



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS

DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA  
DE CALEFACCIÓN PASIVO, COMO SOLUCIÓN A LA  
ALTA DEMANDA ENERGÉTICA

**TESIS**

PARA OBTENER EL GRADO DE  
**INGENIERO MECÁNICO**

PRESENTA

**EDUARDO ARTURO HERNÁNDEZ CAMPOS**

**ASESOR: DR. MOISÉS MONTIEL GONZÁLEZ**

CUERNAVACA, MORELOS FEBRERO, 2023

Este proyecto se realizó en la Facultad de Ciencias Químicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de Morelos, bajo la asesoría del Dr. Moisés Montiel González.

# COMITÉ TUTORAL

Dr. Moisés Montiel González

Dr. Mario Limón Mendoza

Dr. José Gerardo Vera Dimas

Mtro. Francisco Javier Becerra González

Ing. Sergio Rene Pedral Monsalvo



## **DEDICATORIA**

A mis padres, Eduardo Hernández Corona y Eunice Campos Bueno, por la perseverancia y constancia que los caracteriza y que me ha infundado siempre, por el valor mostrado para salir adelante y por su amor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mi Director de Tesis, el Dr. Moisés Montiel por su ayuda incondicional durante cada una de las etapas del desarrollo de esta tesis, permitiéndome desarrollar este proyecto.

Al Director de la preparatoria comunitaria de Tres Marías por recibirnos e implementar nuestro proyecto.

Al maestro Sergio Sergio Reyes Galindo por sus sugerencias de diseño.

# ÍNDICE

ABREVIATURAS	12
CAPÍTULO 1	13
INTRODUCCIÓN.	13
1.1 Desarrollo sustentable.	13
1.2 Energías renovables y su potencial en edificaciones.	14
1.3 Pobreza energética	15
1.4 Economía verde	15
1.5 Economía circular	17
1.6 Energía neta cero	19
1.6.1 Antecedentes de construcciones térmicamente eficientes	19
1.6.2 Planteamiento del problema y justificación	20
1.7 Justificación	21
1. 8 Objetivos	22
Objetivo general	22
Objetivos específicos	22
1.9 Estructura general de la tesis	22
CAPÍTULO 2	23
EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES	23
2.1 Estado actual de los edificios energéticamente eficientes	23
2.2 Aplicación de tecnologías energéticamente renovables	24
2.3 Arquitectura bioclimática	25
2.4 Beneficios ambientales	25
2.5 Características principales edificaciones energéticamente eficientes	25
2.6 Retos para edificaciones térmica y energéticamente eficientes	26
2.7 Diseño de sistemas pasivos para climatización y problemas de modelado	27
2.8 Fundamentos de sistemas pasivos para climatización	28
2.8.1 Confort térmico	29
2.8.2 Temperatura del aire y humedad relativa del aire	30
2.8.3 Movimientos del aire	31
2.8.4 Temperatura radiante media	32

2.8.5 Estándar ASHRAE	33
2.8.6 Confort adaptativo	34
2.8.7 Eficiencia térmica	34
2.8.8 Parámetros de la envolvente de un edificio.	35
2.8.9 Aislantes térmicos	35
2.9 Intercambiadores de calor tierra aire	35
2.9.1 Principios de los intercambiadores de calor tierra aire	36
2.9.2 Ventajas y desventajas de un intercambiador de calor tierra aire	37
2.9.3 Variables bioclimáticas	37
CAPÍTULO 3	38
METODOLOGÍA	38
3.1 Contexto socio económico de la ciudad de Tres marías	38
3.2 Ubicación	40
3.3 Infraestructura	41
3.4 Estrategia experimental	42
3.4 Descripción del sistema fotovoltaico	44
3.5 Estudios preliminares	45
3.5.1 Tipo de suelo	47
3.6 Diseño de un sistema de calefacción pasivo	48
3.6.2 Factores bioclimáticos	50
3.6.3 Análisis de cargas térmicas	51
3.6.4 Factibilidad técnica de los intercambiadores de calor tierra aire	54
3.7 Selección de aislante térmico	56
3.9 Selección del micro inversor	57
CAPÍTULO 4	59
RESULTADOS	59
4.1 Análisis de resultados	59
4.2 Justificación de los parámetros físicos del sistema pasivo “GAHE”	60
4.3 Cumplimiento de la norma ASHRAE 55 2020	60
4.4 Cálculo de pérdidas de presión	62
4.5 Factibilidad económica de los intercambiadores de calor tierra aire	65
4.6 Renderizado y parámetros físicos del sistema del calefacción pasivo	66



4.7 Factibilidad económica de un sistema activo de calefacción	68
4.7.1 Retorno de inversión	70
4.7.2 Mantenimiento	70
4.8 Factibilidad ambiental del intercambiador de calor tierra-aire	71
4.9 Justificación del material de construcción	72
CAPÍTULO 5	73
CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS	73
5.1 Conclusiones	73
5.2 Perspectivas a futuro	74
BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES CONSULTADAS	75

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Desafíos de una red energética inteligente. “Evolution to net-zero energy buildings” Andreas Athienitis, William O’Brien, and Jose	27
Tabla 3 Parámetros físicos de la zona de estudio	43
Tabla 3.1 Variables bioclimáticas	43
Tabla 4.1 Variables bioclimáticas	59
Tabla 4.2 – Inversión total para la implementación de un pozo canadiense	65
Tabla 4.3 Inversión total para la implementación de un sistema activo de calefacción por minisplit	69
Tabla 4.4 Resultados de longitud, utilizando tubería de acero de 10 in, cédula 40	72

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Componentes del desarrollo sostenible Fuente: <a href="https://cepei.org/documents/desarrollo-sostenible/">https://cepei.org/documents/desarrollo-sostenible/</a> Fecha de consulta: 20/01/23	14
Figura 1.2 Múltiples Impactos de un sistema de energía limpia Fuente: Measuring multiple impacts of low-carbon energy options in a green economy context Applied Energy 179 (2016), 1409-1426 DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.027	17
Figura 1.3 Diagrama de economía circular Fuente: <a href="http://www.ambientologa.net/2015/05/economia-circular-ventajas-e.html">http://www.ambientologa.net/2015/05/economia-circular-ventajas-e.html</a> fecha de consulta 24/08/23	18
Figura 2.1 Zona de Confort en función de la temperatura del aire y la humedad relativa Fuente: <a href="https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano">https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano</a>	30
Figura 2.2 Zona de Confort en función de la temperatura del aire y la velocidad del aire Fuente: <a href="https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano">https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano</a>	31
Figura 2.3 Zona de Confort en función de la temperatura del aire y la temperatura de las superficies Fuente: <a href="https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano">https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano</a>	32
Figura 2.4 Rangos aceptables de temperatura operativa y humedad, de acuerdo con el método gráfico del estándar ASHRAE 55 [90]	33
Figura 3 Diagrama de flujo de la metodología de diseño	39
Figura 3.1 Ubicación geográfica, captura realizada en Google Earth	40
Figura 3.2 Infraestructura, captura realizada en Google Earth	41
Figura 3.3 Aulas para climatizar	42

Figura 3.5 (a) Panel solar instalado	44
Figura 3.5 (b) Celdas fotovoltaicas del panel solar	45
Figura 3.6 (a) Objetos de sombra principales, que afectan la ganancia de calor en el caso de estudio	46
Figura 3.6 (b) Objetos de sombra principales, que afectan la ganancia de calor en el caso de estudio	46
Figura 3.7 (a) Zanja realizada en el caso de estudio	47
Figura 3.7 (b) Capas del suelo	48
Figura 3.8 Funcionamiento de un intercambiador tierra aire, elaboración propia.	50
Figura 3.9 (a) especificaciones técnicas de aire disponible para la aplicación de flujo de aire constante (b) especificaciones técnicas del panel solar disponible	57
Figura 3.9.1 Microinversor propuesto: Walfront WVC - 600W	58
Figura 4.1 Cumplimiento de la norma ASHRAE 55 Elaborado en el método adaptativo en: <a href="https://comfort.cbe.berkeley.edu">https://comfort.cbe.berkeley.edu</a>	61
Figura 4.2 Visualización del sistema con su altura respectiva debido a la inclinación	63
Figura 4.3 Renderizado de la Geometría final realizado en Solid Works 2018	66
Figura 4.3.1 (a) Dimensionamiento de la geometría final realizado en Solid Works 2018 unidades en metros	67
Figura 4.3.1(b) Dimensionamiento de la geometría final realizado en Solid Works 2018 unidades en metros	67

## **ABREVIATURAS**

**ASHRAE** Sociedad Estadounidense de Ingenieros en Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado

**COP21** Conferencia de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático 2021

**DOE** Departamento de Energía de los Estados Unidos

**EPOC** Enfermedad pulmonar obstructiva crónica

**ER** energías renovables

**GAHE** Intercambiador de calor tierra aire

**GEIs** gases efectos invernadero

**HVAC** Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado

**IAQ** Calidad del aire interior

**MIT** Instituto de Tecnología de Massachusetts

**NZEB** Edificio energía cero

**UE** Unión Europea

**UNAM** Universidad Autónoma de México

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN.

### 1.1 Desarrollo sustentable.

A finales de la década de 1960, surgió una creciente preocupación a nivel mundial debido a los problemas ambientales, por lo que organismos internacionales, especialistas de diversas áreas y gobiernos de diversos países, comenzaron a centrar su atención en aspectos ecológicos, ambientales y de conservación de los recursos naturales. Así, surgieron diversos foros y tratados internacionales, en los cuales podemos encontrar, el Club de Roma en 1968, la conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente Humano en 1972 y el Principio 19; cuyos principales objetivos se centraban en frenar los conflictos ambientales existentes hasta el momento y en la educación ambiental, con el fin de mejorar la calidad de vida de las personas y la conservación del medio ambiente.

Sin embargo, fue hasta 1974 con la Declaración de las Naciones Unidas para un Nuevo Orden Económico Internacional, que surgió la idea de la implementación de un nuevo modelo de desarrollo en el que se tomará en cuenta la armonía entre el hombre y el medio ambiente (Quintana et al., 2011) [1]. Sin embargo, fue hasta 1987, cuando la Comisión Mundial para el Medio Ambiente y Desarrollo en la reunión de Brundtland, surgió el concepto de desarrollo sustentable, definiéndolo como “la mejora continua que permite satisfacer las necesidades actuales sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones para satisfacer las propias”, este término fue retomado en 1992 durante la Cumbre de la Tierra, adoptándolo como el principio que debe regir las economías. En la figura 1.1 se observan los tres componentes principales del desarrollo sustentable: economía, sociedad y medio ambiente, los cuales deben encontrarse en equilibrio, pues de otra forma se estarían llevando a cabo tres tipos de situaciones: viable al dar preferencia al medio ambiente y a la economía; equitativa al tomar en cuenta solo a la sociedad y a la economía y soportable si se da mayor importancia a la sociedad y al ambiente [2].



