de los coeficientes de sensibilidad de la temperatura de 35 cm de profundidad (Figura 2. 20) únicamente la λ muestra sensibilidad, mientras que A y h muestran un comportamiento más plano. Esto tiene sentido, desde que la absorbancia y el intercambio convectivo-radiativo son términos de flujo que intervienen en superficie. Los coeficientes a 60 cm de profundidad muestran un comportamiento similar la λ comienza a perder sensibilidad en función de la profundidad (Figura 2. 21) y por debajo de 60 cm, los coeficientes de sensibilidad de los parámetros disminuyen considerablemente mostrando un comportamiento plano (Figura 2. 22, Figura 2. 23 y Figura 2. 24). Como se mencionó anteriormente, las curvas que no presentan sensibilidad pueden entorpecer la estimación precisa de los parámetros, por esta razón, se consideraron únicamente los coeficientes correspondientes a la temperatura de superficie para el cálculo de los parámetros de interés ya que después de esta, las curvas no presentan variaciones importantes que permitan una estimación confiable de los parámetros de interés.

2.1.3.2. Método inverso.

El cálculo de los parámetros de interés (A, λ, h) se basó en la técnica de mínimos cuadrados, la diferencia entre las temperaturas reales (T_{exp}) y las temperaturas calculadas a través del modelo matemático (T_{cal}) fue minimizada considerando los datos experimentales como la función objetivo (ajuste de las curvas).

El procedimiento de estimación consistió en someter al modelo matemático a diferentes condiciones de entrada, fijando para ello un rango de distintos valores para cada parámetro y realizar el cálculo correspondiente de todo el sistema para cada incremento del parámetro. El valor inicial y el valor final de cada rango para cada parámetro se estableció con base en la literatura [33], los valores se muestran en la Tabla 2. 7:

Tabla 2. 7. Rangos de los parámetros de interés.

Parámetro	Rango	Incremento
Absorbancia térmica	0.1 – 0.7	0.1
Conductividad térmica	2.4- 4 (W/m °C)	0.05
Perdidas térmicas por convección-radiación	5- 25 W/m ² °C	5

Luego de obtener las temperaturas a través del modelo de cuadripolos térmicos (T_{cal}), se utilizó la diferencia normalizada [47] para las temperaturas calculadas y las reales como se muestra en la ecuación 29:

$$\varepsilon^2 = \frac{\sum_{i=x}^N (T_{exp,i} - T_{cal,i})^2}{\sum_{i=x}^N (T_{exp,i})^2} \quad (29)$$

Para $i = x \dots N(T_{cal,i}, T_{exp,i})$

Así mismo, se tomó en cuenta el error promedio con base en el número de datos (n) de las diferentes muestras analizadas:

$$\varepsilon_{av} = \frac{\varepsilon^2}{n} \quad (30)$$

El resultado de la ecuación 30 corresponde al error mínimo, por lo que fue considerado como condición predeterminada de paro para el cálculo, dicho de otra forma, se buscó por iteración el error mínimo evaluando todo el rango de cada uno de los tres parámetros. El error mínimo pertenece a un valor particular de cada parámetro, el cual, al introducirse como valor de entrada en el modelo puede eliminar o minimizar la diferencia entre la temperatura calculada (T_{cal}), y la real (T_{exp}).

El método inverso fue desarrollado en el software Matlab y fue probado con diferentes conjuntos de datos, para obtener los valores de los parámetros termofísicos se tomaron en

cuenta periodos de tiempo de una semana en diferentes meses del año. Los resultados se muestran a continuación:

Tabla 2. 8. Parámetros termofísicos obtenidos.

Periodo	No. datos	Parámetros			Error normalizado	Error promedio
		A	λ	h		
22 a 28 mayo	672	0.4	2.6	25	0.28	0.00041
4 a 10 julio	672	0.35	3.6	15	0.1916	0.00028
17 a 22 marzo	576	0.65	3.3	25	0.169	0.00029
3 a 9 febrero	672	0.1	2.5	25	0.4279	0.00063
1 a 7 agosto	672	0.25	3.3	20	0.278	0.00036
8 a 15 agosto	768	0.15	4	20	0.3374	0.00043

Al aplicar los parámetros resultantes a través del método inverso como parámetros de entrada en modelo de cuádrupolos térmicos, el modelo proporciona temperaturas cercanas a las medidas experimentales. En general, para todos los conjuntos de datos estudiados (Tabla 2. 8) el mejor ajuste entre las curvas de temperatura ocurre en la temperatura a nivel de superficie, luego, en función de la profundidad el ajuste entre las demás curvas es menor probablemente porque el comportamiento térmico del subsuelo está influenciado por variables atmosféricas que no fueron consideradas en el modelo matemático, tales como la humedad relativa, la velocidad del viento y la precipitación pluvial. A continuación, con base en los resultados se presenta un análisis sobre el ajuste de las temperaturas obtenidas a través del modelo contra las obtenidas a través de datos experimentales:

La Figura 2. 25 representa las temperaturas reales (color azul) y las temperaturas obtenidas a partir del modelo matemático (color rojo), y la Figura 2. 26 muestra la información meteorológica correspondiente al periodo del 3 al 9 de febrero del 2018. Durante todo el periodo, la temperatura real y calculada en la superficie tuvieron un buen ajuste, sin embargo, es posible observar que la temperatura experimental en función de la profundidad presenta un aumento de temperatura importante a partir del primer día, mientras que la temperatura en la superficie mantiene una dinámica similar durante todo el periodo. Este comportamiento puede deberse al frente frío ocurrido un día antes del período (inercia

térmica), ya que este fenómeno ocasionó una disminución notable en los niveles de humedad relativa durante el periodo y mantuvo la velocidad del aire en un rango constante.

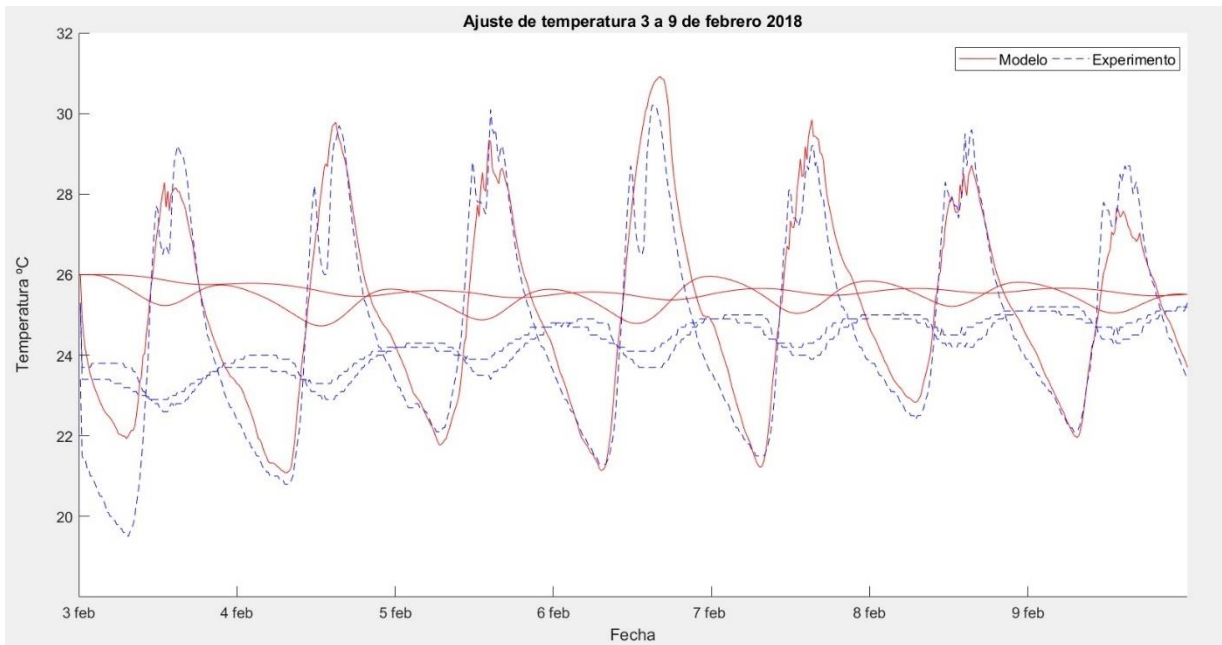


Figura 2. 25. Temperatura real vs calculada 3-9 febrero 2018.

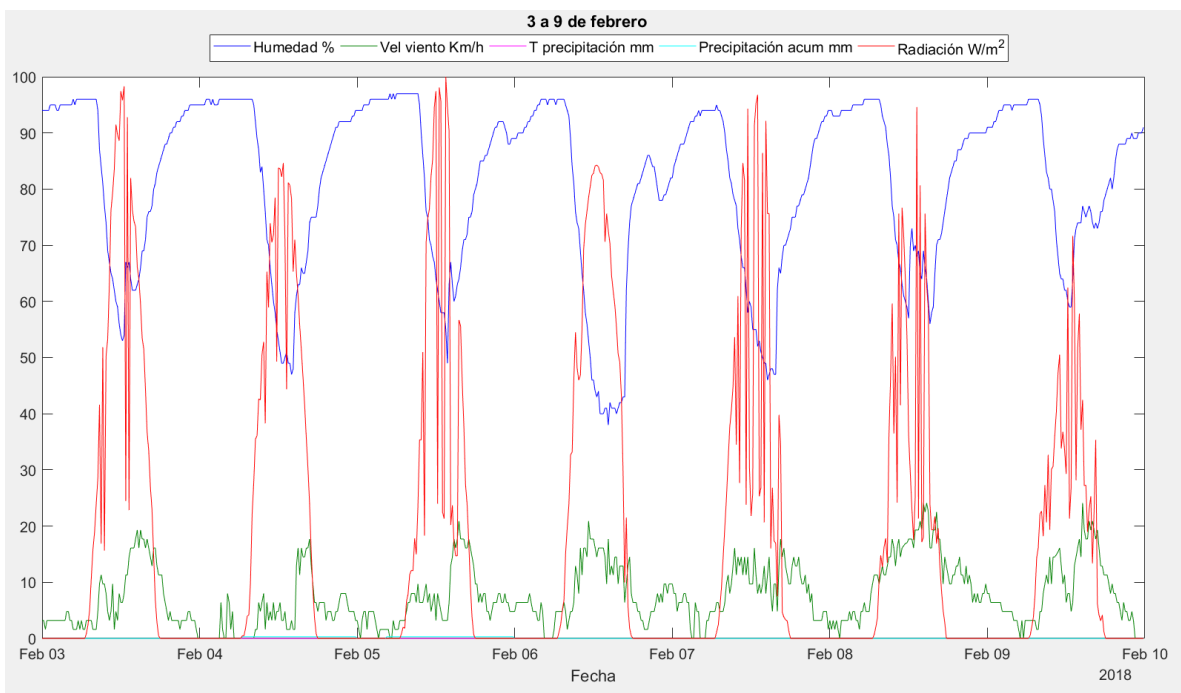


Figura 2. 26. Datos meteorológicos 3-9 febrero 2018.

La Figura 2. 27 muestra los resultados del periodo del 22 a 28 de mayo de 2018. Las curvas azules representan las medidas experimentales y las curvas en color rojo representan las temperaturas del modelo de cuadripolos térmicos utilizando los parámetros obtenidos a través del método inverso.

Durante los dos primeros días la temperatura registrada es mayor que la calculada por el modelo matemático, este comportamiento podría deberse a una mayor velocidad del viento el cual es mayor respecto a los otros días. Para el tercer y cuarto día se observa una disminución de temperatura tanto en el modelo como en las medidas experimentales, dicha disminución de temperatura está influenciada por la presencia de precipitación y la disminución de la velocidad del viento (Figura 2. 28) no obstante, la temperatura de superficie real tiene un buen ajuste con la temperatura del modelo matemático. Finalmente, en los últimos tres días se observa un mejor ajuste de todas las temperaturas respecto a los otros días.

Es importante hacer notar que luego de los días con presencia de precipitación el ajuste de las temperaturas del modelo y las experimentales mejora considerablemente, situación que permite sospechar que este fenómeno meteorológico aunado a la disminución en la velocidad del viento ayuda a homogeneizar las propiedades termofísicas en función de la profundidad.

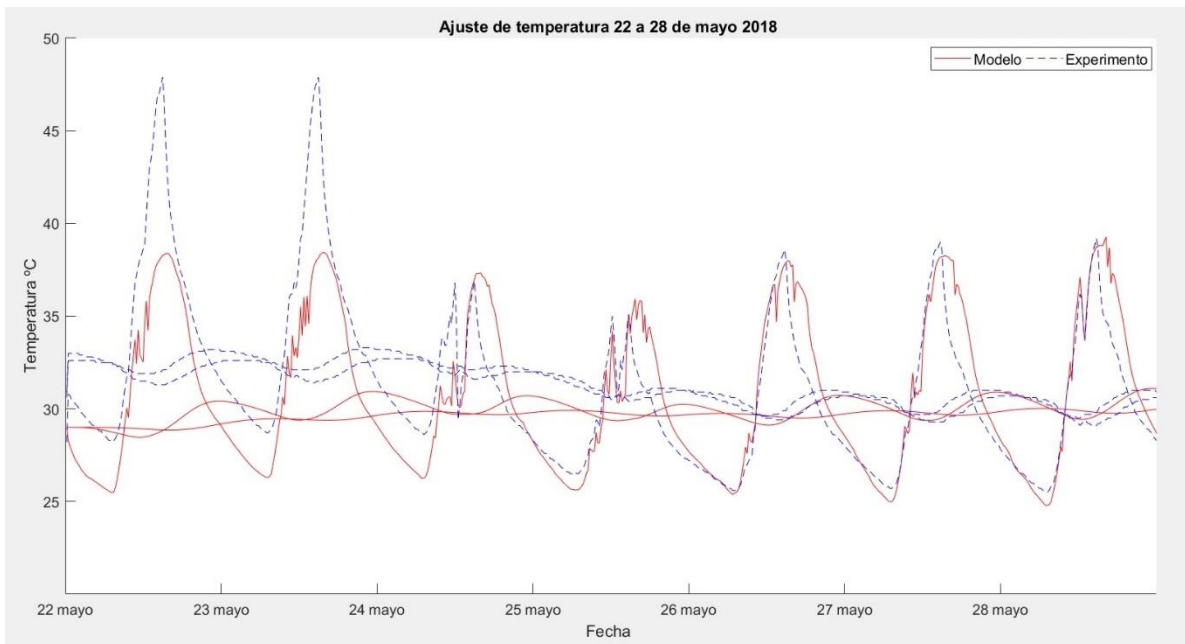


Figura 2. 27. Temperatura real vs calculada 22-28 mayo 2018.