**Figura 1.1 Componentes del desarrollo sostenible Fuente: <https://cepei.org/documents/desarrollo-sostenible/> Fecha de consulta: 20/01/23**

## 1.2 Energías renovables y su potencial en edificaciones.

Las energías renovables (ER) son que aquellas que se obtienen a través de recursos encontrados en la naturaleza en una cantidad ilimitada y una vez consumidas, pueden ser regeneradas de manera natural. Son recursos abundantes y limpios que no producen gases de efecto invernadero ni otras emisiones dañinas para el medio ambiente, principalmente las emisiones de CO<sub>2</sub>, como sí ocurre con las fuentes de energía no renovables, específicamente, los combustibles fósiles [3]. Además, las ER son recursos abundantes que podemos encontrar la energía hidráulica, energía eólica, energía solar, energía geotérmica, energía maremotriz, etc. De igual forma las ventajas hacia la conservación del medio ambiente, el uso de energías limpias presentan las siguientes ventajas económicas:

- 1.-Reducción de las tarifas en los servicios de luz, agua y gas
- 2.-Generación de empleos directos (trabajadores de la construcción, desarrolladores, fabricantes de equipo, diseñadores, instaladores, financieros).
- 3.-Para los ayuntamientos, la reducción del costo de los servicios municipales de energía eléctrica (alumbrado público, bombeo de agua y edificios públicos).
- 4.-La posibilidad de llevar energía eléctrica a comunidades remotas, y en la promoción del desarrollo de dichas comunidades.

### 1.3 Pobreza energética

La pobreza energética es la situación en la que un hogar es incapaz de pagar la cantidad de energía suficiente para la satisfacción de sus necesidades domésticas. Un hogar que padece pobreza energética no puede acceder a los servicios energéticos esenciales por lo que se generan graves consecuencias para el bienestar de las personas, ya que pueden estar expuestas a malas condiciones de habitabilidad como la falta de confort térmico [4]. En un estudio realizado por Santillán et al. (2020) de la UNAM en 2020, se concluyó que en México el 30% de la población vive en pobreza energética y el 17% vive en pobreza energética extrema. También, García-Ochoa y Graizbord en 2016, caracterizaron la pobreza energética en México y determinaron que el 36.7% de los hogares mexicanos viven en pobreza energética. Los autores reportan que en el sector residencial, los bienes económicos con mayor privación son: “confort térmico” en primer lugar con un (33%), “refrigerador eficiente” (21.1%) y “estufa de gas o eléctrica” (16.6%); mientras que “calentamiento de agua” (8.7%), “entretenimiento” (5.5%) e iluminación (2.2%) son los que presentan menor privación en México.

Este trabajo fue realizado con un enfoque a el confort térmico en México, considerando como caso de estudio una edificación comprendida por un aula de clases de la comunidad rural de Tres Marías en el municipio de Huitzilác, Morelos. Para ello, se realizó un estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental para la posible implementación de ecotecnologías operadas con energías limpias, específicamente, un pozo canadiense para calefacción de dicho espacio. Los resultados muestran que esta ecotecnología puede escalar fácilmente a otras comunidades y a otras edificaciones no residenciales (establecimientos comerciales, hospitales, oficinas, etc.)

### 1.4 Economía verde

La mejora de la eficiencia energética originada por el uso y generación de energías renovables ha sido parte integral de la “economía verde”. conceptos que desde el principio fueron tomados debido a la actual crisis energética [5]. El Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente fundó la **Iniciativa de Economía Verde** en 2008 con el objetivo de lograr una economía que no solo sea verde, sino que resulte en el bienestar humano y la equidad social, reduciendo significativamente los riesgos ambientales y carencias ecológicas”[6]. En pocas palabras, se puede pensar en una economía verde como “baja en carbono, eficiente y socialmente inclusiva”.

En la figura 1.2 se visualizan los campos de investigación, política de energía y cambio climático, el concepto de “múltiples beneficios” (también denominados “co-beneficios”, “múltiples impactos”, “beneficios no energéticos”, etc.) ha evolucionado como un campo de análisis que muestra que los impactos de la transferencia de energía baja en carbono. Estas formaciones van de la mano con muchos otros objetivos sociales y económicos relacionados con



el término “impactos múltiples” (MI, por sus siglas en inglés) para denotar los beneficios relacionados con la implementación de medidas energéticas bajas en carbono [7].



**Figura 1.2 Múltiples Impactos de un sistema de energía limpia Fuente: Measuring multiple impacts of low-carbon energy options in a green economy context Applied Energy 179 (2016), 1409-1426DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.027**

## **1.5 Economía circular**

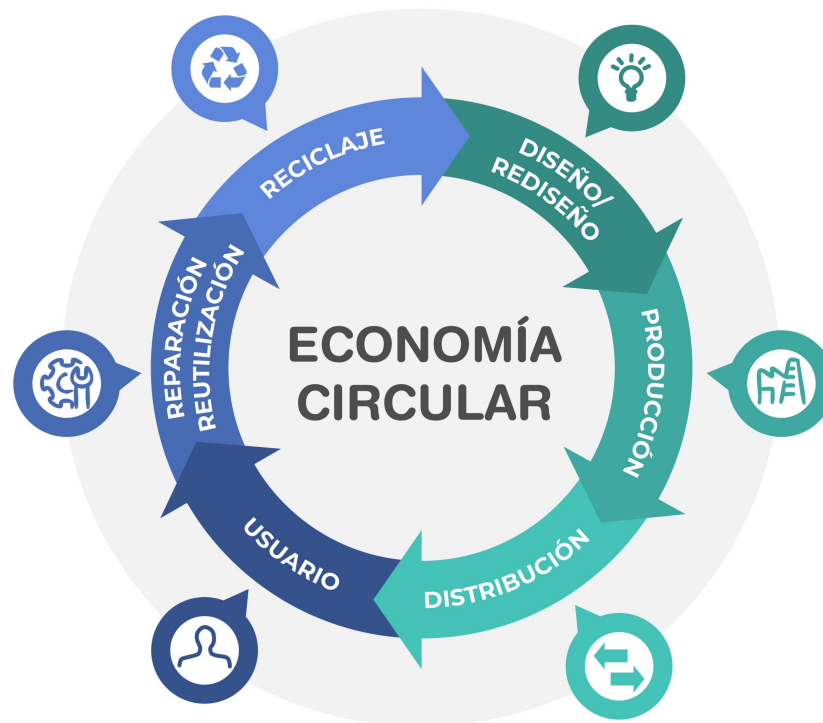
El parlamento Europeo define la economía circular como; “un modelo de producción y consumo que implica compartir, alquilar, reutilizar, reparar, renovar y reciclar materiales y productos existentes todas las veces que sea posible para crear un valor añadido que permita que el ciclo de vida de un producto pueda extenderse, reduciendo los residuos al mínimo” teniendo como beneficio principal la protección del medio ambiente. Gracias a estas medidas se realentiza el uso de recursos naturales evitando la alteración del paisaje y el hábitat, limitando la pérdida de biodiversidad debido a la reducción de las emisiones anuales totales de gases de efecto invernadero.

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente, los procesos industriales son responsables del 9,10% de las emisiones de gases de efecto invernadero en la UE, mientras que la gestión de residuos representa el 3,32%. Por lo que crear productos más eficientes y sostenibles desde el principio ayudaría a reducir el consumo de energía y recursos, ya que se calcula que más del 80% del impacto ambiental de un producto se determina durante la fase de diseño, de esta forma la transición hacia productos más fiables que puedan reutilizarse, actualizarse y repararse reduciría la cantidad de residuos, los cuales en la actualidad representan uno de los problemas principales, gracias a la sobre población y el exceso de estos [8].

Uno de los motivos para avanzar hacia una economía circular es el aumento de la demanda de materias primas y la escasez de recursos, estos al ser finitos, es posible pensar que debido al crecimiento de la población mundial y el aumento de la demanda de estos, provocaría mayor dependencia de una nación hacia otros países, como puede ser el caso de algunos países de la UE que dependen de otros para sus materias primas provocando que el valor total del comercio de (importaciones más exportaciones) de materias primas entre la UE y el resto del mundo se hayan triplicado desde 2002, con un crecimiento de las exportaciones más rápido que el de las importaciones traduciéndose en un déficit comercial de 35,500 millones de euros.

El reciclaje de materias primas reduce los riesgos asociados al suministro, como la volatilidad de los precios, la disponibilidad y la dependencia de las importaciones, siendo una fuente importante de materias primas fundamentales, que son necesarias para la producción de tecnologías cruciales para alcanzar los objetivos climáticos, como las baterías, los motores eléctricos y fuentes de producción de energía como los paneles solares, adquiriendo un papel muy relevante en el sector de la energía fotovoltaica y la fabricación de estructuras para paneles solares. Gracias a sus principales acciones, se consigue la optimización de sus diferentes materiales y residuos, alargando así su vida útil, como es el caso del reciclaje del aluminio.

En definitiva, gracias a la aplicación de la economía circular, todas las piezas de un proyecto de energía solar pueden llegar a reutilizarse o reciclarse, una vez hayan llegado al límite de su vida útil y dando forma a nuevas configuraciones. En este sentido, uno de los retos de la Unión Europea se centra en el desarrollo del proyecto CircuSol, que comenzó en 2018 y se extendió hasta el año 2022. Su fin se realizó con el propósito de disponer del sector de la energía solar como objetivo principal de la citada economía circular. Para ello, se recurre a modelos de negocio que operan mediante sistemas producto-servicio divididos en dos bloques de actuación. El primero, incentivar iniciativas de reutilización, restauración y re-manufactura de los productos y el segundo, el reciclaje y la creación de nuevos productos con valor añadido, pero con el foco puesto en usuarios finales residenciales, comerciales y servicios públicos [9].



**Figura 1.3 Diagrama de economía circular Fuente: <http://www.ambientologa.net/2015/05/economia-circular-ventajas-e.html> fecha de consulta 24/08/23**

## 1.6 Energía neta cero

Actualmente, la humanidad se encuentra en la coyuntura de preocupaciones energéticas generalizadas en la mayoría de los sectores productivos, en ciencia básica y aplicada, así como en el desarrollo de nuevas tecnologías para el ahorro e incremento de la eficiencia energética. Esto debido a la gran demanda de energía eléctrica y su dependencia en mayor parte de los combustibles fósiles, los cuales son altamente contaminantes y en consecuencia han provocado exceso de gases de efecto invernadero (GEIs) y esto a su vez origina el calentamiento global y acelera el cambio climático en la tierra. En este sentido, el interés por incrementar la eficiencia energética ha existido desde el siglo XIX, cuando las principales ciencias, gracias a la segunda revolución industrial, trascendieron a la forma conocida hoy en día, surgiendo la mentalidad colectiva a través de los medios, la estandarización, la regulación y la importancia de la eficiencia energética.

El Departamento de Energía (DOE, por sus siglas en inglés) de los Estados Unidos de Norte América, define la Energía Neta Cero de la siguiente manera: “Un edificio energéticamente eficiente donde, en base a las fuentes de energía, la energía suministrada anual real es menor o igual a la energía exportada renovable en el lugar” [10]. Esto gracias al uso de nuevas tecnologías como, fachadas prefabricadas, nuevos sistemas de calefacción, refrigeración inteligente e instalación de techos aislados equipados con paneles solares que favorecen la producción de energía suficiente, resultando en un hogar cálido y confortable [11].

### 1.6.1 Antecedentes de construcciones térmicamente eficientes

Desde la antigüedad, el hombre ha encontrado formas de utilizar y convertir los mecanismos naturales buscando mejorar sus condiciones de vida, entre ellos se encuentran las viviendas y sus técnicas constructivas. En el año 5,500 AC en la región de los Cárpatos se utilizó la solución de las casas construidas semi-enterradas, consiguiendo así una temperatura interior más estable [12]. Los beneficios de las propiedades térmicas del suelo también se aprovecharon más tarde en las casas de los capadocios, las comunidades esenias de Medio Oriente. Cabe destacar una evolución de esos diseños en la “badghir” (torre de viento) de los persas, donde en rutas dedicadas se empleaba la energía del viento y del suelo para asegurar el confort interior [13]. Mucho tiempo después, durante el siglo XIX, la investigación en el campo de la edificación se involucró en los efectos del aislamiento térmico en el dominio de la transferencia de calor, formación y transporte de la humedad en los muros y configuraciones multicapa de ventanas. En esta época, el precalentamiento del aire en el cuarto de servicio ubicado en el sótano se convirtió en un método

común. De esta forma se iniciaba el proceso de ventilación por circulación convectiva del aire hacia los pisos superiores.

A principios del siglo XX, los investigadores ya tenían las bases teóricas y tecnológicas para lograr de forma natural el concepto de una futura casa energéticamente eficiente. Se inventó el equipo eléctrico de aire acondicionado, buscando lograr una “comodidad térmica” Permitiendo así, un nuevo concepto de eficiencia energética en una edificación. Como principales ejemplos se destacan la "Casa del Mañana" de George F. Keck y la "Casa Solar 1 del MIT" de Hoyt C. Hottel construidas en la década de 1930 demostrando las importantes ganancias de calor debido al Sol [14,15]. Basadas en metodologías científicas de cálculo, estrategias de diseño y construcción centradas en el diseño térmico de los componentes y equipos, destacando los colectores solares los cuales fueron la principal clave de estos edificios para posteriormente aumentar el número de soluciones técnicas como, la mejora del aislamiento térmico el cual comenzó a convertirse en una regla básica [16].

La crisis del petróleo de 1973 determinó la amplificación del interés por la eficiencia energética de los edificios, los ingenieros fijaron su interés en la hermeticidad de los edificios, el súper aislamiento y la recuperación de calor en los sistemas de ventilación, el uso de ventanas de triple panel y tecnologías pasivas que principalmente estaban orientadas al uso de la energía térmica del sol. En esta época, los conceptos más antiguos son redefinidos por otros más nuevos descritos por Brenda y Robert Vale: casas autosuficientes, casa autónoma e invernadero [17].

Reviviendo la sostenibilidad en los edificios, aplicando posteriormente sus teorías de "Casa Verde" y "Casa Autónoma" en una casa en Nottinghamshire, Inglaterra. Para construir dicha edificación, se utilizaron materiales reciclados locales, como ladrillos rotos, bloques de hormigón hechos con cenizas de desecho de una central eléctrica local, ladrillos para las paredes externas quemados con gas de vertedero procedente de la basura en descomposición. La casa se consideró cercana al estado de autosuficiencia desde el punto de vista del suministro de energía y agua [18].

## **1.6.2 Planteamiento del problema y justificación**

Frenar y revertir el calentamiento global, producido por las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero, es una prioridad urgente, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) es el gas de efecto invernadero más significativo por lo que en 2015 en la Conferencia del Clima de París (COP21), la comunidad científica recomendó reducir las emisiones a valores comparables a los de 1990. La COP26, celebrada en Glasgow en 2021, culminó con un Pacto Climático firmado por 197 países, donde se menciona la necesidad de fijar objetivos de reducción de emisiones ambiciosos que permitan evitar un aumento de la temperatura superior a 1,5 °C para 2030. Sugiriendo, tanto las empresas como las naciones, implementar diferentes tecnologías de captura, almacenamiento y utilización de CO<sub>2</sub> [19].

EL sector de producción energética (electricidad y calor) es responsable de aproximadamente el 40% de las emisiones totales de CO<sub>2</sub> [20]. Es posible contribuir desde casa a la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, mediante el uso de tecnologías eficientes que permitan el ahorro energético de una edificación residencial. El portal de internet **comunidad por el clima** creado con motivo de acelerar la acción climática en los diferentes sectores de la sociedad, sugiere acciones para orientar a los interesados en reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> en el hogar, las más comunes son: cocinar con las ollas tapadas, utilizar iluminación LED, seleccionar electrodomésticos de alta eficiencia, apagar y regular las luces en el hogar, pero si combinamos estas acciones con tecnologías eficientes para suministrar energía sostenible en el hogar, crearíamos un verdadero ahorro energético [21-22].

Las edificaciones térmicamente eficientes existen actualmente en países como Indonesia, Holanda, España y El Salvador. Este último es el primer país en Centroamérica que implemento tecnologías de automatización y monitoreo para lograr un edificio de este tipo [23-24]. De acuerdo a la literatura consultada **NO existe** ningún proyecto enfocado al confort térmico utilizando la ecotecnología de intercambiadores de calor tierra aire en México y muchos menos para el estado de Morelos. Es por esto que en el presente proyecto se desarrollará una propuesta ya existente para una edificación convencional ya construida en el municipio de Huitzilac, específicamente para la preparatoria comunitaria de Tres Marías.

## 1.7 Justificación

La mayor parte de la comunidad de Tres Marías se encuentra en una situación de pobreza energética, donde la energía utilizada en las edificaciones residenciales de clima frío **no** es invertida en la calefacción de espacios (calefactores de gas, calefactores eléctricos, resistencias eléctricas, minisplits, etc) [25] Se utiliza leña para calefacción, aumentando la cantidad de personas que padecen de EPOC. Retomando los dispositivos de calefacción, tienen sus pros y sus contras, algunos suponen un menor gasto inicial, como los calefactores eléctricos que son los más “asequibles”, pero conforme el tiempo incrementan **el consumo de energía eléctrica**, obtenida por fuentes no renovables. Este consumo podría ser casi nulo con la implementación de un **sistema de calefacción pasivo**, pues a menudo nos vemos obligados a vivir en espacios sin planeación energética, en casas antiestéticas, térmicamente incómodas y en algunos casos carentes de servicios.

De acuerdo con **Energie Sprong** se debe analizar el costo que implica obtener un cambio de imagen y mejoramiento, así como los gastos por servicio de energía, las facturas combinadas con reparaciones reducidas y costos por mantenimiento de la edificación. Actualmente, se realizan cambios de imagen todos los días en Holanda, esto se logró gracias a la unión de un grupo inicial de asociaciones de vivienda social que unieron fuerzas para obligar a asegurar un primer mercado y generar estos cambios de imagen basados en el rendimiento energético [26].

## **1.8 Objetivos**

### **Objetivo general**

Diseñar una ecotecnología como solución de confort térmico mediante el desarrollo de una propuesta de implementación y caracterización de un sistema pasivo de calefacción para la preparatoria comunitaria de Tres Marías perteneciente a la Universidad Autónoma del estado de Morelos.

### **Objetivos específicos**

- 1.-Analizar las tecnologías existentes de confort térmico mediante una revisión de la literatura para definir las más eficientes y factibles de implementar.
- 2.-Considerar las condiciones climatológicas y ubicación geográfica de la zona de estudio mediante datos proporcionados por la NASA para dimensionar el sistema pasivo de calefacción
- 3.-Realizar un estudio paramétrico del sistema de calefacción pasivo con base en las condiciones climatológicas de la zona de estudio para generar un propuesta de implementación.
- 5.-Caracterizar teóricamente el sistema de calefacción pasivo con base en las condiciones del tipo de suelo, materiales de fabricación y análisis de costos para seleccionar el sistema de mayor factibilidad técnica y económica.
- 6.-Comparar sistemas activos con el sistema de calefacción pasivo mediante un análisis de emisiones de CO<sub>2</sub> de ambas tecnologías para estimar la factibilidad ambiental de ambos sistemas.

## **1.9 Estructura general de la tesis**

En el presente capítulo se ha descrito un panorama general del surgimiento del desarrollo sustentable y se ha planteado la necesidad de avanzar en investigación aplicada de nuevas soluciones energéticas, aplicando ecotecnologías que aprovechen las energías limpias por su bajo

impacto ambiental y alta disponibilidad. Además, se ha presentado una revisión exhaustiva de la literatura publicada, para definir la contribución de este trabajo.

En el capítulo 2 se presenta el marco teórico que sustenta a este proyecto.

En el capítulo 3 se describe y detalla la metodología experimental, dividida en siete aspectos: elaboración de un sistema pasivo, realización de una memoria de cálculo, análisis de interacción de variables, obtención de resultados, observación de resultados eficientes, selección de parámetros geométricos y realización de una estimación de costos.

En el capítulo 4 se presenta el análisis de los resultados obtenidos en cada una de las etapas de desarrollo.

Finalmente, en el capítulo 5 se presentan las conclusiones del trabajo, así como algunas recomendaciones para futuros proyectos respecto a este tópico.

## **CAPÍTULO 2**

### **EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EDIFICACIONES**

Es bien sabido que la reducción global de las emisiones de CO<sub>2</sub> juega un parte vital en la disminución de los cambios climáticos. Una disminución del consumo de energía en los campos más importantes es la principal solución para reducir directamente las emisiones de gases de efecto invernadero. La Directiva Europea aprobada en 2007 fijó tres objetivos tomando como referencia el año 1990: bajar las emisiones en un 20%, aumentar la producción de energía a partir de renovables en un 20% y mejorar la eficiencia energética en un 20% [27]. Debido al gran potencial para aumentar la eficiencia energética, el sector de los edificios comenzó dicha transición. Además, con el fin de garantizar la eficiencia energética de los edificios, la Comisión Europea desarrolló la Directiva 2010/31/UE el 19 de mayo de 2010 [28].

#### **2.1 Estado actual de los edificios energéticamente eficientes**

Las edificaciones con alta eficiencia energética, presentan un bajo consumo destinado a la climatización por lo que se han establecido definiciones multicriterio en función de los consumos de energía, las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuestiones económicas y el período de evaluación (un año o incluso un ciclo de vida) [29]. En términos de consumo de energía que está directamente influenciado por las propiedades pasivas del edificio, se utiliza en gran medida la siguiente clasificación:

Energía estándar (SE 65 kW h / m<sup>2</sup>).  
Energía baja (LE 40-50 kW h / m<sup>2</sup>).  
Ultra baja energía (ULE 20-30 kW h / m<sup>2</sup>).  
Pasivo (PE 15 kW h / m<sup>2</sup>).

Un edificio térmicamente eficiente representa una solución real en la reducción del consumo de energía y las emisiones de CO<sub>2</sub>. De acuerdo con la Directiva de Eficiencia Energética de Edificios de la Unión Europea (EPBD), el edificio de consumo de energía casi nulo es un edificio con un rendimiento energético muy alto y una demanda de energía casi nula o muy baja, cubierta por energía generada en el sitio o cerca de fuentes renovables [30]. La Unión Europea (UE), junto con muchos otros países, ha introducido normativas relativas al consumo de energía casi nulo para nuevos edificios con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, logrando un balance energético anual cercano a cero o positivo, gracias a una combinación de estrategias de ahorro de energía integradas en edificios y sistemas de generación de energía renovable [31].

## 2.2 Aplicación de tecnologías energéticamente renovables

Desarrollar metodologías y herramientas complementarias para proporcionar una solución global que elimine los obstáculos que se interponen a la generación de energías renovables, debe ser considerado como uno de los principales objetivos a tratar. Actualmente existen tecnologías renovables y sistemas híbridos de energía renovable, estas incluyen sistemas de ventilación con calefacción y aire acondicionado, sistemas combinados de calor y energía, sistemas de almacenamiento e inversor de energía y sistemas plurifuncionales para integrar sistemas de generación de energía renovable en los tejados. Dichas tecnologías adicionales incluyen paneles de aislamiento, baterías y un sistema de gestión de energía del edificio [32].