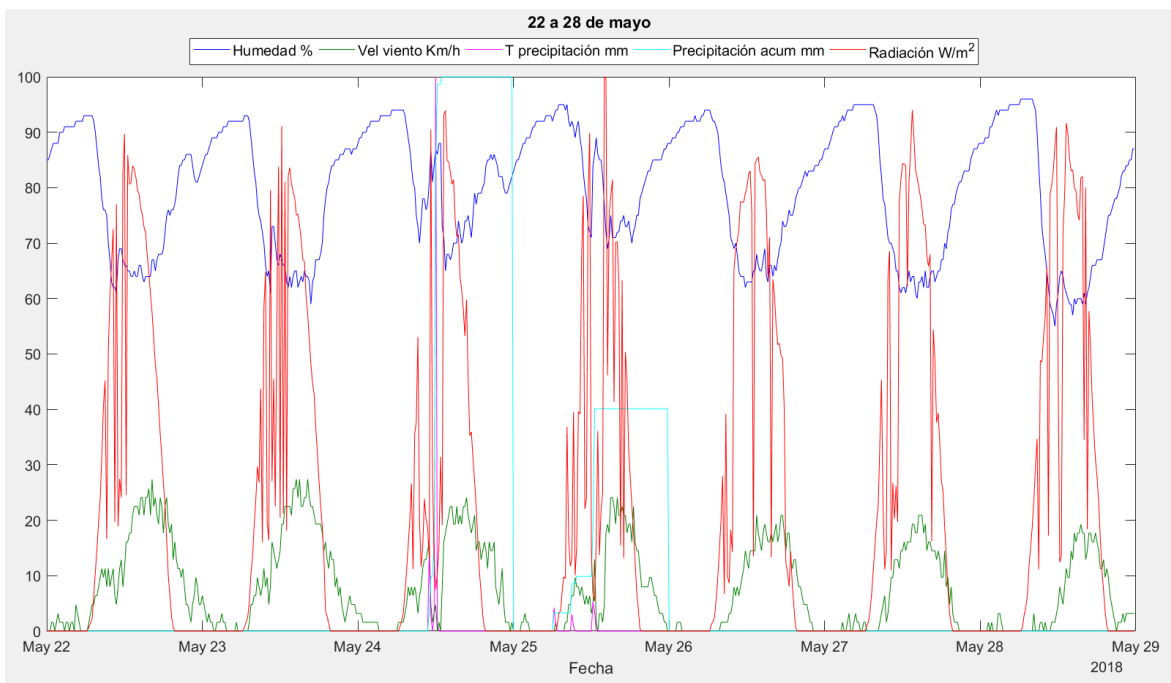


Figura 2. 28. Datos meteorológicos 22-28 mayo 2018.

La Figura 2. 29 representa las temperaturas experimentales y del modelo matemático utilizando como entrada los parámetros termofísicos obtenidos en el método inverso y la

Figura 2. 30 los datos meteorológicos registrados durante el periodo del 4 al 10 de julio del 2018. En los dos primeros días las temperaturas experimentales son mayores que las calculadas por el modelo matemático, esto pudo deberse a los bajos niveles de humedad relativa durante el día y a un aumento en la velocidad del viento, durante el tercer y cuarto día la temperatura real y la del modelo presentan un mejor ajuste el cual podría tener relación con la presencia de precipitación durante los días restantes además de un aumento de humedad relativa durante el día con respecto a los días sin lluvia.

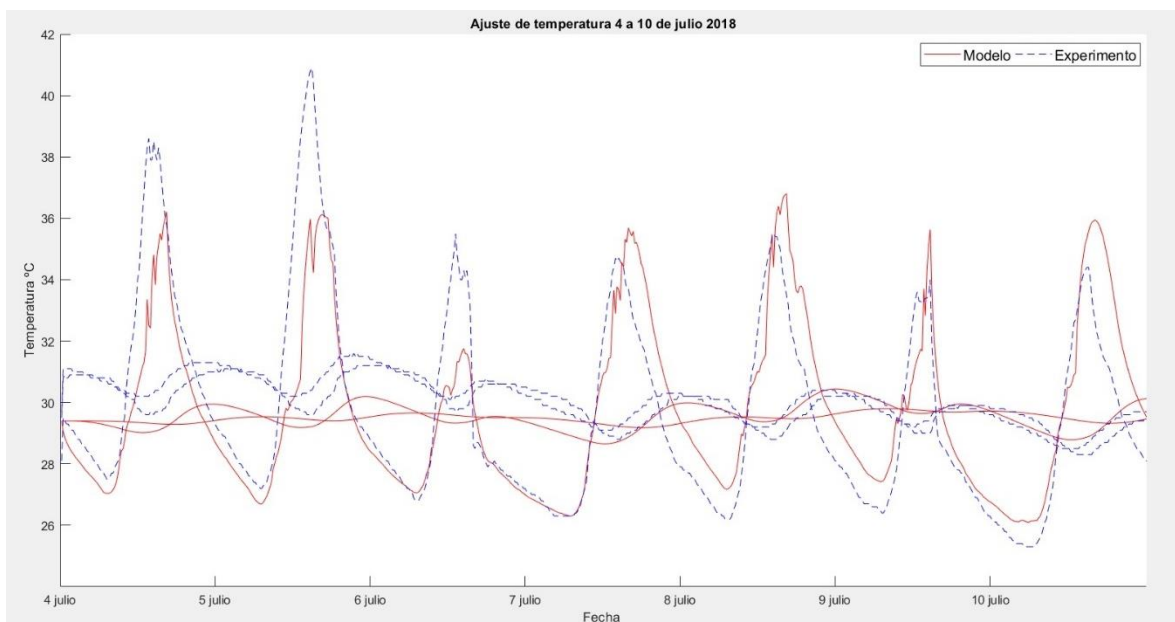


Figura 2. 29. Temperatura real vs temperatura calculada 4-10 julio 2018.

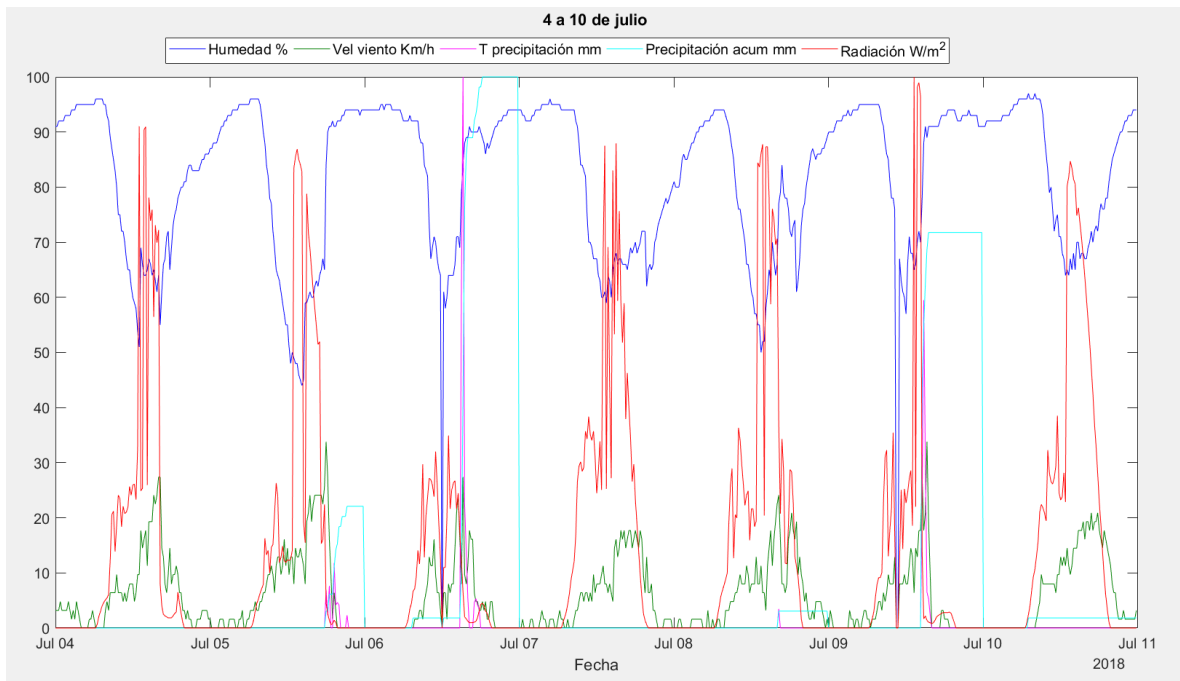


Figura 2. 30. Datos meteorológicos 4-10 julio 2018.

2.1.3.3. Observaciones

- En general, las temperaturas reales y calculadas tienen un mejor ajuste con una velocidad de viento menor a 20 km/h y niveles de humedad relativa por encima del 60%.
- Los fenómenos meteorológicos como la precipitación y los frentes fríos afectan notablemente la temperatura en función de la profundidad.
- La realidad física es muy compleja y es reflejada parcialmente por el modelo:
 - Los parámetros termofísicos no se mantienen constantes durante el año; la absorbancia varía y depende fuertemente de variables climáticas como los niveles de radiación y la variación estacional de la cobertura vegetal que influye en el albedo [48].
 - La conductividad térmica aumenta considerablemente con el aumento de humedad relativa y la presencia de precipitaciones.
 - El coeficiente de pérdidas térmicas es un parámetro que varía durante todo

el día principalmente en función de la velocidad del viento y de la humedad. Por lo tanto, la estimación de este parámetro es un promedio de su valor durante el periodo de tiempo evaluado en el modelo.

- Por estas razones los resultados de ajuste se consideran más confiables en periodos con ausencia de precipitación.
 - El calor latente de evaporación de superficie y la formación de rocío matinal no son representados en el modelo y su influencia se desconoce.
-
- A pesar de que las temperaturas calculadas por el modelo matemático muestran un comportamiento similar a las temperaturas reales, el mejor ajuste de temperaturas ocurre solo a nivel de superficie, ya que las temperaturas calculadas muestran menor sensibilidad en función de la profundidad respecto a las temperaturas reales.

En resumen, la simulación de la transferencia de calor en el subsuelo ofrece una primera aproximación a la realidad de las temperaturas en el subsuelo y nos permite extraer un set de rangos de propiedades termofísicas locales.

Las variaciones de intercambios convectivos debidas al viento y la humedad relativa podrán estudiarse con mayor detalle. El modelo podría mejorarse para tomar en cuenta el calor latente de evaporación y condensación. Estos últimos puntos rebasan los objetivos de esta tesis, pero podrían ser el objeto de un trabajo a futuro dedicado solamente al modelado de intercambio térmico y de masa en el subsuelo.

2.1.4. Simulación numérica.

Los problemas que involucran los fenómenos de transferencia de calor y mecánica de fluidos encuentran su solución a través de ecuaciones diferenciales que rigen sus procesos físicos (ecuación de continuidad, la ecuación de momento y la ecuación de energía). Sin embargo, debido a que la naturaleza de éstas es compleja es necesario el uso de métodos numéricos para resolverlas, tales como la teoría de elemento finito y volumen finito.

2.1.4.1. Método de elemento finito.

El método se basa en dividir una región geométrica dada en subdominios que no se intersecan entre sí denominados elementos finitos, el conjunto de elementos finitos forma

una partición del dominio llamada discretización, dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos (Figura 2. 31).

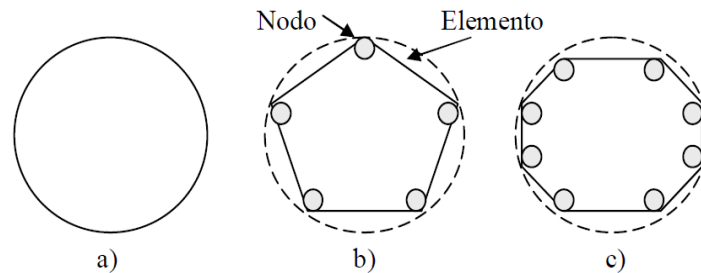


Figura 2. 31. Nodo y elemento [49].

Al conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se le conoce como malla. Una vez que la malla se ha realizado, cada elemento es tratado como un dominio aislado y sus propiedades son calculadas de forma individual [50]. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos, las ecuaciones utilizadas para su solución se conocen como ecuaciones de elementos y la solución es obtenida a través de la unión de las ecuaciones de elementos de tal forma que sean continuas.

Luego de aplicar el método de elemento finito, la solución es una aproximación de la medida real, debido a que no es posible que el número de elementos tienda a infinito (solución exacta).

2.1.4.2. Método de volumen finito

La técnica de volumen finito o volumen de control divide al dominio en volúmenes de control contiguos donde las variables son almacenadas en los nodos (vértices de los volúmenes) (Figura 2. 32) usualmente definidos a través de una malla. Las ecuaciones de conservación de las cantidades físicas en el volumen de control (conservación de masa, de cantidad de movimiento y de energía), son descritas en su forma integral para cada centro de todos los volúmenes definidos en el dominio, es decir, en cada volumen se evalúan diferentes integrales de volumen y superficie que resultan en ecuaciones discretizadas las cuales contienen los valores de interés para un grupo de nodos.

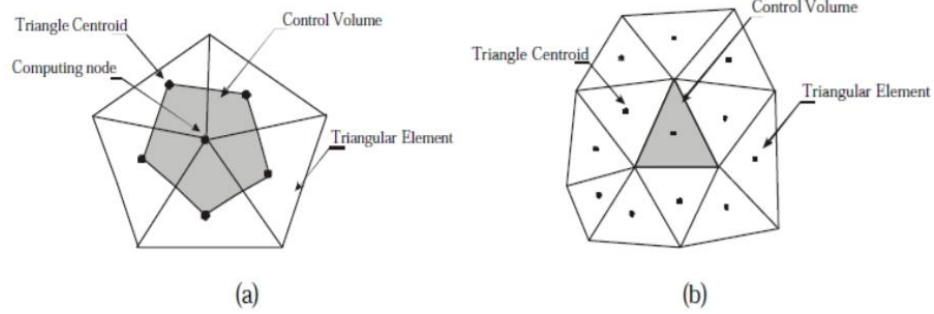


Figura 2. 32. A) centrado en la celda. B) centrado en los vértices [51].

La característica clave del método es la integración del volumen de control, dicha integración es en tres dimensiones como se muestra a continuación en la ecuación de transporte de ϕ [52].

$$\underbrace{\int_{CV} \frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t} dV + \int_{CV} \nabla \cdot (\rho\phi U)}_a = \underbrace{\int_{CV} \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) dV + \int_{CV} S_\phi dv}_b \quad (31)$$

$\phi =$ variable general $\Gamma =$ coeficiente de difusión $S_\phi =$ fuente

Donde:

- a) representa el término de tasa de cambio y los términos convectivos,
- b) término difusivo y la fuente respectivamente.

Sin embargo, es necesario expresar los valores de la variable en la superficie del volumen de control (caras del volumen) en términos de los valores nodales, por lo cual, se utiliza el método de interpolación para la obtención de estos.

El método de volumen finito proporciona mejores resultados que el método de elemento finito en la solución de geometrías complejas, por lo que se considera más adecuado en la solución de problemas relacionados con análisis de transferencia de calor en geometrías tridimensionales complejas y donde los efectos convectivos son importantes.

2.1.4.3. Ansys-Fluent para simulación numérica

El software ANSYS es una herramienta de dinámica de fluidos computacional (CFD), diseñada para trabajar aplicando el método de elemento finito (estructuras) y volumen finito (fluidos), cuenta con capacidades de modelado físico para modelar el flujo, la turbulencia, la transferencia de calor, etc., y proporciona soluciones numéricas en forma discreta a las ecuaciones diferenciales parciales [53]. Está constituido por tres elementos principales: un preprocesador donde se construye la geometría del objeto de interés y su mallado, un solucionador que usa el método de elemento finito o volúmenes finitos y un post-procesador que muestra los resultados a través de diagramas vectoriales, animaciones de gráficos, etc. Por lo tanto, para simular el proceso de transferencia de calor y de flujo de aire en un intercambiador de calor enterrado en el subsuelo, se utilizó el software ANSYS® Fluent 18.2., con el propósito de desarrollar un modelo CFD tridimensional y estacionario para analizar el comportamiento térmico del aire al viajar por el intercambiador de calor, para el estudio se asumió lo siguiente:

- La temperatura de la tubería es igual a la temperatura del subsuelo en función de la profundidad.
- Las propiedades de la tubería no cambian con la temperatura.
- Los materiales utilizados en el modelo de CFD son isotrópicos y homogéneos.
- Estado estable.
- Transferencia de calor por convección.
- El aire fluye con una velocidad constante y uniforme.
- Las propiedades del fluido son constantes y se evalúan en la entrada temperatura.
- El fluido es incompresible con densidad y calor específico constante.

2.1.4.4. Geometría.

La primera etapa consta de la definición de la geometría de la región de interés, ANSYS Fluent cuenta con el módulo DesignModeler que permite diseñar y modificar geometrías para su posterior análisis. La Figura 2. 33 **Figura 2. 33**, muestra la geometría del intercambiador de calor, el cual está constituido por la unión de dos tuberías verticales y una horizontal, la tubería está seccionada en diferentes paredes en sus partes verticales (W1-W6), donde los cortes corresponden a la profundidad y la temperatura real registrada

por los sensores colocados en el subsuelo durante la etapa experimental (T1-T6), con el fin de tomar en cuenta la distribución de temperaturas desde la superficie del suelo hasta la profundidad de enterramiento.

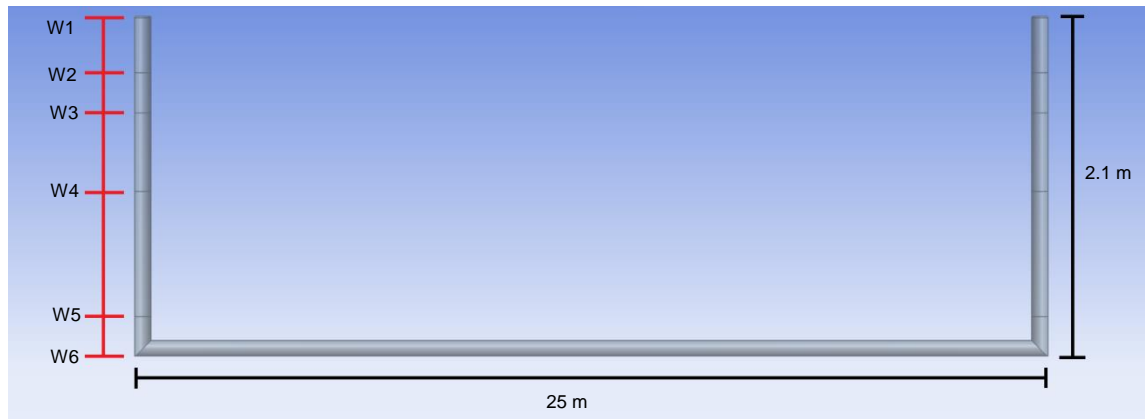


Figura 2. 33. Geometría del sistema realizada en DesingModeler.

Se consideró un diámetro de la tubería de 0.10 m, la longitud de la parte horizontal se determinó siguiendo las investigaciones de Kumar [30], quien encontró que la temperatura del aire en la salida del intercambiador no es afectada por las fluctuaciones de temperatura del suelo en la tubería de entrada después de 24 m de longitud. Las dimensiones del intercambiador fueron las siguientes:

Tabla 2. 9. Dimensiones del intercambiador de calor.

Longitud de la parte horizontal	25 m
Longitud total de la tubería	29.2 m
Profundidad de enterramiento	2.10 m
Diámetro de la tubería	0.10 m
Espesor de la tubería	0.005 m

2.1.4.5. Mallado.

Se utilizó un mallado no estructurado tetraédrico para el dominio del fluido y la tubería establecido por defecto de Fluent (módulo MeshTM) (Figura 2. 34), luego con el objetivo de disminuir el tiempo de cálculo y obtener una solución más precisa se realizó una técnica de

independencia de malla a la geometría para obtener la mejor densidad de cuadrícula modificando el tamaño y refinación de sus elementos (Anexo IV).

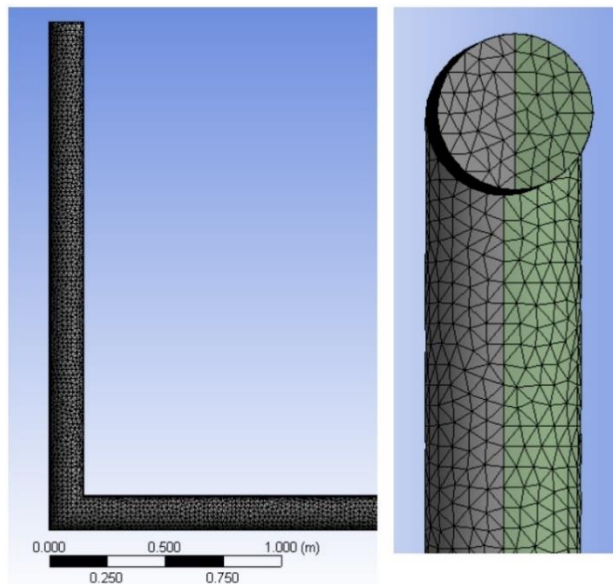


Figura 2. 34. Mallado tetraédrico, realizado en MeshTM.

La simulación fue realizada con una malla tetraédrica constituida por 52,681 nodos y 235,831 elementos, debido a que arrojó buenos resultados y un tiempo de cálculo razonable. Las características de la malla se muestran en la Tabla 2. 10.

Tabla 2. 10. Características de la malla.

Dimensionamiento	
Tasa de crecimiento	1.05
Tamaño máximo	2.51 m
Tamaño de curvatura minina	1.97E-02
Angulo de curvatura normal	18°
Proximidad tamaño min.	1.97E-02
Métrica de malla	Calidad Ortogonal
Min	6.93E-02
Max	0.99
Promedio	0.84301

2.1.4.6. Ecuaciones gobernantes.

Para los dominios del intercambiador de calor en el subsuelo de acuerdo con la velocidad del fluido (aire), el flujo se asumió como incompresible, transitorio y turbulento. Luego, se seleccionaron las ecuaciones, modelos matemáticos y algoritmos que describían los fenómenos físicos que pretendían simularse [54]. Las ecuaciones gobernantes se muestran a continuación:

- Ecuación de continuidad

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (32)$$

Donde:

ρ =densidad

t = tiempo

U = velocidad del fluido

- Ecuación de momento

$$\frac{\partial(\rho U)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho U \otimes U) = -\nabla p + \nabla \cdot \tau + S_M \quad (33)$$

Donde:

p =presión estática

τ = tensor de esfuerzos

$$\tau = \mu(\nabla U + (\nabla U)^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot U)$$

S_M =fuente de momento

μ =viscosidad molecular

- Ecuación de energía

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + S_E \quad (34)$$

Donde:

p =presión

λ =conductividad

h_{tot} = entalpia total, relacionada a la entalpia estática $h(T, p)$:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} U^2$$

$\nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \boldsymbol{\tau})$ = termino de trabajo viscoso

$\mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M$ = trabajo debido a fuentes externas de momento.

2.1.4.7. Modelo de turbulencia.

En la actualidad no existe ningún modelo turbulento que sea universalmente aplicable a cualquier tipo de problema. La elección del modelo de turbulencia está determinada por el tipo de flujo existente, nivel de precisión deseado, recurso computacional disponible, etc [55].

El modelo de turbulencia K- ε realizable se ha utilizado para este trabajo, éste se encuentra dentro del conjunto de los modelos de turbulencia de las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas por Reynolds (RANS), debido a que por sus características y buenos resultados ha sido ampliamente utilizado para simular intercambiadores de calor tierra- aire, tal es el caso de los trabajos de Ahmed [56], Serageldin [58], Ardila [59], Amanowicz [60].

El modelo k- ε realizable es una variación del k- ε estándar. El modelo k-e estándar está basado en ecuaciones de transporte modelo para la energía cinética de turbulencia (k) y su tasa de disipación (ε). Su robustez, bajo costo computacional y buena precisión en un amplio rango de flujos hacen que se haya convertido en el caballo de batalla de la mayoría de los flujos turbulentos industriales y transferencia de calor, desde el tiempo desde que fue propuesto por Launder y Spalding [61]. Sin embargo, en él se asume que el flujo es totalmente turbulento y que los efectos de la viscosidad molecular son despreciables, por lo que es válido únicamente para flujos totalmente turbulentos. A raíz del conocimiento de

las fortalezas y debilidades del modelo estándar, se han aplicado modificaciones para mejorar su rendimiento, una de sus variantes es el k- ε realizable.

Las diferencias del modelo realizable son las siguientes:

- Contiene una formulación alternativa para la viscosidad turbulenta.
- Una ecuación de transporte modificada para la tasa de disipación se ha derivado de una ecuación exacta para el transporte de la fluctuación de vorticidad media cuadrada.

El término "realizable" significa que el modelo satisface ciertas restricciones matemáticas en las tensiones de Reynolds, en consonancia con la física de los flujos turbulentos [55].

El modelo presenta un mejor rendimiento para superficies planas, chorros redondos, rotación, recirculación y curvatura aerodinámica, además ofrece mejores resultados ante la capa límite bajo fuertes gradientes de presión adversos y para flujos separados.

Las ecuaciones de transporte para el modelo K- ε realizable son:

Energía cinética turbulenta (k):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (35)$$

Disipación de la energía cinética turbulenta (ε):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho \varepsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_1 \frac{k}{\varepsilon k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \quad (36)$$

$$C_1 = \max \left[0.43, \frac{n}{n+5} \right], n = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}}$$

Donde:

G_k = generación de energía cinética de turbulencia debido a los gradientes de velocidad media.

G_b =Es la generación de energía cinética de turbulencia debido a la flotabilidad.

Y_M =Contribución de la dilatación fluctuante en la turbulencia compresible a la tasa de disipación general.

$C_1, C_{3\varepsilon}$ = constantes

$\sigma_\varepsilon, \sigma_k$ =son los números turbulentos de Prandtl para ε y k

S_ε, S_k =términos fuente

En régimen turbulento, la presencia de paredes afecta significativamente el comportamiento del fluido, el modelado del flujo cercano a la pared (capa límite) puede afectar de forma considerable la exactitud de las soluciones numéricas debido a que las paredes son el principal origen de vorticidad y turbulencia. En los flujos de transferencia de calor, una resolución precisa de esta zona es crucial debido a que la mayoría de los cambios de temperatura se producen a través de ella. Una manera de evitar resultados inexactos es utilizar una malla muy fina y un modelo con un número de Reynolds bajo, sin embargo, esto es computacionalmente costoso en 3D, por lo que, la solución tradicional ha sido utilizar funciones de pared [59]

En ANSYS-Fluent existen dos aproximaciones para modelar el flujo cercano a la pared:

- Funciones de pared
- Modelo de pared cercana (Near-Wall Model)

Las funciones de pared no resuelven la subcapa viscosa ni la de transición, sino que utiliza formulas semi empíricas llamadas “funciones de pared” para unir la región afectada por la viscosidad entre la pared y la región completamente turbulenta [55]. El uso de estas funciones evita la necesidad de modificar los modelos de turbulencia para que tengan en cuenta la presencia de la pared. Sin embargo, cuando las condiciones del flujo se vuelven severas, es decir, hay gradientes de presión importantes y el flujo presenta un fuerte desequilibrio, la calidad de las predicciones se ve comprometida [59].

El segundo tratamiento, por el contrario, es capaz de resolver la capa límite al completo, aunque esto requiera un mayor refinamiento en todo el modelo y por tanto, una mayor potencia computacional.

En esta investigación se han utilizado las funciones de pared estándar ya que trabajan razonablemente bien para un amplio rango de aplicaciones que envuelven flujos turbulentos limitados por paredes [55].

Algoritmo para el acoplamiento presión-velocidad.

Dado que las ecuaciones de momento y continuidad son resueltas secuencialmente, durante el procedimiento la ecuación de continuidad es utilizada como una ecuación para la presión, sin embargo, la presión no aparece de forma explícita en su ecuación para flujos incompresibles, debido a que la densidad no está relacionada directamente con la presión. Por tal motivo se utiliza el esquema SIMPLE el cual permite introducir la presión dentro de la ecuación de continuidad. El algoritmo SIMPLE utiliza la relación entre las correcciones de presión y velocidad para reforzar la conservación de masa y así obtener el campo de presión. Además, ahorra tiempo para la solución de los problemas de la transferencia de calor conjugados con mecánica de fluidos ya que utiliza un único dominio computacional que contiene las regiones sólidas y fluidas [55].

Esquemas de discretización.

Son métodos de interpolación de las ecuaciones gobernantes y de la presión, para obtener la solución de nuestro problema se tomaron en cuenta los siguientes esquemas:

- Presión: segundo orden Upwind
- Momento: segundo orden Upwind
- Energía cinética turbulenta: Primer orden Upwind
- Tasa de disipación turbulenta: Primer orden Upwind
- Energía: Segundo orden Upwind

Discretización de primer orden: las cantidades en las caras del volumen se determinan suponiendo que los valores del centro de la celda de cualquier variable representan un valor promedio de la celda y se mantienen en toda la celda, por lo tanto, el valor de cada cara es igual al valor del centro de la celda.

Discretización de segundo orden: las cantidades en las caras son calculadas utilizando el método de reconstrucción lineal multidimensional. Este método logra una precisión de orden superior en las caras a través de una expansión de las series de Taylor de la solución del centro de cada volumen tomando como referencia el centroide de la cara [54].

La discretización de primer orden generalmente produce una mejor convergencia que el esquema de segundo orden, aunque puede arrojar resultados menos precisos, especialmente en las mallas tetraédricas.

2.1.4.8. Condiciones iniciales y de frontera.

Son los puntos de inicio para la solución de las ecuaciones, en primera instancia, se establecen las propiedades de los fluidos y/o materiales utilizados, los cuales se muestran en la Tabla 2. 11.

Tabla 2. 11. Propiedades de los materiales.

Material	Aire	Cobre
Tipo	Fluido	Sólido
Densidad (kg/m ³)	1.225	8978
Calor específico (J/kg-K)	10006.43	381
Conductividad térmica (W/m-K)	0.0242	387.6
Viscosidad (kg/ms)	1.79E-05	-

Debido a que las ecuaciones gobernantes son resueltas en el dominio y zona del flujo, las condiciones de frontera fueron definidas como se muestran en la Figura 2. 35. **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

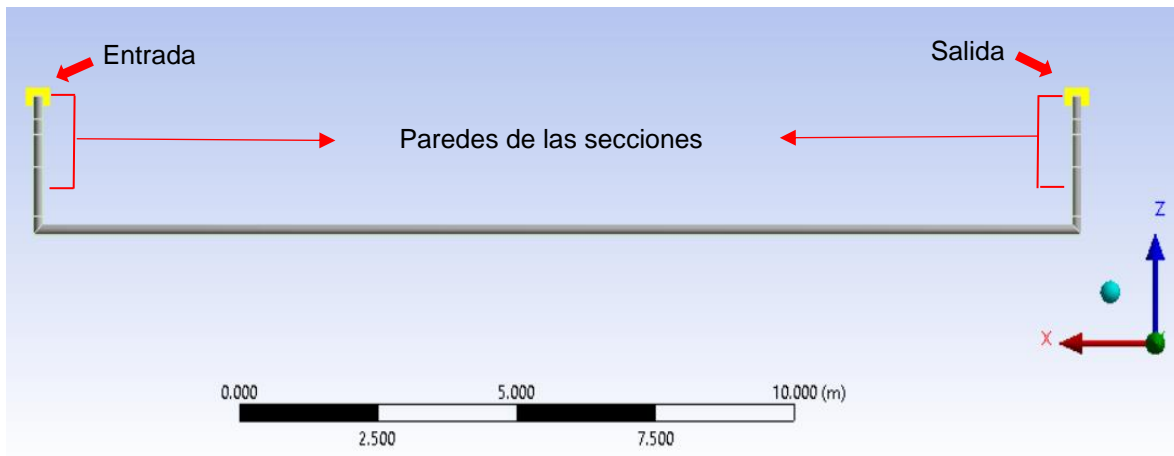


Figura 2. 35. Zonas de Frontera de la geometría.

Paredes: las 13 paredes de la tubería fueron consideradas bajo la condición de no deslizamiento. Se asignaron las temperaturas obtenidas experimentalmente tomando en cuenta la profundidad real, además, se asignó el cobre como material de la tubería y a este un espesor de 0.005 m.