La adopción de iluminación eléctrica en los edificios a principios del siglo XX contribuyó a la reducción del área de ventanas y a la dependencia de la iluminación artificial. Fue hasta década de 1980 con el desarrollo de ventanas selladas de doble acristalamiento con un aislamiento del espacio aéreo para reducir la transferencia de calor y optimizar la transmisión de la radiación solar que llevó a la adopción de áreas de ventanaje más grandes. En consecuencia esto produjo un alto consumo de energía para calefacción y refrigeración. Por lo tanto, se observó que las ventanas y la iluminación natural influyen significativamente en el diseño de edificios comerciales [33].

Los impulsores del diseño de edificios residenciales están desarrollando y planteando un nuevo acondicionamiento de espacios con consumo energético bajo, tomando en cuenta la iluminación natural y sistemas de energía integrados como **soluciones pasivas** que disminuyen el principal gasto del consumo energético que es la calefacción o refrigeración [34]. Un edificio energéticamente eficiente requiere menos demanda de energía que un edificio convencional para



hacer funcionar todas las instalaciones y las fuentes de energía renovable pueden satisfacer esa demanda de energía [35]. Las tecnologías de soluciones pasivas pueden ayudar a lograr el objetivo de eficiencia energética de un edificio proporcionando un ambiente interior aceptable e incluso mejorado en términos de calidad del aire interior (IAQ) y confort térmico con una demanda y costo energético mínimos [36].

## **2.3 Arquitectura bioclimática**

La arquitectura bioclimática incorpora recursos de diseño que permiten aprovechar las condiciones favorables del clima y del medio natural, mientras se ofrece protección de los impactos desfavorables del ambiente externo. Esto se logra gracias a soluciones pasivas, involucradas en el proceso de diseño, basadas en el estudio de las características climáticas del lugar involucrando las condiciones existentes y los requerimientos de los ocupantes para lograr comodidad y bienestar mediante el estudio de los requisitos necesarios para lograr alcanzar los niveles adecuados de confort y optimización de los recursos. Las soluciones pasivas, además de disminuir considerablemente el consumo de energía eléctrica de fuentes no renovables, permiten modificar y mejorar el micro-clima interno y externo a través del propio diseño arquitectónico por medio de la morfología del edificio, la configuración del agrupamiento, la orientación, los materiales, los colores, el tamaño de ventanas, aislantes térmicos eficientes, sistemas de ventilación natural y la proporción de la paredes a la ventanas [37].

## **2.4 Beneficios ambientales**

Cambiar el enfoque de un solo edificio a un asentamiento completo permite aprovechar beneficios adicionales, como mejorar las condiciones del micro clima exterior tanto para las áreas exteriores de la población como para los edificios individuales. Estos beneficios resultan de la mitigación de los efectos del efecto isla de calor urbano y otros fenómenos relacionados con el cambio climático y de la reducción de la demanda de energía de los edificios y las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas [38]. El equipo multidisciplinar ZERO-PLUS ayudará a desarrollar un mercado para los asentamientos de edificios energéticamente eficientes en la UE, según resume Assimakopoulos: “Las tecnologías innovadoras desarrolladas reducirán la barrera de costos que se interpone a la absorción por el mercado de dichos edificios al ser más asequibles que la tecnología vigente”. Las tecnologías creadas y demostradas permitirán una aceleración significativa de la aceptación comercial de estos proyectos [39].

## **2.5 Características principales edificaciones energéticamente eficientes**

En climas donde la radiación solar es alta y las fuertes lluvias y la humedad causan problemas de moho, algunas medidas básicas tienen grandes efectos sobre el estado del edificio. El enfriamiento y la ventilación son los más importantes y causan la mayor parte del consumo de

energía. Los edificios energéticamente eficientes requieren acciones pasivas y activas para proporcionar un rendimiento de energía neta cero. Es de suma importancia concentrarse en todas las posibles acciones pasivas de ahorro de energía antes de adoptar medidas activas. Cada parte y aspecto del edificio debe planificarse y los programas de simulación pueden ayudar a estimar el rendimiento energético. [40]

En zonas de clima cálido, el coeficiente de sombreado de las ventanas debe mantenerse bajo, ya que la radiación solar provoca la mayor parte de la carga de refrigeración. Debido al efecto invernadero, el sol puede ser un calentador natural. La radiación de onda corta llega a la ventana, convirtiéndose en radiación de onda larga, permaneciendo en forma de calor. Por lo tanto, las cubiertas solares son necesarias para evitar que la radiación solar directa entre en un edificio. Se debe prestar especial atención a las ventanas orientadas hacia el sol la mayor parte del día. Los árboles y las zonas verdes también se pueden usar como dispositivos de sombra. Kevin Wang investigador de la Universidad de Hong Kong, observó que en los climas subtropicales de China la energía solar era la parte principal de la carga de refrigeración, pero en climas severamente fríos la radiación provocó una disminución en el consumo de energía [41].

La parte visible del espectro solar (casi la mitad de la radiación solar total) es útil como luz del día. Casi toda la radiación solar se puede convertir en calor útil para la calefacción de espacios, así como para otros fines útiles, como calentar agua y secar la ropa, o incluso enfriar mediante sistemas solares pasivos y activos (International Solar Energy Society (ISES), 2001 ). Otra tecnología solar, la fotovoltaica (PV), que convierte la radiación solar en electricidad, ha experimentado recientemente avances significativos y reducciones drásticas en los costos (reducción de costos de casi el 90 % por vatio de capacidad de generación en los últimos 10 años). Ambas tecnologías se pueden integrar y optimizar para la generación combinada de calor y energía para avanzar en los edificios hacia un consumo de energía neto cero [42].

## **2.6 Retos para edificaciones térmica y energéticamente eficientes**

Los paneles fotovoltaicos (FV) integrados en el techo y la fachada, normalmente pueden convertir la energía solar del 6 al 20 % en electricidad, **del 50 al 70 %** es posible extraerla como calor, mientras que del 10 al 30 % es posible utilizarla para iluminación natural en sistemas semitransparentes. Las eficiencias combinadas de utilización de energía solar son del 80% si se logran implementar estrategias de integración adecuadas utilizando casi todo el espectro de radiación solar. Es sumamente requerido una transformación de la forma en que se diseñan y operan los edificios, para así lograr su rentabilidad y asequibilidad. En la Tabla 1.1 se muestran los desafíos clave que deben superar las edificaciones para superar los subsistemas de construcción principales, donde se contrasta la situación actual con sus características esperadas [43-44].

**Tabla 1 Desafíos de una red energética inteligente. “Evolution to net-zero energy buildings” Andreas Athienitis, William O’Brien, and Jose**

<b>Sistemas de construcción, diseño y operación.</b>	<b>Edificios actuales</b>	<b>ZEB de red inteligente</b>
Recubrimiento de construcción aislante.	Pasivo, no diseñado como un sistema de energía.	Optimizado para el diseño pasivo y la integración de sistemas solares activos
Calefacción, ventilación y aire acondicionado (HVAC).	Grandes sistemas sobredimensionados	Pequeños sistemas HVAC controlados de manera óptima; integrado con sistemas solares, calor y electricidad combinados; comunidades: almacenamiento estacional y energía distrital
Sistemas solares/ renovables, generación.	Sin integración sistemática: una ocurrencia tardía	Totalmente integrado: iluminación natural, solar térmica, fotovoltaica, solar híbrida, sistemas geotérmicos, biocombustibles, vinculados con microrredes inteligentes

## **2.7 Diseño de sistemas pasivos para climatización y problemas de modelado**

Para diseñar un sistema pasivo de climatización de manera eficiente y óptima, se requiere un enfoque cuantitativo riguroso de todas las etapas de planeación, comenzando desde la fase conceptual. Uno de los desafíos únicos es cómo manejar la interacción e integración entre los sistemas de generación de energía como los sistemas fotovoltaicos, los sistemas de calefacción, refrigeración y ventilación, y los aislantes térmicos del edificio en las diferentes etapas de diseño [45]. El diseño de edificios inteligentes, requiere de enfoques clave relacionados con un panorama integrado de la eficiencia energética y el diseño pasivo en función de su operación,

para tener un impacto predecible y manejable en la red. Los edificios inteligentes conectados de forma óptima con las redes inteligentes permitirán reducir la necesidad de construir nuevas centrales eléctricas. Por citar un ejemplo la optimización solar requiere un diseño óptimo de la forma y la orientación del edificio para proporcionar la máxima captura de energía solar de las fachadas y los techos orientados hacia el ecuador cercano para convertirlos en electricidad solar, calor útil, y la luz del día.

## **2.8 Fundamentos de sistemas pasivos para climatización**

Gran parte de la información de este proyecto se centra en la climatización, debido a que ha sido ampliamente demostrado que la mayor fuente de consumo de energía en las edificaciones es debida a los sistemas “HVAC” que por sus siglas en ingles hace referencia a “Heating, Ventilation, and Air Conditioning”. Por lo tanto este trabajo esta relacionado con artículos referentes a mejorar el rendimiento de los sistemas HVAC y reducir el consumo de energía mejorando la eficiencia de un sistema, aplicando una ecotecnología (Ma et al., 2013; Minh Thu y Sato, 2013; Vakiloroyaya et al, 35 2013). Los sistemas pasivos están enfocados en buscar estrategias de ahorro de energía en un edificio, ya que su característica principal es su consumo nulo de energía. Por citar un ejemplo, las persianas de baja emisividad y los materiales de cambio de fase, permiten o restringen el flujo de calor al aislante térmico del edificio con el propósito de responder a variables externas de ganancia de calor e internas de confort.

El alcance de este proyecto se centra en una edificación existente, para la cual se desarrollará una propuesta de implementación de soluciones pasivas especialmente para climatización, estas soluciones son definidas como: la suma de soluciones que no requieren de energía provocada por el hombre, para operar en acción conjunta, favoreciendo a la reducción del consumo de energía de un edificio de manera significativa. En este apartado se propondrán soluciones enfocadas al clima predominante de la población de Tres Marías (frío sub-húmedo) buscando evitar la pérdida de calor, así como la obtención de energía por medio de recursos renovables.

Soluciones pasivas a utilizar

- 1.-Aislantes térmicos eficaces en paredes y ventanas.
- 2.-Ventilación natural, por medio de intercambiadores de calor “tierra aire” (sistemas de climatización y ventilación, “HVAC”)
- 3.-Dispositivos de sombra, se observaran los dispositivos que impidan la ganancia de radiación solar.
- 4.-Utilización de energías renovables.

## 2.8.1 Confort térmico

Como ya fue mencionado, las construcciones de energía neta cero, están centradas en que el ser humano pueda habitar de forma cómoda, una de las características más importante es la comodidad térmica. El confort térmico es definido en la norma ISO 7730 como “la condición de mente en la que se expresa la satisfacción con el ambiente térmico” Una definición que en mayor parte es entendida, pero difícilmente puede ser trasladada a parámetros físicos [46]. Relacionado a nuestro caso de estudio, cuando el cuerpo comienza a enfriarse, la primera reacción es la vaso constricción, la cual reduce el flujo de sangre a través de la piel, aumentando la producción de calor, estimulando los músculos a “temblar” quemando calorías almacenadas en forma de grasa y generando calor residual, similar a cualquier máquina, de esta forma nuestro organismo consigue que su temperatura interior se mantenga a 37°C [47].