Entrada: condición de frontera tipo “velocidad en la entrada”, se estableció la velocidad de entrada del fluido 1 m/s, la velocidad del fluido se obtuvo a través de pruebas de simulación previas, tomando en cuenta las investigaciones realizadas por Santamouris [28], Shingari [35], Bansal [38], Benhammou [39], Ahmed [56], Misra [57], entre otros, quienes demostraron que la temperatura del aire en la salida del EAHE incrementa al aumentar la velocidad del aire. La dirección del flujo fue normal a la superficie de entrada y se consideraron las temperaturas ambientales como temperatura de entrada. Con base en la velocidad del fluido (aire), las características de este y el diámetro de la tubería 0.10 m (ver ANEXO IV), se calculó el número de Reynolds, el cual corresponde a un fluido de régimen turbulento, a partir del resultado se calculó la intensidad de turbulencia (Tabla 2. 12).

Tabla 2. 12. Características del fluido.

Fluido	Viscosidad dinámica kg/ms	Velocidad m/s	Densidad kg/m³
aire	1.985e-5	1	1.145 kg

Número de Reynolds D 10	Intensidad de turbulencia
6423 -Turbulento	5%

Salida: Condición de frontera tipo “Outflow”. Con “ponderación del caudal” =1.

Se realizaron dos análisis a la geometría bajo las siguientes consideraciones:

- a) Las tuberías verticales (entrada y salida), esta influenciadas por la temperatura del suelo en función de su profundidad (isotérmicas) (Figura 2. 36,a).

- b) La tubería vertical de salida tiene paredes adiabáticas, es decir, en esa zona el aire que viene de la parte horizontal de la tubería no sufre ganancias ni pérdidas de calor (Figura 2. 36,b).

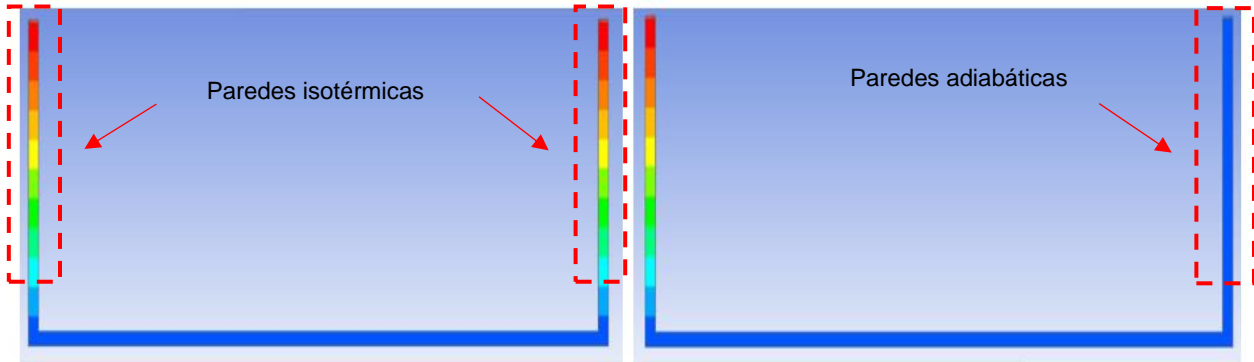


Figura 2. 36. a) Paredes isotérmicas b) Pared de salida adiabática.

Los límites de convergencia de las ecuaciones fueron determinados como se muestra en la Tabla 2. 13; **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Tabla 2. 13. Límites de convergencia

Ecuaciones residuales	Criterio absoluto
Continuidad	0.001
Velocidad-X	0.001
Velocidad-Y	0.001
Velocidad-Z	0.001
Energía	1.00E-06
K	0.001
Épsilon	0.001

Finalmente, debido a la definición del estado del flujo se consideraron 1000 iteraciones a realizar.

CAPÍTULO 3.

RESULTADOS.

Se realizó la simulación de un intercambiador de calor enterrado a 2.10 m en el subsuelo con el objetivo de estudiar su desempeño (potencial de enfriamiento) tomando en cuenta las temperaturas del subsuelo obtenidas de manera experimental. Con base en la información registrada de la estación meteorológica se seleccionaron los días más calurosos de cada mes a partir de noviembre 2017 hasta septiembre del 2018, de estos días representativos se seleccionó la temperatura máxima, así como las temperaturas del subsuelo correspondientes al mismo horario, además, la temperatura ambiente fue considerada como parámetro de entrada del intercambiador (temperatura del aire) y la velocidad del aire fue de 1 m/s debido a que se obtuvo una mayor disminución de la temperatura respecto a velocidades mayores. Los resultados obtenidos a la se muestran en la Tabla 3. 1

Tabla 3. 1. Resultados de la simulación. Geometría D 10.

Fecha	Temperatura de entrada (ambiente) °C	Tubería de salida pared isotérmica		Tubería de salida pared adiabática	
		Temperatura promedio de salida °C	ΔT °C	Temperatura promedio de salida °C	ΔT °C
25/11/2017	28.4	27.2	1.2	28.1	0.2
14/12/2017	27.7	26.5	1.2	27.4	0.3
11/01/2018	31.3	26	5.3	26.8	4.5
01/02/2018	28.6	25.4	3.2	26.1	2.5
18/03/2018	37.2	27.2	10	27.2	10
03/04/2018	36.1	28	8.1	27.5	8.6
02/05/2018	35.2	28.6	6.6	28.5	6.7
06/06/2018	36	29.5	6.5	29.4	6.6
05/07/2018	34.3	29.4	4.9	29.3	5
08/08/2018	35.2	30	5.2	29.9	5.3
09/10/2018	33.7	29.2	4.5	29.9	3.8

Durante los meses de otoño e invierno el intercambiador de calor D10 tuvo un buen desempeño de enfriamiento considerando sus paredes como isotérmicas, ya que logró disminuir la temperatura hasta 5.3 °C durante el mes de enero. Este periodo, sin embargo, coincide con una época que reporta un uso muy limitado de los sistemas de A.A.

La Figura 3. 1, muestra la diferencia entre la temperatura de salida del intercambiador y la temperatura en la profundidad de enterramiento durante el invierno, la temperatura a la salida del intercambiador de calor es más baja, las diferencias van de 0.7 a 0.9 °C, esto se debe a que, durante esta temporada en ciertas horas del día, la temperatura del aire ambiente es ligeramente mayor que la temperatura del subsuelo y durante el recorrido el aire pierde calor debido a que cerca de la superficie la temperatura es considerablemente más baja esto provoca que la temperatura del aire a la salida de EAHE alcance la temperatura del subsuelo. Por otro lado, durante la noche la temperatura ambiente es menor que la temperatura en el subsuelo por lo que se esperaría el efecto contrario, es decir, que durante el recorrido el aire gane calor hasta alcanzar la temperatura del subsuelo.

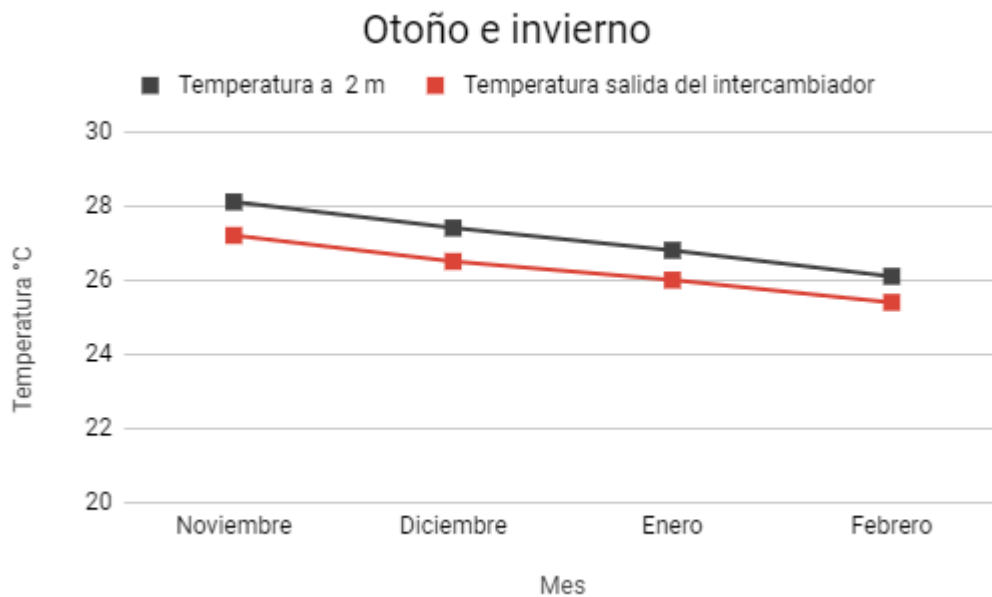


Figura 3. 1. Temperaturas de salida (paredes isotérmicas) vs gradiente del subsuelo durante el otoño e invierno. D 10.

Por otro lado, durante la primavera y el verano el intercambiador con las paredes adiabáticas en la salida tuvo un desempeño de enfriamiento ligeramente mayor, la Figura

3. 2 muestra la diferencia entre la temperatura de salida del intercambiador y el gradiente de temperatura en la profundidad de enterramiento (2 m), durante esta estación la temperatura alcanzada a la salida del intercambiador se encuentra muy cercana al valor de la temperatura a 2 m (diferencias entre 0.1 y 0.2 °C), tanto que para el mes de julio ambas líneas llegan a la misma temperatura que el gradiente de temperatura a 2 m.

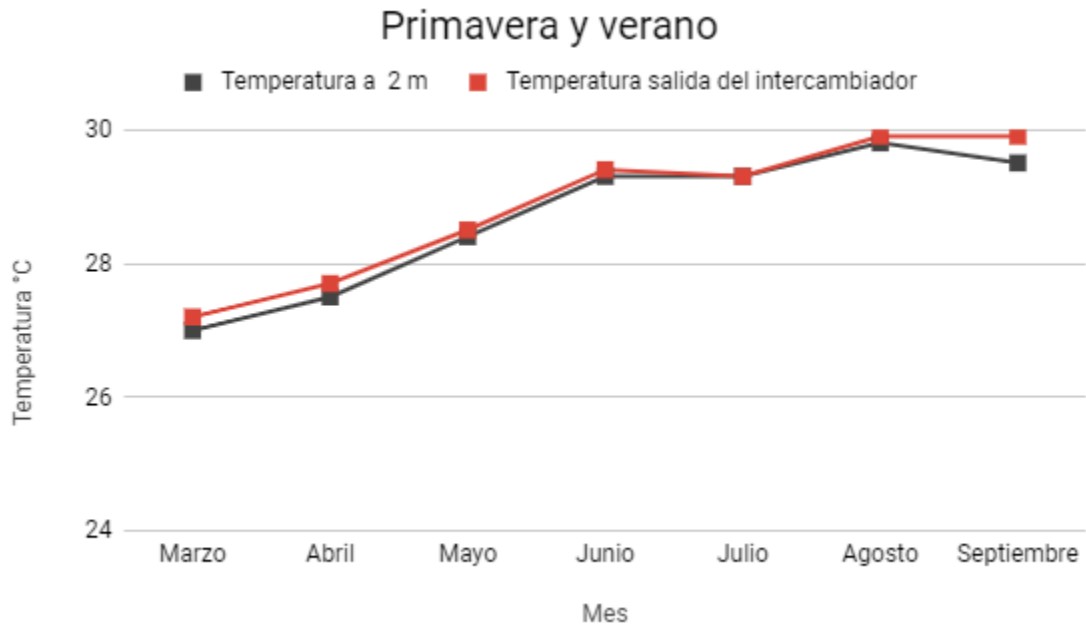


Figura 3. 2. Temperaturas de salida vs gradiente del subsuelo durante primavera y verano. D 10.

Uno de los días con mayor potencial de enfriamiento sucede el día 3 de abril donde el intercambiador de calor logra disminuir la temperatura del aire 8.4 °C.

A continuación, se muestran algunas figuras sobre los resultados de la simulación realizada para dicho mes. La Figura 3. 3 y muestra la tubería de entrada y de salida del intercambiador de calor, el inciso a, presenta la distribución de temperatura del aire al entrar al sistema donde se observa que la pérdida de calor en la tubería vertical es función de la profundidad, por otro lado, el inciso b muestra la temperatura del aire en la salida después de viajar por el intercambiador, el cual alcanza una temperatura uniforme.

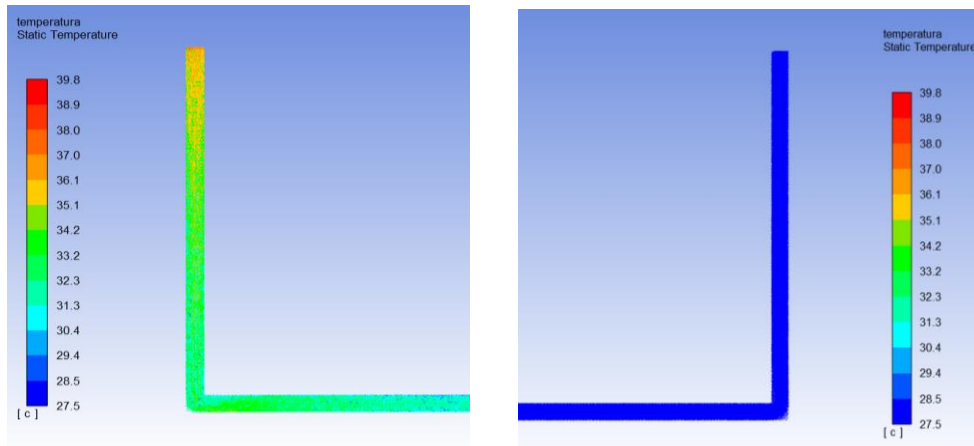


Figura 3. 3. a) Distribución de temperaturas en la tubería de entrada. b) Distribución de temperaturas en la tubería de salida.

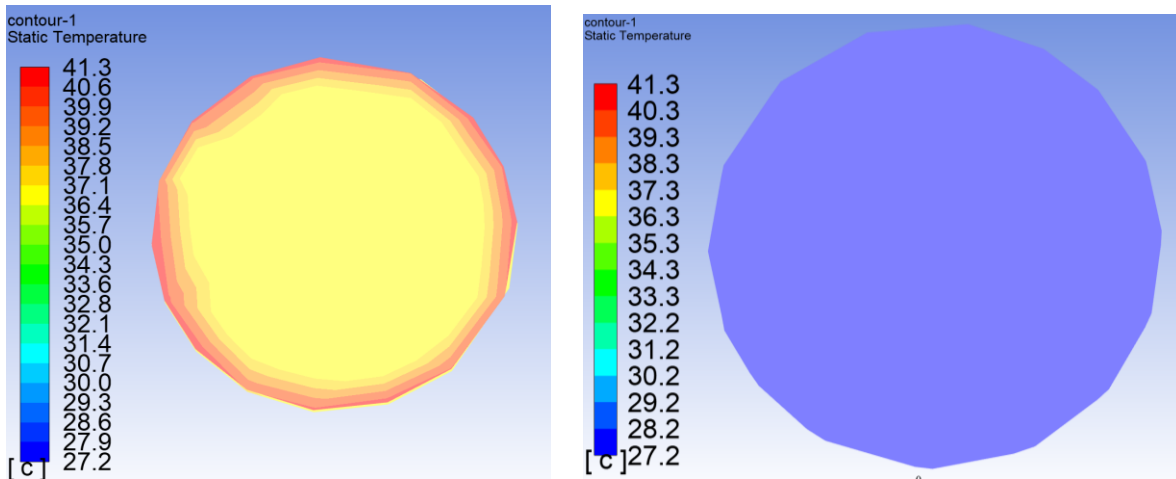


Figura 3. 4. a) Contornos de temperatura en la entrada del intercambiador. b) Contornos de temperatura en la salida del intercambiador.

La Figura 3. 5 muestra el cambio de temperatura del aire durante todo el trayecto a través del intercambiador, en esta imagen se aprecia que una vez que el aire llega a la parte horizontal del sistema luego de unos cuantos metros éste alcanza una temperatura similar a la registrada experimentalmente, la temperatura promedio a la salida del intercambiador para el día 3 de abril fue de 27.5 °C como se muestra en la Figura 3. 6.

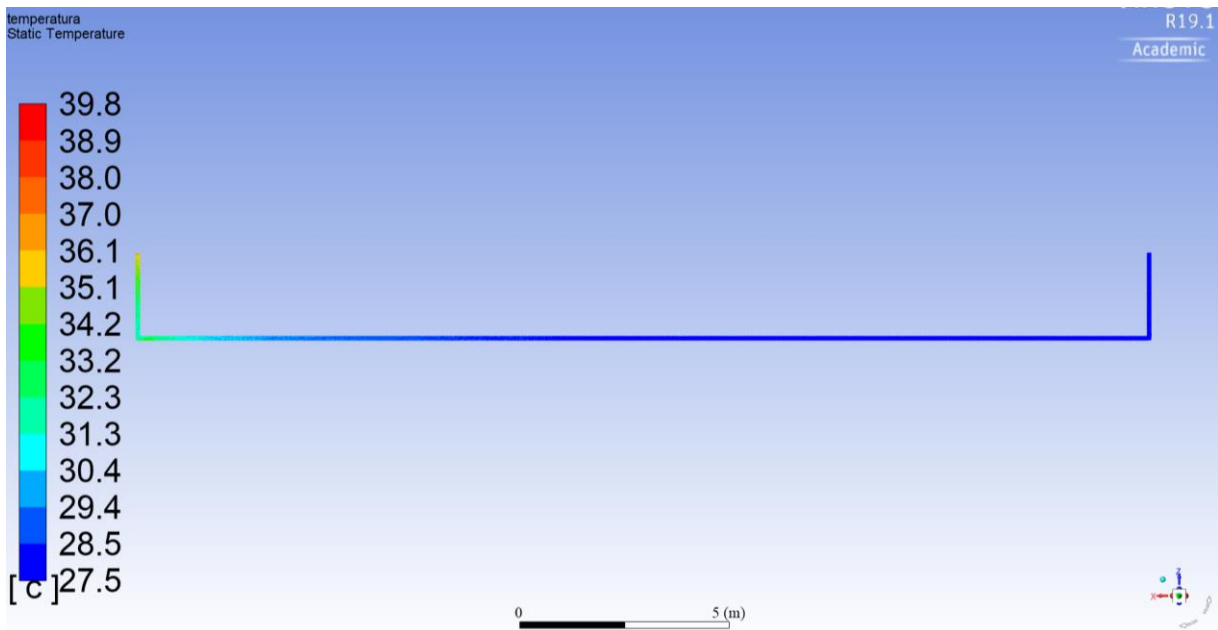


Figura 3. 5. Comportamiento térmico del aire dentro del intercambiador de calor D 10.

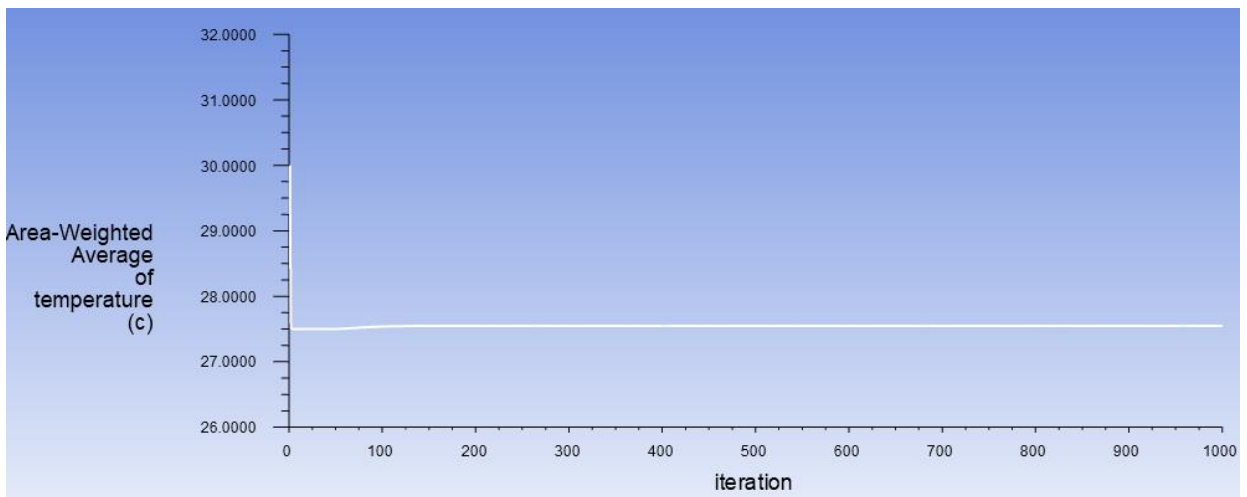


Figura 3. 6. Gráfica de temperatura promedio en la salida del intercambiador.

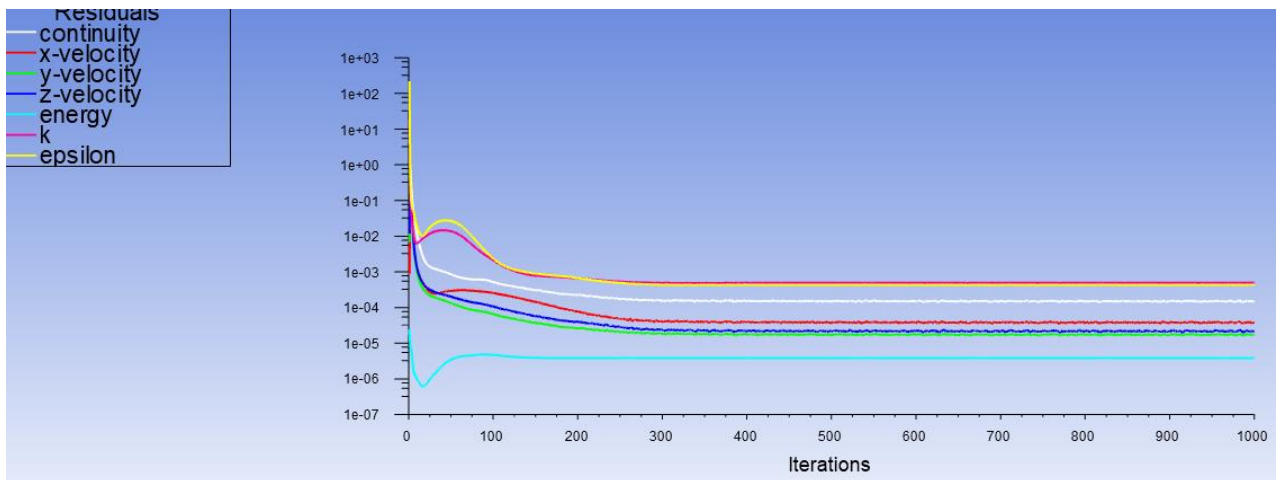


Figura 3. 7. Residuales escalonados.

3.1. Validación de la simulación.

La Tabla 3. 2 muestra la comparación entre la temperatura del subsuelo y la temperatura del aire a la salida del EAHE obtenida a través de la simulación CFD, así como el porcentaje de divergencia entre ambas.

Tabla 3. 2. Diferencia entre la temperatura del subsuelo y la temperatura de salida del EAHE.

Fecha	T ambiente °C	T del subsuelo °C (2.1 m)	T salida EAHE °C (simulación)	Convergencia
25/11/2017	28.4	28.1	27.2	3.2%
14/12/2017	27.7	27.4	26.5	3.3%
11/01/2018	31.3	26.8	26	3.0%
01/02/2018	28.6	26.1	25.4	2.7%
18/03/2018	37.2	27.2	27	0.7%
03/04/2018	36.1	27.5	27.5	0.0%
02/05/2018	35.2	28.5	28.4	0.4%
06/06/2018	36	29.4	29.3	0.3%
05/07/2018	34.3	29.3	29.3	0.0%
08/08/2018	35.2	29.9	29.8	0.3%
09/10/2018	33.7	29.9	29.5	1.3%

La tabla muestra la comparación entre la temperatura del subsuelo y la temperatura del aire a la salida del EAHE obtenida a través de la simulación CFD, así como el porcentaje de

divergencia entre ambas, como se puede observar, durante los meses de noviembre a febrero la divergencia entre ambas temperaturas es mayor alrededor del 3%, esto se debe a que aunque la temperatura ambiente es similar a la temperatura del subsuelo a 2.1 m la temperatura que hay cerca de la superficie (0.35 m, 0.60 m, 1.1 m) es mucho menor durante la temporada otoño invierno (ver Figura 2. 15). Por otro lado, durante los meses marzo a agosto existe una muy buena convergencia con un porcentaje promedio de 0.3% ya que durante esta temporada el EAHE puede enfriar el aire ambiente hasta alcanzar la temperatura del subsuelo. Los resultados nos permiten afirmar el EAHE tiene el potencial de enfriar el aire ambiente hasta alcanzar la temperatura del subsuelo o lograr una temperatura muy similar a ella.

3.2. Discusión.

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, podemos estar de acuerdo con los resultados de algunas investigaciones realizadas sobre el funcionamiento de los intercambiadores de calor aire a tierra (EAHE) en México [21], [22], [23], [24] y [25], ya que el sistema es capaz de enfriar el aire durante las épocas calurosas del año hasta alcanzar una temperatura similar a la del subsuelo a 2.10 m de profundidad (la cual durante este periodo mantiene una temperatura menor).

Se observó que el EAHE tiene el potencial de disminuir la temperatura hasta 10.0 °C (como es el caso del mes de marzo), sin embargo, la viabilidad del sistema no se basa únicamente en una disminución de la temperatura ambiente, el objetivo principal de los intercambiadores de calor es climatizar las viviendas proporcionando una temperatura confortable de 22.0 a 25.0 °C a lo largo del día. La Ciudad de Mérida, Yucatán se caracteriza por mantener temperaturas elevadas durante la mayor parte del año, este hecho hace necesario poner especial atención a las temperaturas que logra alcanzar el sistema y verificar si estas caen dentro del rango de confort térmico, no obstante, este análisis es ignorado en algunos estudios consultados.

Las investigaciones que no toman en cuenta la temperatura real del suelo en función de su profundidad, la temperatura del subsuelo en la profundidad de enterramiento, así como la temperatura ambiente, muestran una evaluación limitada en cuanto al rendimiento de los intercambiadores, debido a que la temperatura ambiente y la temperatura del suelo son variables que dependen del tiempo, por lo que cambian no solo durante el año, mes o semana, sino que varían durante el día. A diferencia de los trabajos [22],[23], [24] y [25] en esta investigación se utilizaron los datos de la temperatura ambiente y datos de la temperatura del subsuelo registrados en el experimento correspondientes a distintos días del año para obtener un panorama real del funcionamiento del sistema, los resultados obtenidos arrojaron que la disminución de temperatura utilizando el intercambiador de calor no es suficiente para refrigerar y brindar confort térmico a las viviendas meridanas, ya que las temperaturas que logra el EAHE oscilan en el rango de 27.0 a los 29.0 °C, por lo que se infiere que el sistema no podría suplir al A.A convencional, sin embargo, la reducción de temperatura crea oportunidad para la aplicación del EAHE ya que podría aprovecharse la temperatura del acuífero o bien su uso podría ayudar a disminuir el consumo de energía de los A.A, estas opciones se discuten en la sección de perspectivas.

Es importante resaltar que, si bien para el estudio del funcionamiento del EAHE se tomaron en cuenta las características reales mencionadas anteriormente, la evaluación se llevó a cabo en tiempo estable, sin embargo, debido a que la temperatura del ambiente y del suelo cambia durante todo el día lo adecuado es evaluar su funcionamiento durante periodos de tiempo más largos, en el rango de días o semanas para obtener resultados más precisos sobre el potencial de enfriamiento.

- Se encontró que la profundidad de enterramiento del sistema es un factor primordial en el diseño e implementación y no es difícil calcularla, esto ayudará a limitar la excavación y por lo tanto los costos para su aplicación.
- La simulación puede evitar el gasto de la colocación del sistema, como el caso del trabajo tal UQROO, no es necesario experimentar.

CONCLUSIONES

El objetivo de este trabajo fue evaluar el recurso térmico del subsuelo de Mérida y sus alrededores por lo que se realizó el registro experimental de temperaturas con respecto a la profundidad durante un periodo de un año, los datos obtenidos permitieron conocer la dinámica térmica del suelo y su ciclo, así como la distribución de temperaturas reales y su variación estacional. Esto en un sitio con condiciones similares a las de los fraccionamientos al norte de Mérida, donde se concentra el mayor uso de los sistemas de A.A, y que presentan una importante remoción de cobertura vegetal.

Las medidas experimentales fueron utilizadas para validar el modelo matemático de transferencia de calor. El ajuste arrojó buenos resultados, sin embargo, presentó limitaciones en su exactitud, con el análisis de ambas respuestas (reales y calculadas) fue posible detectar qué variables meteorológicas pueden ser incluidas en el cálculo para mejorar la precisión de este. Los resultados de la simulación numérica mostraron que el análisis del rendimiento térmico del intercambiador no es fuertemente influenciado bajo la consideración de paredes isotérmicas o adiabáticas, esto se debe a que la mayor pérdida de calor del aire sucede en la parte horizontal del intercambiador y cuando el fluido vuelve a ascender para dirigirse a la salida las ganancias térmicas son mínimas que se consideran despreciables, como ocurre durante la primavera.

Existe una diferencia en el funcionamiento del intercambiador de calor en función del diámetro como lo reportado en estudios paramétricos realizados por Santamouris [28] y Benhammou [39], Ahmed [56], Serageldin [58] el sistema con un diámetro de 10 cm tiene un potencial de enfriamiento mayor respecto a uno de mayor diámetro, este efecto fue estudiado a través de pruebas previas.

Durante el invierno, el EAHE es capaz de alcanzar una temperatura por debajo de la temperatura ambiente debido a la baja temperatura cerca de la superficie, la cual caracteriza la temporada otoño-invierno. De forma contraria, durante la primavera el intercambiador puede enfriar el aire del ambiente hasta alcanzar la temperatura del subsuelo la cual siempre será menor. Sin embargo, durante la primavera la temperatura comienza a incrementar hasta los 29 °C por lo que la temperatura a la salida del intercambiador será similar o un ligeramente mayor, desafortunadamente esta temperatura está fuera del rango de confort térmico [8].

El intercambiador de calor tiene el potencial de disminuir la temperatura del aire hasta igualarla con la del subsuelo, sin embargo, la temperatura del subsuelo durante la primavera y el verano aumenta hasta alcanzar casi los 30.0 °C conservando este gradiente hasta buena parte del invierno, por lo que la implementación de este sistema para acondicionar una vivienda en Mérida, en zonas desprovistas de cobertura vegetal no sería viable, dadas las condiciones térmicas del subsuelo.

Por lo anteriormente expuesto, la hipótesis se rechaza, la tecnología EAHE no sería viable para acondicionar el aire interior de una vivienda de Mérida, si ésta se sitúa en zonas desprovistas de cobertura vegetal, donde el recurso de frescor será limitado.

Estas conclusiones van en contra de lo expuesto por Xamán [22] [23], que reportaba viabilidad a partir de simulaciones numéricas que resultaron en escenarios demasiados optimistas, dado que partieron de una línea base (condiciones climáticas, recurso térmico subterráneo y propiedades del subsuelo) diferente.

Los resultados aquí propuestos parten de un análisis de las condiciones locales directamente medidas y estimadas in situ.

PERSPECTIVAS.