La producción de calor del cuerpo depende de diversos factores los cuales pueden ser: factores ambientales, temperatura del aire, humedad relativa del aire, movimientos del aire, temperatura media radiante y vestimenta de la persona. La sensación térmica además depende fuertemente de las expectativas de la persona. Así que influyen el clima exterior, la estación del año, la hora del día, el asoleamiento, la iluminación y la calidad del aire interior. Las recomendaciones y normas pueden diferir bastante en los valores concretos para los factores ambientales. Esto se debe a la complejidad de las interacciones entre los diferentes elementos. A continuación se describen los factores con mayor relación, anteriormente mencionados, cabe mencionar que dichos criterios fueron desarrollados para el caso de invierno, con temperaturas exteriores bajas y calefacción ambiental [48-49].

## 2.8.2 Temperatura del aire y humedad relativa del aire

La temperatura del aire determina cuánto calor pierde el cuerpo hacia el aire, principalmente por convección, esta basta para calificar el confort térmico siempre y cuando la humedad y la velocidad del aire y el calor radiante no influyan de manera considerable en el clima interior. El rango de confort se extiende alrededor de 20°C en invierno 25°C en verano. La temperatura del aire percibida como agradable está en estrecha relación con los otros factores ambientales. De tal manera que una temperatura ambiental insatisfactoria puede compensarse, dentro de ciertos rangos, mediante ajustes de uno o más de los otros factores ambientales, uno de los principales es la humedad del aire la cual esta relacionada con la evaporación de la humedad de la piel. El aire seco absorbe la humedad y enfría el cuerpo efectivamente, sin embargo, para la salud humana es favorable una humedad relativa del aire entre los 30 a 40% como mínimo y 60 a 70% como máximo. La figura 2.1 muestra la zona de confort térmico relacionando la humedad relativa del aire en función de la temperatura del aire [49].

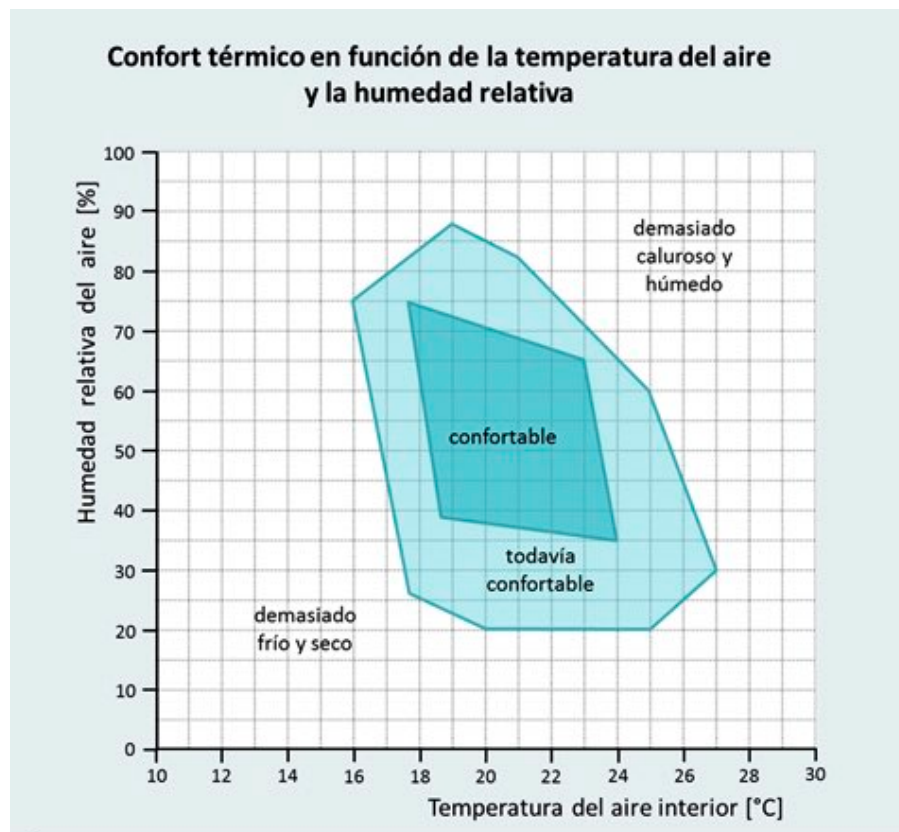


Figura 2.1 Zona de Confort en función de la temperatura del aire y la humedad relativa  
Fuente: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano>

### 2.8.3 Movimientos del aire

El movimiento del aire influye fuertemente en la pérdida del calor del cuerpo por convección y evaporación. Las velocidades de aire de hasta 0,1 m/s por lo general no se perciben y en general son agradables y deseables. Cuando los movimientos de aire enfrían el cuerpo humano más allá de lo deseado se habla de corrientes desagradables, estas representan un serio problema de confort térmico en los edificios. No obstante a temperaturas ambientales altas, las brisas de hasta 1,0 m/s pueden sentirse agradables, en dependencia del nivel de actividad y de la temperatura del aire. Sobre los 37°C el aire en movimiento calienta la piel por convección y a la vez la enfría por medio de evaporación. La figura 2.2 muestra el confort térmico en función de la temperatura del aire y la velocidad del aire, mostrando que mientras más alta sea la temperatura, menor es el efecto refrigerante [49].

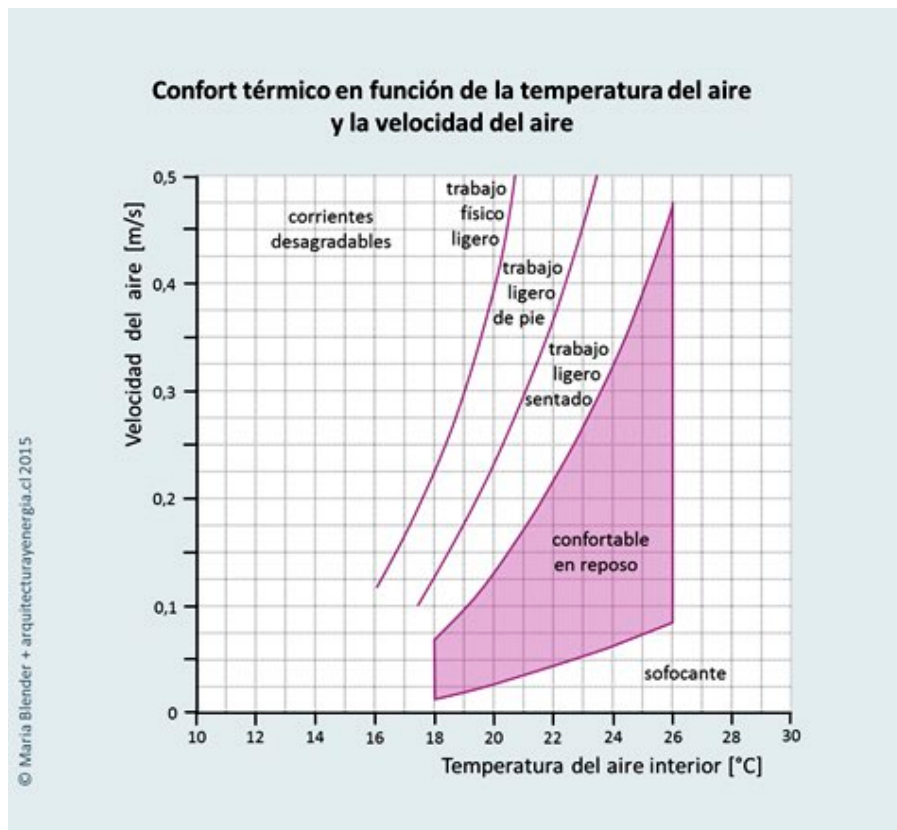


Figura 2.2 Zona de Confort en función de la temperatura del aire y la velocidad del aire  
Fuente: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano>

## 2.8.4 Temperatura radiante media

La temperatura radiante media representa el calor emitido en forma de radiación por los elementos del entorno y se compone de las temperaturas superficiales ponderadas de todos los cerramientos. Es deseable que el valor no difiera mucho de la temperatura del aire. En la figura 2.3 se puede observar el confort térmico en función de del aire y la temperatura de superficies [49].

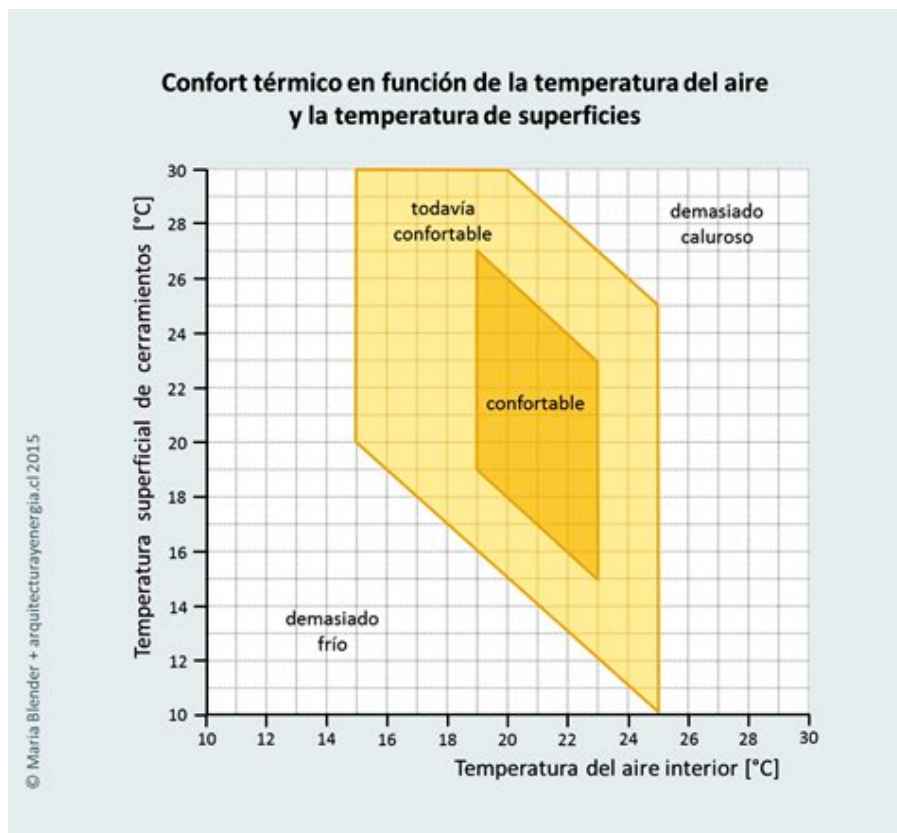


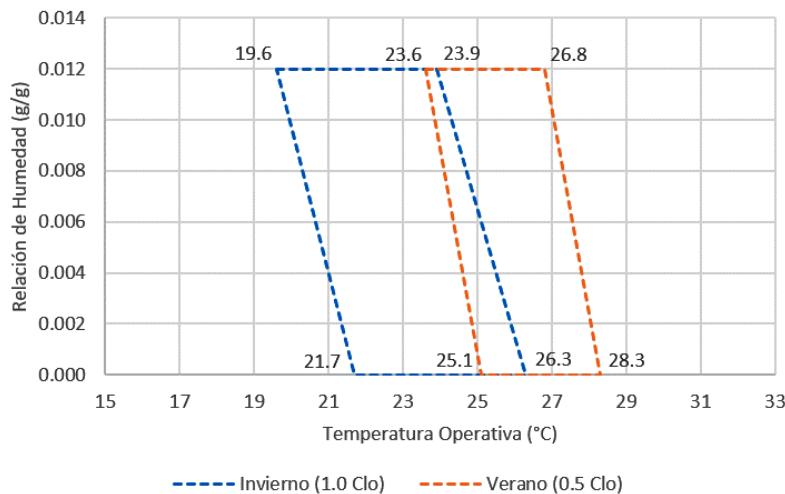
Figura 2.3 Zona de Confort en función de la temperatura del aire y la temperatura de las superficies Fuente: <https://www.seiscubos.com/conocimiento/confort-termico-y-cuerpo-humano>



## 2.8.5 Estándar ASHRAE

Por sus siglas en Inglés la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado ASHRAE tiene como objetivos: establecer las condiciones térmicas aceptables para los ocupantes de los edificios, de acuerdo con un conjunto de factores asociados al ambiente interior (temperatura, radiación térmica; humedad relativa y velocidad del aire), así como a los propios ocupantes (nivel de actividad y vestimenta). Está dirigido principalmente a adultos en espacios interiores diseñados para la ocupación de personas durante periodos de más de 15 min, y aplica para actividades físicas sedentarias como el trabajo de oficina. Es posible emplearlo para establecer las condiciones ambientales apropiadas en espacios con actividad moderadamente alta, pero en general no se considera adecuado para dormitorios y otros espacios similares [50].