Este trabajo llevó a la conclusión de que un intercambiador de aire-tierra convencional no sería viable como método de climatización en Yucatán, ya que por sí solo no podría proporcionar una temperatura confortable durante todo el año. Sin embargo, este trabajo también apunta hacia la pertinencia de evaluar otras variantes de la tecnología que podrían aprovechar el recurso térmico disponible en el subsuelo y a fin de reducir el uso de los sistemas de A.A, no a través de su reemplazo, si no reduciendo su ciclo de trabajo.

A continuación, se describen algunas opciones que podrían ser aplicadas de acuerdo con las características locales:

- Considerar más variables meteorológicas.

De acuerdo con los resultados del modelo de transferencia de calor considerando los parámetros de interés calculados a partir del método inverso, la inexactitud del ajuste de curvas de temperaturas calculadas y las temperaturas experimentales en función de la profundidad podría reducirse al agregar otras variables meteorológicas al modelo tales como:

- precipitación
- humedad relativa
- velocidad del viento,

Ya que únicamente se consideraron datos de temperatura ambiente y radiación solar.

Los parámetros de interés mostraron gran sensibilidad ante fenómenos atmosféricos, dado que ninguno permaneció constante durante los periodos de tiempo evaluados en el año. Fue posible observar que las temperaturas lograban un mejor ajuste luego de los días con lluvia, con velocidad del viento menor a 20 km/h y humedad relativa por encima del 60%, por lo que se infiere que incluir este tipo de valores al cálculo proporcionará un modelo más robusto y un mejor ajuste entre las temperaturas.

- Desarrollar el modelo de transferencia de calor en el subsuelo considerando diferentes capas.

El modelo planteado en el proyecto involucra el análisis de un bloque de material homogéneo el cual está dividido en 6 secciones correspondientes a las profundidades de enterramiento de los sensores de temperatura, cada sección se caracteriza por tener las mismas propiedades termofísicas. Sin embargo, con base en los resultados obtenidos luego de la estimación de los parámetros, se encontró que los fenómenos atmosféricos afectan la temperatura y la sensibilidad de los parámetros en función de la profundidad, es decir la temperatura de superficie es la más afectada ya que si, por ejemplo, existe precipitación esta sección va a tener el mayor contenido de humedad respecto a las otras. Las siguientes dos secciones a 0.35 y 0.60 m de profundidad tendrán un menor contenido de humedad y luego de estas, el contenido continuará disminuyendo para las secciones más profundas, por lo que se deduce que los parámetros no pueden ser constantes en función de la profundidad. Por esta razón se cree conveniente desarrollar el modelo de transferencia de calor en el subsuelo considerando distintas capas las cuales correspondan a las profundidades de enterramiento de los sensores y que estas, puedan tener diferentes parámetros termofísicos respecto a su profundidad.

Este enfoque podría mejorar la exactitud del modelo, ya que el método inverso para la estimación parámetros se aplicaría a cada sección y se obtendrían diferentes resultados para cada una disminuyendo el error entre la temperatura calculada y la temperatura experimental.

- Realizar simulación de dinámica de fluidos computacional en estado transitorio.

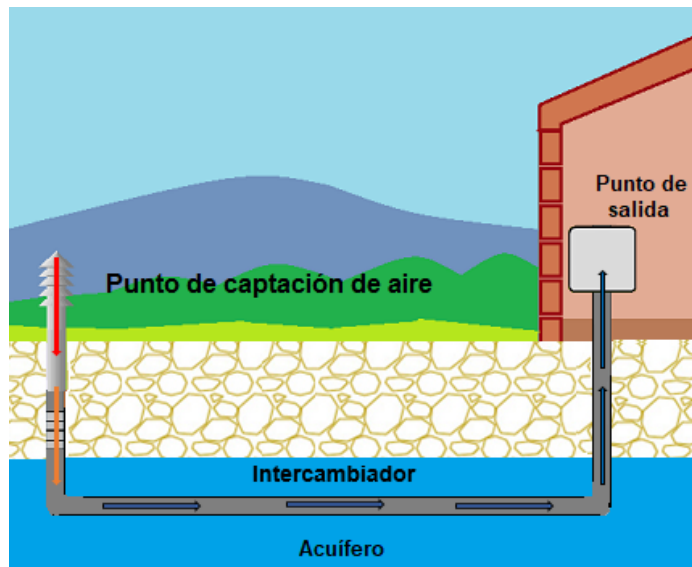
En este trabajo de investigación se realizó una simulación de un intercambiador de calor en el subsuelo enterrado a una profundidad de 2.1 m donde se tomaron en cuenta las temperaturas reales obtenidas a partir de las medidas experimentales. Se trató de un análisis en estado estable donde se evaluó el potencial de enfriamiento del sistema considerando la hora con mayor temperatura en algunos días representativos del año. A pesar de que el análisis mostró buenos resultados nos indica la respuesta inmediata del sistema, es decir, el cambio en la temperatura del aire al entrar y salir de la tubería.

Es conveniente conocer el potencial de enfriamiento del intercambiador durante todo el día o durante toda la temporada de calor, por lo que un análisis en estado transitorio será una buena herramienta para conocer el rendimiento del intercambiador de calor durante períodos largos e identificar los lapsos que presentan un buen funcionamiento del intercambiador, así como los periodos deficientes.

- Investigar sobre la factibilidad y el rendimiento de un intercambiador de calor sumergido en el acuífero [24].

Debido a que la conductividad térmica del agua es menor que la de la tierra, es posible aprovechar un gran cuerpo de agua naturalmente fría para disipar el calor.

El manto acuífero en Yucatán se encuentra a poca profundidad en la zona noroeste (cerca de la costa) lo que permite aprovechar sus propiedades térmicas a través de la instalación de un intercambiador de calor sumergido en el agua subterránea. La temperatura del agua registrada muestra una temperatura de 28.0 °C en primavera y 25.0 °C en otoño, conservando una temperatura menor que la registrada en el subsuelo (27.0 a 29.0 °C). Esto indica que la temperatura del aire a la salida del intercambiador sumergido será menor que la proveniente de un intercambiador en tierra. Sin embargo, para su futura aplicación es indispensable realizar una simulación de dinámica de fluidos computacional para conocer el comportamiento de la temperatura en el intercambiador. Además, efectuar un estudio hidrogeológico local para evaluar la calidad del agua con el objetivo de evitar problemas de corrosión y sarro que puedan afectar el funcionamiento del sistema. De esa forma evaluar si su el uso del sistema es conveniente.



Intercambiador sumergido en agua subterránea.

- Investigar sobre la factibilidad del almacenamiento de “frescor invernal” en el subsuelo para su aprovechamiento posterior.

Utilizar las rocas como un medio de almacenamiento de energía térmica proporcionara una reserva estacional a gran escala de frescor en sitios naturales subterráneos, debido a que durante parte del otoño e invierno la temperatura ambiente desciende por las noches y sobre todo por las mañanas (6:30 am) alcanzando temperaturas de hasta 11.9 °C.

El aire fresco característico de esta temporada podría ser almacenado por las rocas del subsuelo, es decir, el aire fresco podría utilizarse como medio de transporte a través de un intercambiador de calor con un tapón que impida la salida del aire hacia la vivienda, el objetivo es que el fluido permanezca en el subsuelo en tiempo y cantidad suficiente hasta que la roca alcance una temperatura similar o menor a la del aire, hecho que dependerá de los fenómenos meteorológicos (frentes fríos), este depósito se renovaría cada año, lo que garantiza que esta solución siempre será viable. Para comprobar lo propuesto es necesario desarrollar una simulación de dinámica de fluidos en estado transitorio con el objetivo de conocer el potencial de enfriamiento de la roca y la duración de este.



Almacenamiento de energía térmica en la roca.

- Investigar sobre la factibilidad y el rendimiento de un sistema híbrido acoplado al A.A un intercambiador de calor.

Según investigaciones realizadas por Soni [62] el consumo de energía del sistema de A.A convencional puede ser reducido radicalmente al hibridar el sistema acoplándolo con un intercambiador de calor de aire a tierra donde ambos funcionen simultáneamente, esto es, que el aire proveniente del A.A. acondicione la vivienda y el aire proveniente del intercambiador de calor en el subsuelo se utilice para enfriar los tubos del condensador del sistema de A.A. [63] para conocer la eficiencia del sistema será pertinente tomar muestras de las temperaturas obtenidas en la vivienda y en el condensador del sistema, luego de esto un análisis económico para evaluar el ahorro total sería una poderosa herramienta para acreditar la aplicación y uso del sistema.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] SEDUMA, Gobierno del Estado de Yucatán (2015) Estrategia Estatal de Energía Sustentable del Estado de Yucatán
- [2] Gobierno del estado de Yucatán (2014) Programa especial de acción ante el cambio climático del estado de Yucatán.
- [3] SENER (2015) Evaluación rápida del uso de la energía. Mérida, Yucatán, México.
- [4] Morillón D., Oropeza I. (2009). Atlas de la ventilación natural para la República Mexicana. Potencial para ahorrar energía en la climatización de edificios. Instituto de Ingeniería UNAM.
- [5] Gob.mx (2017), Centro Nacional de Control de Energía. <http://www.gob.mx/cenace> Consultado: 20 de enero de 2017
- [6] International standard. (2005) ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment- Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criterion.
- [7] Gómez G et al. (2009) Comfort temperatures inside low-cost housing: Case: Six warm climate cities in Mexico, 26th Int. Conf. Passiv. Low Energy Archit, 22 -24 junio, Quebec, Canada.
- [8] Al-Ajmi F., Loveday D., Hanby V. (2006) The cooling potential of earth–air heat exchangers for domestic buildings in a desert climate, Build. Environ. 41, 235–244.
- [10] Comisión Federal de Electricidad CFE, Tarifas - CFE. http://acfe.gob.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/Tarifas/tarifas_negocio.asp. Consultado: 18 de enero de 2017
- [11] CINVESTAV (2012), CINVESTAV PARQUE CIENTIFICO YUCATAN Weather <http://www.mda.cinvestav.mx/weather/> Consultado: 30 de septiembre de 2018
- [12] Chan I, Aire acondicionado ‘dispara’ el consumo de electricidad, <http://sipse.com/novedades/aire-acondicionado-cancun-ahorro-electricidad-cfe->

propuestas-energua-ut-escuela-quintana-roo-193824.html Consultado: 8 de diciembre de 2016

- [13] Carrocera M. (2014), El sol que ilumina a México, Ideas RSE 11, 26–30
- [14] Durán R., Méndez M. (2010) Biodiversidad y Desarrollo Humano en Yucatán, Mérida: CICY, PPD-FMAM, CONABIO, SEDUMA, 4–6.
- [15] Escolero O., Marin L., Dominguez E., Torres S., (2006) Dynamic of the freshwater–saltwater interface in a karstic aquifer under extraordinary recharge action: the Merida Yucatan case study, Environ Geol, 719-723
- [16] Lesser J. (1976), Resumen del estudio geohidrológico e hidrogeoquímico de la península de Yucatán. Boletín de divulgación técnica 10, 1-11
- [17] Ciencias Naturales. Aguas Subterráneas, <http://www.areaciencias.com/ecologia/aguas-subterranas.html>. Consultado 20 de diciembre de 2017
- [18] Eppelbaum L., Kutasov I., Pilchin A. (2014.) Thermal Properties of Rocks and Density of Fluids. En Applied Geothermics. Springer, 99-109
- [19] INEGI. (2002) Estudio hidrológico del estado de Yucatán.
- [20] EBA Estructuras bioclimáticas. La energía geotérmica: disfrutar del calor de la tierra, <http://ebasl.es/la-energia-geotermica/>. Consultado: 18 de enero de 2018
- [21] Román C., Vidal A., Gómez V., Domínguez J., Sánchez A., (2010) Exploración de perfiles de temperatura en el subsuelo para aplicaciones de enfriamiento pasivo, Congreso Internacional de AcademiaJournals.com, 8-10 septiembre, Chiapas, México.
- [22] Xamán J., Hernández I., Alvarado R., Hernández I., Álvarez G., Chavéz Y.(2015) Pseudo transient numerical study of an earth-to-air heat exchanger for different climates of México, Energy Build ,99, 273-286.

- [23] Xamán J., Hernández-Pérez I., Arce J., Álvarez G., Ramírez L., Noh F. (2014). Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation, *Energy Build.*, 85, 356–361.
- [24] Ochoa R. (2011) Diseño de un sistema domestico hidrogeotérmico para climatización en un ambiente tropical cárstico. Tesis de Maestría, CICY, México.
- [25] Arcos M. (2016) Estudio experimental de un intercambiador de calor tierra-aire en la ciudad de Chetumal, Quintana Roo. Tesis de Maestría, UQROO, México.
- [26] Mihalakakou G., Santamouris M., Asimakopoulos D., Tselepidaki I. (1995). Parametric prediction of the buried pipes cooling potential for passive cooling applications, *Sol. Energy* 55, 163–173.
- [27] Mihalakakou G., Santamouris M. and Asimakopoulos D. (1993). Modeling the thermal performance of the earth-to-air heat exchangers. *Sol. Energy* 53, 301-305
- [28] Santamouris M., Mihalakakou G., Balaras C., Argiriou A., Asimakopoulos D., Vallindras M. (1995). Use of buried pipes for energy conservation in cooling of agricultural greenhouses, *Sol. Energy* 55, 111–124
- [29] Bansal NK, Sodha MS, Bhardwaj S., (1983). Performance of earth- air-tunnel system. *IJER* 7, 333-345
- [30] Kumar R., Ramesh S., Kaushik S., (2003). Performance evaluation and energy conservation potential of earth – air – tunnel system coupled with non-air-conditioned building, *Build. Environ* 38, 807–813
- [31] Sharan G., R. Jadhav, 2002. Soil temperature regime at Ahmedabad. *Journal of Agricultural Engineering* 39,1-17
- [32] Sharan G., Jadhav R., (2003). Performance of single pass earth tube heat exchanger: An experimental study, *Indian Inst. Manag. Ahmedabad* 40, 1-6.

- [33] Mihalakakou G, Santamouris M, Asimakopoulos D. (1995) Parametric prediction of the buried pipescooling potential for passive cooling applications. *Sol. Energy* 155,163–73.
- [34] Dhaliwal A., Goswami D. (1984) Heat transfer analysis environment control using an underground air tunnel. *Sol. Energy*, 505–10.
- [35] Shingari B. (1995) Earth tube heat exchanger. *Poultry International* 34, 2–7.
- [36] Hamada Y., Nakamura M., Saitoh H., Kubota H., Ochifuj K. (2007) Improved underground heat exchanger by using no-dig method for space heating and cooling, *Renew. Energy* 32, 480–495.
- [37] Singh A. (2015) Performance Analysis of Earth-Air Tunnel System used for Air-Conditioning of the College Classroom, *J. Energy Resour. Technol.* 5, 71–79.
- [38] Bansal V., Misra R., Das G., Mathur J. (2010) Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling, *Energy Build.* 42, 645–648.
- [39] Benhammou M., Draoui B. (2015) Parametric study on thermal performance of earth-to-air heat exchanger used for cooling of buildings, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, 44, 348-355
- [40] Maillet, D. (2000) *Thermal quadrupoles: solving the heat equation through integral transforms*, John Wiley & Sons.
- [41] Pailhes, J., Pradere, C., Battaglia, J. L., Toutain, J., Kusiak, A., Aregba, A. W., Batsale, J. C. (2012) Thermal quadrupole method with internal heat sources, *Int. J. Therm. Sci.* 53, 49-55.
- [42] Instituto de Ciencias de la construcción Eduardo Torres, ICCL, Instituto de la construcción de Castilla y León. <http://cte-web.iccl.es/> Consultado: 20 de enero de 2018
- [43] Iseger D. (2006) Numerical transform inversion using gaussian quadrature, *PROBAB ENG INFORM SC*, 20, 1–44.

- [44] Perez C. (2018) Propagación Electromagnética. Dpto. de Ingeniería de Comunicaciones Universidad de Cantabria.
- [45] Trillo G., Angullo V. (2008) Guía de la Energía Geotérmica. Optimización de la utilización de la energía geotérmica. (ed.) Universidad Politécnica de Madrid, pp 178-180.
- [46] Patiño L.D., Grauby S., Ezzahri Y., Claeys W. Dilhaire S. (2005) Frequency domain thermoelectric materials characterization: Simultaneous estimation of thermal conductivity, Seebeck coefficient and resistivity from the electric response. Centre de Physique Moléculaire Optique et Hertzienne.
- [47] Or A, Appelbaum J. (2012) Estimation of multi-junction solar cell parameters. Prog. Photovolt: Res. Appl. 21, 713-723.
- [48] Endre D. (2003) Albedo. Encyclopedia of Soil Science, 1-3.
- [49] Daryl, L. (2002) A first course in the finite element method. Pacific Grove, CA: Brooks/Cole.
- [50] Ortiz P. A., Ruiz C. O., Ortiz V. J. (2013). Conceptos básicos del método por elemento finito. En modelado de procesos de manufactura. (ed.) Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería: UNAM, pp 232-235.
- [51] De la Cruz L. (2009) Método de Volumen Finito en la Simulación de Yacimientos Seminarios de Modelación Matemática y Computacional. Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, 12 de junio, CDMX, México.
- [52] Versteeg, H.K., Malalasekera W. (1995) An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method, Longman Scientific & Technical, Loughborough.
- [53] ANSYS. www.ansys.com Consultado: 10 marzo de 2018
- [54] Barth T. J., Jespersen D. (1989) The design and application of upwind schemes on unstructured meshes. AIAA 27th Aerospace Sciences Meeting.

- [55] ANSYS, Inc. ANSYS FLUENT 14.0: Theory Guide.
- [56] Ahmed S., Amanullah M., Khan M., Rasul M., Hassan N. (2016) Parametric study on thermal performance of horizontal earth pipe cooling system in summer. *Energy Convers. Manag.*,324-337
- [57] Misra R., Bansal V., Agrawal G., Mathur J., Aseri T. (2013) CFD analysis based parametric study of derating factor for Earth Air Tunnel Heat Exchanger. *Appl. Energy* 103, 266-277
- [58] Serageldin A., Abdelrahman A., Ookawara S. (2016) Earth-Air Heat Exchanger thermal performance in Egyptian conditions: Experimental results, mathematical model, and Computational Fluid Dynamics simulation. *Energy Convers. Manag.*,25-38
- [59] Ardila J, Hincapié D, Casas J. (2015) Comparison and validation of turbulence models in the numerical study of heat exchangers. *SciELO* <http://dx.doi.org/10.18180/tecciencia.2015.19.8>
- [60] Amanowicz L., WojtkowiakValidation J. (2018) Validation of CFD model for simulation of multi-pipe earth-to-air heat exchangers (EAHEs) flow performance. *Thermal Science and Engineering Progress* 5, 44-49
- [61] B.E. Launder and D.B. Spalding. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press, London, England, 1972.
- [62] Soni K, Pandey M, Bartaria V. (2016) Energy metrics of a hybrid earth air heat exchanger system for summer cooling requirements, *Energy Build.* 1-8
- [63] Suresh S., Mukesh P., Vishvendra B., (2016) Energy metrics of a hybrid earth air heat exchanger system for summer cooling requirement. *Energy Build*, 129, 1-8

ANEXO I

La encuesta fue realizada en un formulario web de Google, el contenido de esta se muestra a continuación:

CALORÓN VS. CONSUMO ELÉCTRICO EN MÉRIDA: DIMENSIONANDO EL PROBLEMA.

Sexo:

Edad:

Nombre de su colonia:

¿Cuántas personas ocupan su vivienda?

¿Cuántos años lleva ocupando su vivienda?

¿Con que equipos de acondicionamiento de aire cuenta en casa?

Aire acondicionado Ventilador Ambos

¿Con cuántos equipos de A.A cuenta en casa? Y ¿de qué capacidades?

	1	2	3	4
1 tonelada				
1.5 toneladas				
2 toneladas				

De estos A.A ¿Cuántos son tecnología invertir?

¿A qué temperatura suele ajustar su sistema de A.A?

	18°C-20°C	21°C-23°C	24°C-26°C	27°C o mas
Primavera- Verano				
Otoño-Inverno				

¿Cuántas horas al día utiliza su A.A?

	Todo el tiempo	Solo en la noche	De 0 a 2 h	De 2 a 4 h	De 4 a 6 h
Primavera- Verano					
Otoño-Inverno					

AIRE ACONDICIONADO EN EL TRABAJO

En CICY ¿Cómo es el A.A de su lugar de trabajo?

Individual Colectivo

En caso de contar con A.A individual. ¿A qué temperatura lo suele ajustar?

18°C-20°C	21°C-23°C	24°C-26°C	27°C o mas

En su lugar de trabajo ¿Cuál es su sensación térmica?

	Siempre	Frecuentemente	Ocasionalmente	Nunca
Mucho calor				
Calor				
Ligeramente caluroso				
Neutro				
Ligeramente frío				
Frío				
Mucho frío				

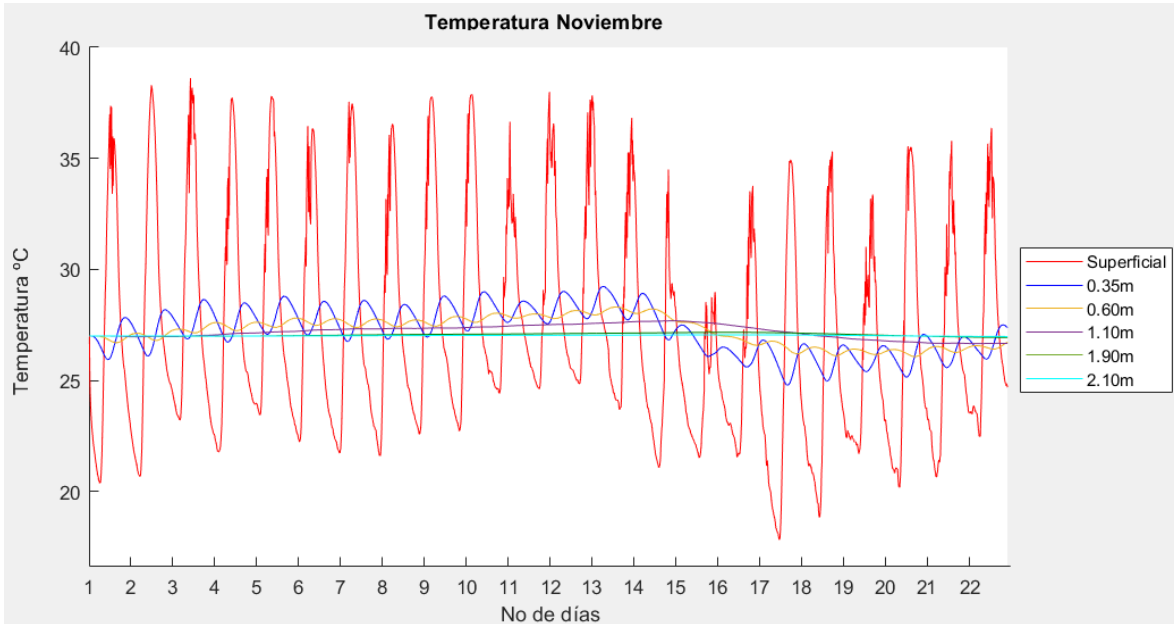
- ¡Ayúdanos!... Por favor envíe una foto SOLO de la parte posterior de su recibo CFE, respondiendo al correo que recibirá al finalizar la encuesta.

ANEXO II

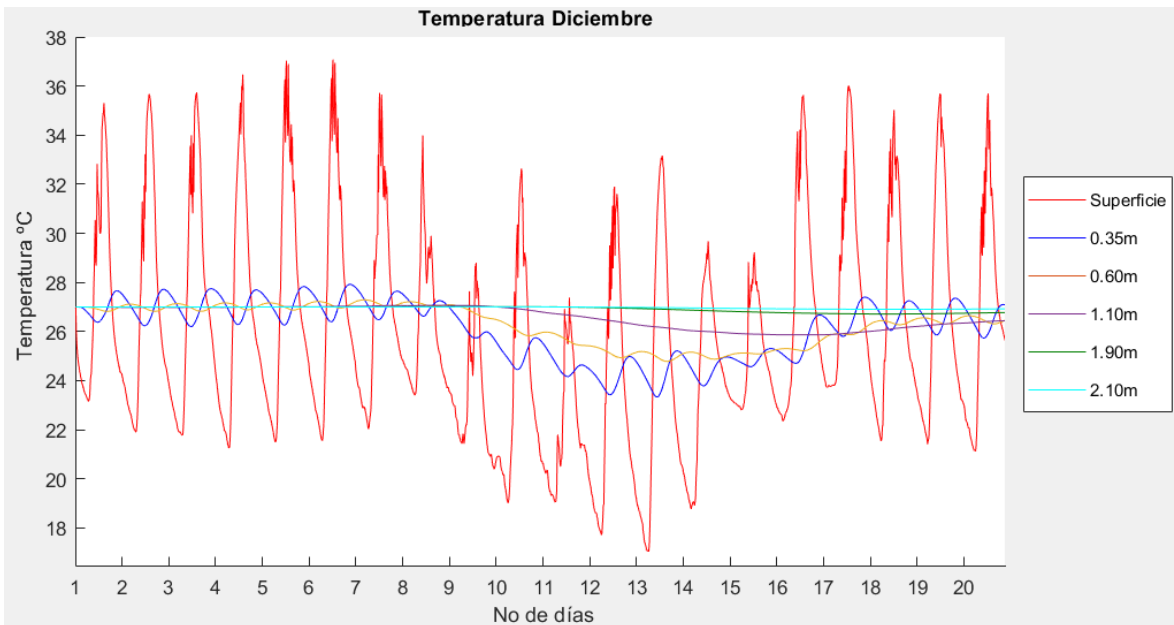
Temperaturas registradas durante:

- Octubre
- Noviembre
- Diciembre
- Enero
- Febrero
- Marzo
- Abril
- Mayo
- Junio
- Julio
- Agosto
- Septiembre

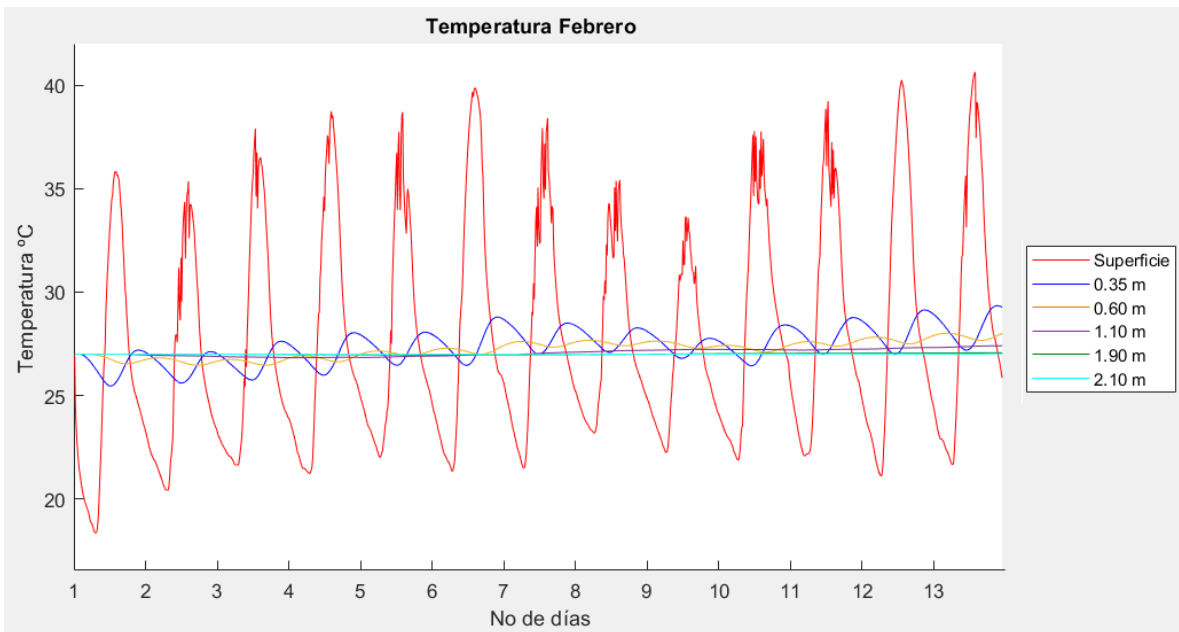
ANEXO III



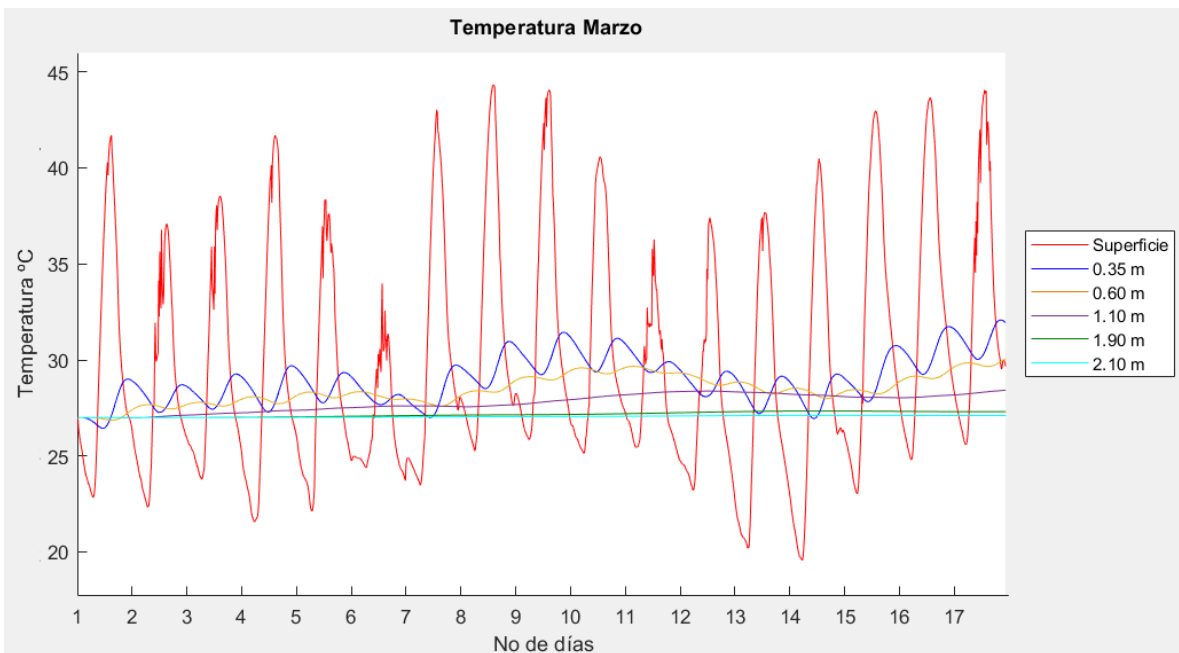
Temperatura del mes de noviembre. Calculada mediante simulación Matlab.



Temperatura del mes de diciembre. Calculada mediante simulación Matlab.



Temperatura del mes de febrero. Calculada mediante simulación Matlab.