Para los edificios que cuentan con sistemas mecánicos de climatización el Estándar ASHRAE ofrece dos opciones que permiten evaluar las condiciones de confort. El método gráfico y el método analítico. El primero basta con especificar la temperatura operativa y la relación de humedad en los espacios interiores, empleando un diagrama psicrométrico para definir dos zonas de confort que se superponen parcialmente, una para invierno y otra para verano. Como se observa en la figura 2.4 ( una versión simplificada del diagrama original), éstas zonas establecen límites de temperatura operativa y humedad ambiental dentro de los cuales teóricamente, la gran mayoría de las personas se sentirán en confort. Si las condiciones ambientales en el interior de un edificio quedan dentro de esos rangos, entonces se asume que este cumple con el criterio del método [51].



**Figura 2.4 Rangos aceptables de temperatura operativa y humedad, de acuerdo con el método gráfico del estándar ASHRAE 55 [90]**

## 2.8.6 Confort adaptativo

El concepto de confort adaptativo tiene su origen en los numerosos estudios de campo que, con métodos principalmente estadísticos, han desarrollado modelos de confort a partir del registro de las sensaciones y el comportamiento de ocupantes regulares en edificios reales. Muchos de esos estudios descubrieron que los modelos matemáticos de confort, eran poco adecuados para predecir la sensación de confort en ciertos edificios, por ejemplo aquellos en los que no había condiciones internas estrictamente controladas y en los que los ocupantes podían llevar a cabo acciones para mejorar sus condiciones de confort. También encontraron importantes discrepancias debido a las características climáticas del sitio. En resumen, esas investigaciones hallaron que muchas personas consideraban confortables condiciones ambientes completamente fuera de los rangos predichos por los modelos matemáticos de confort [52].

Los investigadores de Dear y Brager (1998) plantean que, en términos generales, la adaptación se puede describir como la reducción gradual de la respuesta de un organismo a una estimulación repetitiva del ambiente, dentro de esa definición general es posible distinguir tres tipos de adaptación ambiental: **adaptación comportamental**; incluye acciones conscientes o inconscientes que las personas realizan para modificar su balance térmico, entre esas acciones se encuentran las que se podrían definir como personales (quitarse o ponerse una prenda), tecnológicas (encender un ventilador, desplegar una persiana) y culturales (hacer una siesta en las horas de más calor), **adaptación fisiológica**; son cambios en las respuestas fisiológicas, que resultan de la exposición prolongada a determinadas condiciones ambientales y llevan a una disminución gradual del estrés producido por dicha exposición, pueden ser clasificadas como adaptación genética (cambios intergeneracionales) y aclimatación (durante el periodo de vida de las personas) y por último **adaptación psicológica**; que se refiere a cambios en la percepción y la respuesta a la información sensorial recibida, debido a las experiencias pasadas y a las expectativas de las personas, las consignas de confort personales están lejos de ser estáticas, y la disminución de las expectativas se pueden vincular al concepto de “habitación” de la psicofísica, que indica que la exposición repetida a un estímulo reduce la magnitud de la respuesta [52].

## 2.8.7 Eficiencia térmica

El confort térmico está directamente vinculado con la eficiencia energética de una edificación. Por ejemplo, la humedad del aire no solo es esencial para el confort, también influye directamente en el desempeño térmico del edificio, el aire húmedo es más difícil de calentar que el aire seco, además es importante evitar materiales de construcción húmedos, ya que estos presentan un efecto aislante drásticamente reducido. La temperatura operativa de un recinto es útil para la evaluación del confort térmico, gracias a que de manera más fidedigna representa la temperatura “sesible” por una persona en un ambiente [53].

### **2.8.8 Parámetros de la envolvente de un edificio.**

La conductividad térmica ( $W/mK$  o  $^{\circ}C$ ) de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o un aislante Cengel y Ghajar et al (2014). En el análisis de la transferencia de calor normalmente se supone que un material es isotrópico; es decir, tiene propiedades uniformes en todas direcciones. Esta suposición es realista para la mayor parte de los materiales, excepto para aquellos que exhiben características estructurales diferentes en direcciones diferentes, como los materiales compuestos laminados y la madera. Por ejemplo, la conductividad térmica de la madera a través de la fibra es diferente a la que se tiene en sentido paralelo a esa fibra [64].

### **2.8.9 Aislantes térmicos**

Los aislantes térmicos son materiales con baja conductividad térmica, y cuyo objetivo de aplicación es retardar la tasa de transferencia de calor. De acuerdo a lo que estipula la American Society of Heating, Refrigerating, and Air- Conditioning Engineers (ASHRAE, 2001), los materiales aislantes generalmente están compuestos de: materiales inorgánicos fibrosos o celulares como vidrio, rocas o lana mineral; además el silicato de calcio, perlita, vermiculita, y productos cerámicos, materiales orgánicos fibrosos como la celulosa, algodón, pelo de animal, madera, pulpa, o caña; también fibras sintéticas y materiales orgánicos celulares como corcho, hule espuma, PS, poliuretano, y finalmente otros polímeros y membranas orgánicas reflectivas metalizadas, donde dichas superficies solo son efectivas cuando están en contacto con un espacio de aire, gas, o vacío.

## **2.9 Intercambiadores de calor tierra aire**

Los intercambiadores de calor tierra-aire utilizan el subsuelo como sistema de enfriamiento y calentamiento de una corriente de aire que circula a través de tubos que se entierran para tal propósito, contribuyendo a reducir la temperatura del aire que ingresa en los edificios durante el verano y aumentándola durante el invierno. Su uso en acondicionamiento térmico de edificios se ha extendido en los últimos años, haciéndose particularmente útil en invernaderos, en los que en muchos casos permite un ahorro de más del 45% de sus requerimientos energéticos y en edificios públicos como hoteles y escuelas [65].

Estos sistemas son utilizados para el acondicionamiento directo de la temperatura interior de las construcciones, los conductos enterrados funcionan en bucle cerrado con el espacio a climatizar junto con un impulsor que fuerza la circulación del aire, este puede ser forzado a través del bucle diversas veces para alcanzar determinada temperatura tras un cierto número de circulaciones. En invierno la tierra recalienta el aire entrante mientras que en verano lo enfría gracias a la inercia térmica del suelo, siendo así un sistema poco sofisticado, pero que en una edificación provenzal

tradicional, donde la inercia térmica es elevada debido a la existencia de muros o paredes de gran espesor y pocas aberturas, el resultado es más que apreciable. El pozo canadiense es de hecho un intercambiador geotérmico que asegura la función de climatización estival o invernal del aire de ventilación [66].

### **2.9.1 Principios de los intercambiadores de calor tierra aire**

Los intercambiadores de calor tierra aire consisten de manera física en una red de tuberías, conductos o túneles enterrados a una profundidad de tres a cinco metros, aprovechando la capacidad de almacenamiento de calor de la superficie terrestre y el movimiento del aire para proporcionar aire fresco o caliente en cualquier edificio, presentando un mayor grado de confort térmico al obtener un aire más cálido del habitual en tiempo frío y más fresco en tiempo caluroso. La temperatura del subsuelo inmediato en nuestras latitudes es relativamente constante alrededor de los 15 °C a 2 m de profundidad. En una instalación de este tipo el aire penetra dentro del pozo por una toma de aire debidamente protegida, circula por canalizaciones enterradas gracias a un sistema de impulsión y es repartido por las estancias del edificio a climatizar asegurando un aporte de aire nuevo al local [67].

Para una correcta implementación en un edificio moderno el procedimiento es mejorado mediante la solución de posibles problemas de condensación en las canalizaciones, así como la optimización de la regulación térmica mediante el reparto de aire a cada pieza o volumen individual. En principio requiere una inversión mucho menor que una climatización reversible convencional, especialmente si el diseño del edificio ya contempla dicha posibilidad, y por otra parte los requerimientos energéticos son completamente marginales implicando así mismo un mantenimiento moderado. Debe destacarse que el sistema es especialmente duradero y completamente sostenible y ecológico. Existen ciertos condicionamientos en el funcionamiento de un intercambiador tierra aire, estos pueden ser resumidos en los siguientes puntos [68]:

1.-Las funciones de precalentamiento en invierno y refrigeración en verano están afectadas por un desfase diario y otro estacional dados por la inercia térmica del subsuelo. Esta inercia térmica condiciona un desfase temporal alcanzando el subsuelo inmediato los valores más frescos por la mañana tras la noche y en primavera tras el invierno y los valores más cálidos por la tarde tras el mediodía y en otoño tras el verano.

2.-El almacenamiento de calor debido a las oscilaciones estacionales se propaga unos 3 m alrededor de los conductos mientras que en la oscilación diaria se propaga unos 20 cm de tal manera que las oscilaciones diarias primarán sobre las oscilaciones estacionales que requieren una masa de almacenamiento considerable, además se encuentran limitadas por una difusión en profundidad. Estos desfases se caracterizan por presentar una caída exponencial a lo largo de la longitud del tubo, estos sistemas basados en pozos canadienses funcionan en bucle abierto por lo que sistema de ventilación sirve a la vez de bucle de recarga térmica y distribución.

## **2.9.2 Ventajas y desventajas de un intercambiador de calor tierra aire**

El uso de un intercambiador tierra aire presenta numerosas ventajas desde el punto de vista de la eficiencia energética y la sostenibilidad, presentando como más destacadas las siguientes [69]:

1. Reducción de la ganancia de calor dentro del edificio.
2. Disminución del consumo de electricidad en un 8% a 10%.
3. Reducción de la demanda de aire acondicionado en un 5% a 10%.
4. Larga vida útil y bajo mantenimiento.
5. Costos operativos bajos.
6. Respetuoso con el medio ambiente.
7. Sustitución de sistemas de enfriamiento y calefacción convencionales.

Si bien un GAHE tiene muchas ventajas, también presenta algunas desventajas que deben tenerse en cuenta:

1. Requiere un espacio más amplio para la instalación de los conductos.
2. Proporciona una cantidad limitada de efecto de enfriamiento o calefacción.
3. El costo de instalación es más elevado.
4. No es tan efectivo cuando el aire exterior está demasiado caliente o frío.