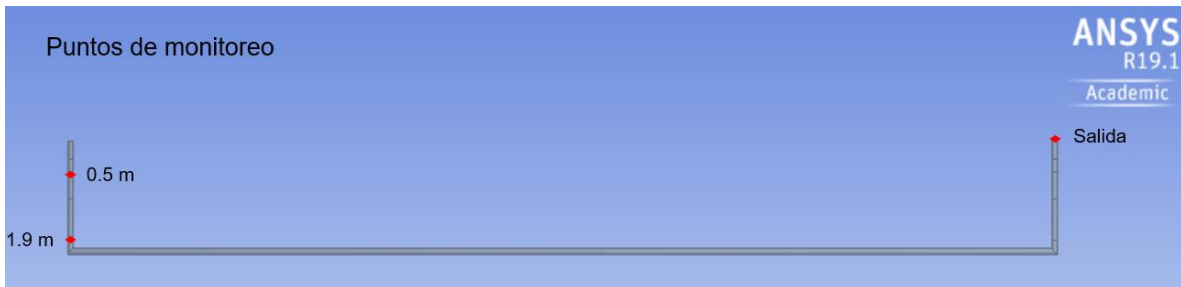


Temperatura del mes de marzo. Calculada mediante simulación Matlab.

ANEXO IV

1. Independencia de malla

Se generaron un total de 11 mallas, 6 para una geometría de un EAHE con un diámetro de 10 cm y 5 mallas para uno de 15 cm de diámetro. Para el análisis de la temperatura se eligieron 3 puntos de monitoreo a lo largo del EAHE, a 0.50 m, a 1.90 m y en la salida del intercambiador.



La siguiente tabla representa las características de las mallas analizadas para el EAHE de 10 cm diámetro.

Características de malla D10.

	Función de tamaño	Centro de relevancia	Métrica de malla	Método	Nodos	Elementos	Calidad Ortogonal Mínima
Malla 1	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	58985	264024	5.29E-02
Malla 2	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	51844	230882	1.04E-01
Malla 3	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	51114	226428	1.50E-01
Malla 4	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	51728	229825	1.67E-01
Malla 5	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	52681	235831	1.77E-01
Malla 6	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	98793	449544	5.76E-02

Los resultados de temperatura correspondientes a los diferentes tamaños de malla se muestran en la siguiente tabla.

Resultados de temperatura.

	Temperatura °C		Salida tubería
	0.5 m	1.9 m	
Malla 1	28.61	28.41	27.1
Malla 2	28.6	28.4	27.1
Malla 3	28.59	28.4	27
Malla 4	28.6	28.4	27.1
Malla 5	28.6	28.4	27.1
Malla 6	28.6	28.4	27.1

Los resultados de temperatura fueron similares en todas las mallas analizadas a pesar de las diferencias en los números de elementos.

La siguiente tabla representa las características de las mallas para el EAHE de 15 cm diámetro.

Características de malla D15.

	Función de tamaño	Centro de relevancia	Métrica de malla	Método	Nodos	Elementos	Calidad Ortogonal Mínima
Malla 1	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	82343	389941	7.86E-02
Malla 2	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	87825	412506	6.46E-02
Malla 3	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	90537	425943	1.51E-01
Malla 4	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	69052	337294	1.87E-01
Malla 5	Proximidad y curvatura	Fino	Calidad Ortogonal	tetraédrico	88373	415772	1.00E-01

Los resultados de temperatura correspondientes a los diferentes tamaños de malla se muestran en la siguiente tabla.

	Temperatura °C		Salida tubería
	0.5 m	1.9 m	
Malla 1	28.65	28.55	27.35
Malla 2	28.75	28.62	27.5
Malla 3	28.75	28.62	27.5

Malla 4	28.75	28.6	27.4
Malla 5	28.75	28.6	27.4

Los resultados concuerdan con la bibliografía consultada, al reducir el diámetro del EAHE se obtiene un mayor enfriamiento. Por esta razón este trabajo se enfoca en la simulación realizada con la malla número 5 para el EAHE de 10 cm de diámetro ya que a pesar del aumento en los elementos de malla no cambiaron los resultados significativamente y este tamaño de cuadrícula requiere un tiempo de cálculo razonable.

2. Simulación de un EAHE con diámetro de 15 cm.

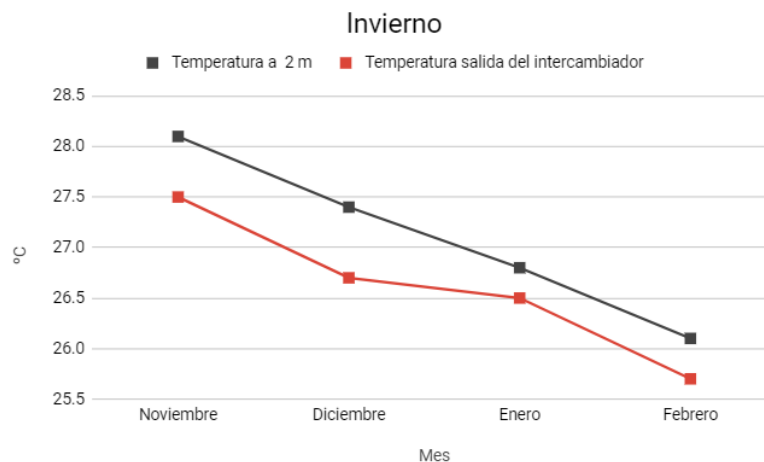
Los resultados obtenidos a la salida del intercambiador D 15 enterrado a 2.10 m de profundidad se muestran en la siguiente tabla.

Resultados de la simulación. Geometría D 15.

Fecha	Temperatura de entrada °C (ambiente)	Tubería de salida pared isotérmica		Tubería de salida pared adiabática	
		Temperatura promedio de salida °C	ΔT °C	Temperatura promedio de salida °C	ΔT °C
25/11/2017	28.4	27.5	0.9	28.1	0.3
14/12/2017	27.7	26.7	1	27.3	0.4
11/01/2018	31.3	26.5	4.8	27.2	4.1
01/02/2018	28.6	25.7	2.9	26.3	2.3
18/03/2018	37.2	27.8	9.4	28.1	9.1
03/04/2018	36.1	28.4	7.7	28.4	7.7
02/05/2018	35.2	29	6.2	29.1	6.1
06/06/2018	36	29.9	6.1	30	6
05/07/2018	34.3	29.7	4.6	29.7	4.6

De acuerdo con los resultados para el intercambiador de D 15, el rendimiento de enfriamiento fue ligeramente mayor considerando la tubería vertical de salida con paredes isotérmicas durante los meses de invierno, ya que el intercambiador enfría el aire en la

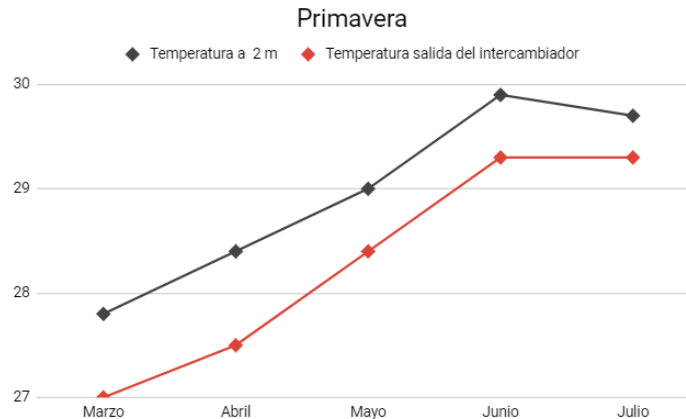
salida en mayor cantidad que el intercambiador con paredes adiabáticas (aproximadamente 0.6 °C), esto ocurre debido a que durante esta estación la temperatura a 2 m es mayor que la distribución de temperaturas hacia la superficie, cuando el fluido viaja a través del intercambiador y llega a su parte horizontal alcanza cierto gradiente de temperatura similar al registrado a esa profundidad durante el experimento, sin embargo, al ascender hacia la salida el aire vuelve a perder calor cuando encuentra temperaturas menos elevadas cercanas a la superficie. La siguiente figura muestra la temperatura a la salida del intercambiador para los días representativo de cada mes durante el invierno mostrados en la Tabla 8 respecto al gradiente de temperatura correspondiente a la profundidad de enterramiento del sistema, como puede observarse, para todos los días el aire a la salida es menor que la temperatura a 2 m de profundidad (diferencia de temperatura entre ambas líneas 0.2 a 0.5 °C), no obstante, para los primeros dos días (enero y febrero) la temperatura a la salida del intercambiador se acerca más a la temperatura del subsuelo, además es posible apreciar como la temperatura del subsuelo a 2 m de profundidad desciende alrededor de 2 °C durante la estación invernal (28 a 26°C).



Temperaturas de salida vs gradiente del subsuelo durante invierno D 15.

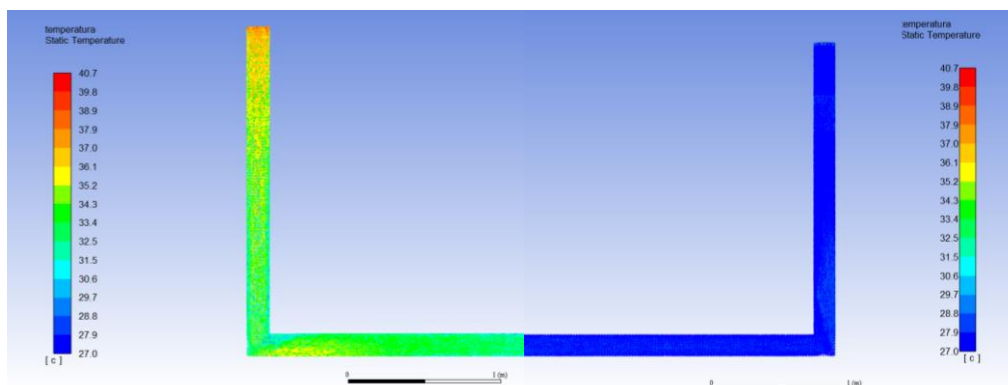
En primavera el proceso ocurre de manera similar, las temperaturas en la salida del intercambiador siguen siendo menores que la temperatura de enterramiento las diferencias entre están oscilan entre los 0.4 y 0.9 °C, sin embargo, durante esta estación el gradiente de temperatura a 2 m de profundidad sufre un aumento de temperatura aproximadamente

2 °C derivado de las altas temperaturas en la atmosfera (27 a 29 °C). Durante esta época el desempeño del intercambiador con paredes isotérmicas es similar al desempeño del intercambiador con paredes adiabáticas en la salida, la diferencia en el comportamiento térmico del intercambiador considerando ambos tipos de paredes es de 0.1 °C.

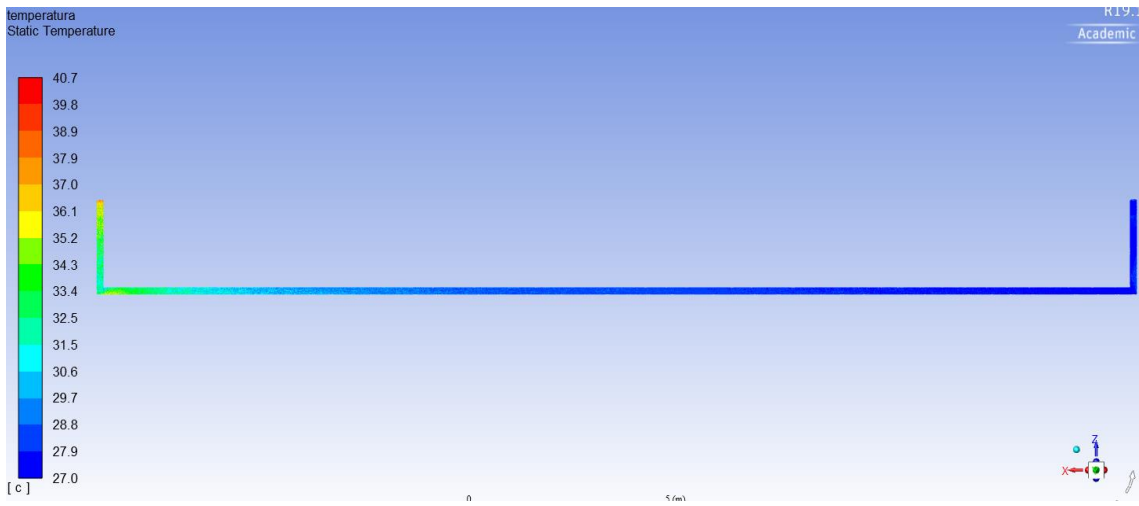


Temperaturas de salida vs gradiente del subsuelo durante la primavera D 15.

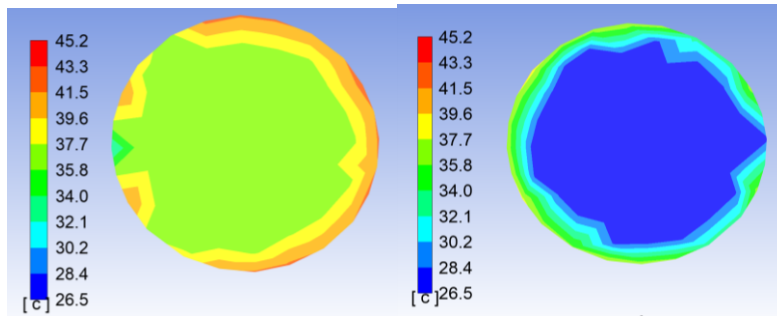
El potencial de enfriamiento máximo sucede el 18 de marzo donde el sistema (paredes isotérmicas) logra disminuir la temperatura ambiente alrededor de 9.4 °C obteniendo una temperatura a la salida de la tubería de 27.8 °C con respecto de una temperatura ambiente de 37.2 °C. A continuación, se muestran algunas figuras sobre los resultados de la simulación correspondientes al día representativo del mes de marzo, donde el intercambiador tuvo el mejor desempeño comparado con los otros días.



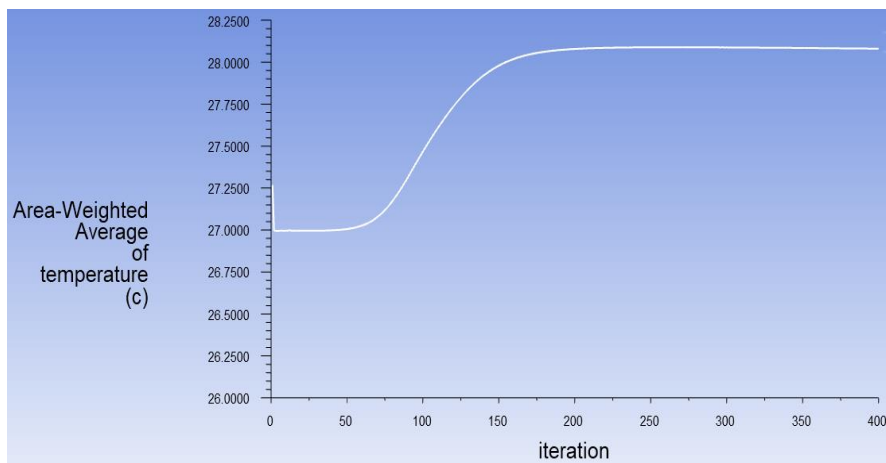
a) Distribución de temperatura en la tubería de entrada. b) Distribución de temperatura en la tubería de salida.



Comportamiento térmico del aire dentro del intercambiador de calor



a) Contornos de temperatura en la entrada del intercambiador. b) contornos de temperatura en la salida del disipador.



Gráfica de la temperatura promedio en la salida del intercambiador.

La diferencia entre las temperaturas de salida del intercambiador considerando las paredes adiabáticas e isotérmicas para cada geometría se muestran en tabla 2:

Diferencia de temperatura en la salida del intercambiador.

T salida (adiabática) - T salida (isotérmica)	
D 15 cm (°C)	D 10 cm (°C)
0.6	1
0.6	0.9
0.7	0.8
0.6	0.7
0.3	0
0	0.3
0.1	0.1
0.1	0.1
0	0.1