## **2.9.3 Variables bioclimáticas**

Las variables bioclimáticas son utilizadas en el diseño arquitectónico bioclimático y requieren de información cuantitativa de los valores mensuales de temperatura y precipitación para generar variables biológicamente significativas. Conocer estos datos nos permite incorporar las medidas necesarias para lograr que un edificio sea eficiente, independiente, no contaminante y por lo tanto sostenible. Los datos bioclimáticos requeridos para este proyecto serán promedios anuales de: temperatura (°C), humedad relativa (%), radiación solar (W/m<sup>2</sup>) y velocidad del viento. [70].

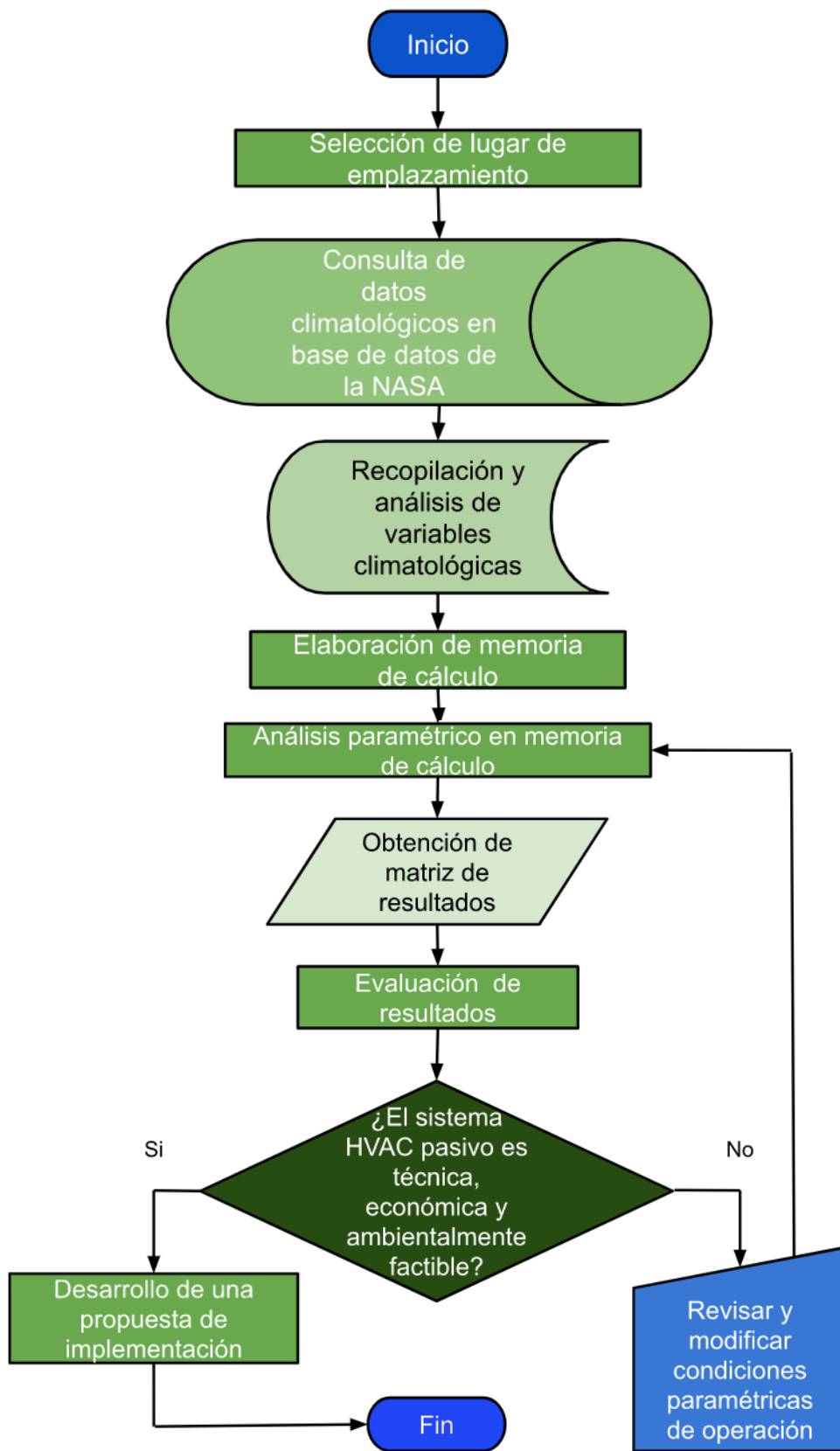
# **CAPÍTULO 3**

## **METODOLOGÍA**

La metodología de este trabajo esta basada en el diseño de un sistema de climatización pasivo para un aula de clases en la Preparatoria Comunitaria de Tres Marías, se idealizó este edificio con un sistema de calefacción dependiente a la red eléctrica, para obtener un valor posible de consumo energético si se aplicaran medidas de confort térmico dentro de este. Se analizaron los parámetros físicos del aula para obtener el volumen a climatizar, además de tomar en cuenta la cantidad de 40 alumnos y un profesor, para suministrar el flujo de aire necesario por hora, en la figura 3 se observa la metodología de diseño de esta ecotecnología, siguiendo la propuesta de la revista “Habitat sustentable” por Mario Cúnsulo, Alejandra Kurbán, et all (2019) [71]. Se realizaron las modificaciones respectivas para calefacción y se realizó una memoria de cálculo donde se compararon la interacción de las variables bioclimáticas como velocidad del viento máxima, promedio y mínima, así como la humedad promedio relativa, temperatura máxima, promedio y mínima por año, con el objetivo de obtener una propuesta técnica, económica y ambientalmente factible.

### **3.1 Contexto socio económico de la ciudad de Tres marías**

La ubicación del caso de estudio es en el municipio de Huitzilac en la poblado de Tres Marías, esta comunidad cuenta con una población estimada de 7,523 habitantes (INEGI 2020) donde existen un total de 1147 hogares, de estos 1209 son viviendas, 38 tienen piso de tierra y unos 67 consisten de una sola habitación, 1,101 de todas las viviendas tienen instalaciones sanitarias, 1,033 son conectadas al servicio publico, 1,107 tienen acceso a la luz eléctrica. La estructura económica permite a 155 viviendas tener una computadora, a 744 tener una lavadora y 1066 tener una televisión [72].



**Figura 3 Diagrama de flujo de la metodología de diseño**

## 3.2 Ubicación

La preparatoria comunitaria de Tres Marías, visualizada en la figura 3.1, es una edificación de tipo escolar, localizada a 0.82 km del área urbana, cuenta con una superficie de  $1500\text{ m}^2$  y se encuentra a una latitud de 19.0608404 y longitud de -99.2504566, posee un terreno de  $0.08\text{ km}^2$ , donde  $1500\text{ m}^2$  de este son abarcados por el edificio principal,  $98.1\text{ m}^2$  de los salones principales y  $145\text{ m}^2$  de salones secundarios.



**Figura 3.1 Ubicación geográfica, captura realizada en Google Earth**



### 3.3 Infraestructura

La construcción total, vista en la figura 3.2, tiene una cobertura de 3% del terreno. Aprovechando la amplitud del terreno se construyó de una sola planta, esta cuenta con 3 m de altura, donde se incluyen gran cantidad de áreas verdes las cuales pueden ser perfectamente aprovechadas para la implementación de un intercambiador de calor tierra aire.



**Figura 3.2 Infraestructura, captura realizada en Google Earth**

### 3.4 Estrategia experimental

La figura 3.3 muestra los salones a climatizar por medio del sistema de calefacción pasivo, para esto, fue necesario realizar una descarga de variables climatológicas en la base de datos de la NASA, dicho sistema permite introducir coordenadas geográficas y visualizar en determinado intervalo de tiempo el comportamiento de las condiciones climáticas. Para este diseño fueron necesarios los valores de temperatura promedio por año, temperatura mínima por año, temperatura máxima por año, humedad máxima relativa por año, humedad mínima relativa por año y humedad relativa promedio por año, dichos valores se muestran en la tabla 3 y corresponden a los años 2021 y 2022. Una vez analizado dicho comportamiento ambiental se obtuvieron los parámetros físicos correspondientes a la zona de estudio observados en la tabla 3.1 como el área a climatizar, el volumen y la orientación de la zona de estudio.



**Figura 3.3 Aulas para climatizar**

**Tabla 3 Parámetros físicos de la zona de estudio**

Parámetros de la edificación	
Latitud	19.0608404
Longitud	-99.2504566
Área Total	48 m <sup>2</sup>
Orientación	Noroeste

**Tabla 3.1 Variables bioclimáticas**

Variables bioclimáticas	
Temperatura promedio por año	18.06 °C
Temperatura mínima promedio por año	12 °C
Temperatura máxima promedio por año	25 °C
Humedad relativa promedio por año	60%
Velocidad promedio del viento por año	1.11 km/h
Velocidad promedio máxima del viento por año	2.3 km/h
Velocidad promedio mínima del viento por año	0.02 km/h

Cabe mencionar que para realizar el estudio de factibilidad técnica, económica y ambiental de las ecotecnologías propuestas se deben considerar 3 aspectos importantes:

1. Tipo de suelo: se debe determinar si las propiedades, condiciones y características del suelo son apropiadas para la implementación de un pozo canadiense como sistema pasivo de calefacción en la edificación.
2. Balance térmico y consumo de energía eléctrica: con el balance térmico se determina el número y diámetro de los ductos que conforman el pozo canadiense, así como el caudal necesario para proporcionar confort térmico a la edificación.
3. Espacio para implementar las ecotecnologías: debe existir espacio suficiente sin restricciones dentro de los límites del terreno, para la instalación del pozo canadiense.

### 3.4 Descripción del sistema fotovoltaico

La preparatoria comunitaria de Tres Marías cuenta con un panel fotovoltaico, el cual será utilizado para suministrar energía eléctrica a un extractor de aire colocado en la entrada de aire del sistema de calefacción, esto permitirá un flujo de aire constante, por lo que la temperatura no debería variar debido a la velocidad del viento, sino a otras variables climatológicas. Dicho sistema está integrado por: dos paneles fotovoltaicos de silicio mono cristalino compuesto por 60 celdas, rango de potencia de 270 a 285 W, eficiencia máxima del 17.4% y certificado para condiciones ambientales de vientos con velocidades máximas de 130 km/h y 2400 Pa de presión, así como resistencia a impactos de granizo de 35 mm a 97 km/h, con resistencia al amoníaco, niebla salina y a la abrasión por arena y polvo. En la figura 3.5 (a) es posible visualizar los paneles solares ubicados en el edificio próximo al caso de estudio junto con la figura 3.5 (b) donde se observa el panel solar a menor distancia.



**Figura 3.5 (a) Panel solar instalado**



**Figura 3.5 (b) Celdas fotovoltaicas del panel solar**

### **3.5 Estudios preliminares**

Previo a la implementación de soluciones pasivas fue necesario realizar un análisis preliminar que permitió tomar decisiones de diseño que impactarían directamente en el desempeño térmico de la edificación. Estas soluciones serán la aplicación de un sistema de climatización para calefacción por medio de un intercambiador de calor tierra aire, la aplicación de un aislante térmico a la salida de este y la utilización de un panel solar para suministrar flujo de aire constante por medio de un extractor.

Antes de seleccionar la ubicación del sistema de calefacción pasivo, se tomo en cuenta el espacio delimitado en la zona de estudio, además de identificar los objetos principales causantes de sombra, provocantes de la pérdida de ganancia térmica en la edificación, en la figura 3.6 (a) se observan árboles y su proyección de sombra en la figura 3.6 (b) en gran área del edificio, reduciendo así la sensación térmica, por lo que se decidió retirarlos de forma que los rayos del sol pudieran llegar al caso de estudio, aprovechando el espacio para realizar la elaboración de la zanja una vez retirados los causantes de sombra



**Figura 3.6 (a) Objetos de sombra principales, que afectan la ganancia de calor en el caso de estudio**



**Figura 3.6 (b) Objetos de sombra principales, que afectan la ganancia de calor en el caso de estudio**

### 3.5.1 Tipo de suelo

El tipo de suelo en el poblado de Tres Marías presenta mas del 75 % de la clase andosol, lo cual indica la presencia de roca madre de origen ígneo, es un suelo suelto, con profundidades mayores de 50 cm, de fácil erosión; ubicados en topografía accidentada y derivados de cenizas volcánicas. Por otra parte el 25 % faltante corresponde a un tipo de suelo litosol, este posee menos del 20 % de tierra fina hasta una profundidad de 75 cm, son suelos de textura media, poco desarrollados y muy delgados, ubicados sobre roca o tepetate. Estos tipos de suelo permitirían en teoría cavar un primer metro con cierta facilidad, lo cual representa el 33 % de la profundidad buscada [73]. En la figura 3.7 (a) se observa la primera excavación en el lugar propuesto del caso de estudio para la implementación del intercambiador tierra aire, junto con la figura 3.7 (b) donde se observan las capas de la zanja realizada.



**Figura 3.7 (a) Zanja realizada en el caso de estudio**



**Figura 3.7 (b) Capas del suelo**

### **3.6 Diseño de un sistema de calefacción pasivo**

De acuerdo con un estudio realizado en 2014 por la compañía norteamericana The Freedonia Group Inc., a nivel global se espera un crecimiento del 5.7 por ciento anual en la demanda de sistemas de HVAC, esto dentro de la industria de la edificación, pudiendo alcanzar un mercado de 120 billones de dólares en 2018, lo cual ha sido posible, en gran medida, gracias al incremento en el ingreso per cápita en países como India, Indonesia y China; pero México no se queda atrás, ya que el sector de la construcción con sistemas HVAC se ha beneficiado gracias al crecimiento de la industria inmobiliaria. Tan sólo en ese año, la Asociación Mexicana de Profesionales Inmobiliarios (AMPI) pronosticó un crecimiento del 7 por ciento al año 2015, rubro directamente relacionado con la demanda de climatización en los edificios [74].

Este desarrollo puede considerarse como una oportunidad para afrontar los retos que involucra la reducción del consumo energético asociado a la operación de los sistemas HVAC, sin comprometer la operación del edificio desde un enfoque sustentable, lo que garantiza un



ambiente interior confortable para los ocupantes. En años recientes, se ha demostrado que, aproximadamente, 30 por ciento de la energía producida a nivel mundial es consumida por el ambiente construido, y que en muchas regiones del mundo, la demanda de sistemas HVAC puede representar hasta el 40 por ciento de la energía consumida por el edificio[75].

Un edificio de alto desempeño, no puede juzgarse únicamente por la huella de carbono del sistema HVAC del edificio, sino es una visión integral que implica analizar su impacto en la calidad de vida de los ocupantes. No obstante, tampoco puede ignorarse el hecho de que en México cada kWh de energía consumida por ineficiencia en el sistema representa casi 0.7 toneladas de bióxido de carbono emitidas, las cuales tendrán un impacto en el equilibrio de todo el planeta.

La geotermia es una fuente inagotable, renovable, limpia y natural de energía que puede convertir las viviendas en uno de los lugares más confortables, saludables y respetuosos con el medio ambiente, es de básica aplicación para la construcción bioclimática, la cual se define como un sistema pasivo de intercambio de calor que consiste en una red de tuberías o ductos instalados entre 1.5 y 4 m de profundidad (Figura 3.8), donde se ha reportado que la temperatura permanece constante [76]. Esta investigación propondrá el diseño de un intercambiador tierra aire para un aula de clases con registros de menor temperatura. Esto con el propósito de generar un mayor confort térmico en dichas aulas.

El intercambiador de calor tierra aire, aprovecha la diferencia de temperaturas entre el medio ambiente y el suelo para brindar confort térmico, esto es, aire acondicionado en el verano y calefacción en el invierno, de acuerdo con la necesidad del lugar de aplicación [78]. La mayoría de las investigaciones se han enfocado en modelación, simulación y estudios teóricos simplificados de esta ecotecnología y los escasos trabajos experimentales reportados son prototipos desarrollados para climas cálidos con alto contenido de humedad y solo con fines de caracterización experimental [79]. Sin embargo, no se han reportado estudios de factibilidad que incluyan las principales ventajas del pozo canadiense sobre los sistemas convencionales HVAC, como son: no consumen energía eléctrica por ser un sistema pasivo, nulo uso de combustibles fósiles, por lo tanto, cero emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) durante su operación, materiales y costos asequibles para su implementación, y mínimo mantenimiento.

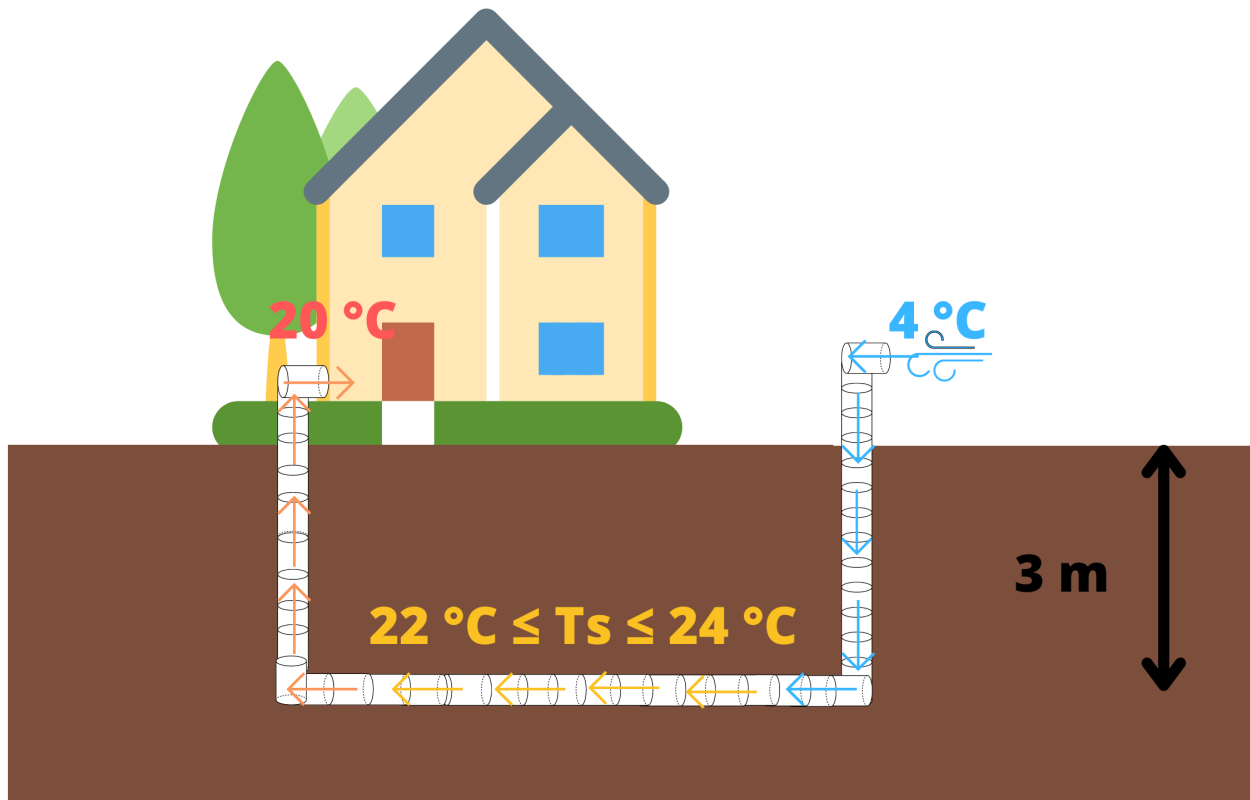


Figura 3.8 Funcionamiento de un intercambiador tierra aire, elaboración propia.

### 3.6.2 Factores bioclimáticos

Son aquellos relacionados con la edificación y el entorno, como los materiales de construcción, la orientación geográfica y las dimensiones, ya que, a mayor tamaño, será mayor la energía térmica que se necesita al interior de este [80]. La orientación y ventilación natural son factores entrelazados, ya que una correcta ventilación natural requiere orientar la edificación aprovechando los vientos, ya sea para que exista una renovación del aire en climas cálidos y, por lo tanto, disminuir la temperatura interna o en casos contrarios para evitar que haya infiltraciones de aire en climas fríos y pueda escapar el calor del interior al exterior del edificio. La cantidad promedio de ocupantes durante el día, ya que estos son emisores de energía térmica por lo que incrementan la temperatura interna del edificio [81].

### 3.6.3 Análisis de cargas térmicas

Se realiza un levantamiento de las cargas térmicas en las aulas de la escuela preparatoria, con esto se determina la cantidad de energía térmica que deberá suministrar el calentador tierra aire para brindar confort térmico al interior de las aulas. Posteriormente, se utiliza la metodología descrita por Cúnsulo et al [71] como referencia, la cual consiste en lo siguiente:

1. Seleccionar el diámetro de la tubería a utilizar, identificar sus características y propiedades como área, espesor de los ductos y conductividad térmica.
2. Conocer las dimensiones de las aulas para calcular el volumen total de la mismas.
3. En este estudio se cuenta con los datos meteorológicos reportados por la página oficial de la NASA.
4. Calcular el caudal de climatización considerando el volumen de las aulas y las horas de operación del sistema, así como el caudal de aire a través de los ductos, mediante el área y la velocidad promedio del viento en la localidad.
5. Determinar el área total de intercambio de calor considerando los promedios de temperatura ambiente, humedad relativa, velocidad del viento y en la carta psicrométrica se leen las entalpías de aire seco.
6. Obtener la longitud total del intercambiados de calor tierra aire.

$$\dot{V}_{Climatización} = \frac{Volumen}{tiempo} \quad (1)$$

El caudal de aire que fluye por el pozo canadiense es función del área de los ductos ( $A_d$ ) y la velocidad del viento ( $v$ ) y está dado por:

$$\dot{V}_{Aire} = A_d * v \quad (2)$$

Con los caudales se calcula el número de ductos necesarios para brindar confort térmico al interior de la edificación, el resultado se redondea al entero superior inmediato y se obtiene con la siguiente ecuación:

$$N_D = \frac{\dot{V}_{Climatización}}{\dot{V}_{Aire}} \quad (3)$$

Es importante mencionar que la temperatura de entrada del aire que ingresa al pozo canadiense es igual a la temperatura ambiente promedio. Así que, primero se determina la temperatura media del aire, mediante:

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (4)$$

Donde:

$T_m$ : Temperatura media interna del ducto ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_e$ : Temperatura de entrada al ducto ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_s$ : Temperatura de salida del ducto ( $^{\circ}\text{C}$ )

Para determinar el intercambio de calor entre el suelo y el aire que fluye por el interior del pozo canadiense se requiere calcular la resistencia térmica por conducción y convección del ducto, la resistencia térmica total está dada por la suma de ambas resistencias. La resistencia térmica por conducción se obtiene considerando el espesor de pared y la conductividad térmica del ducto:

$$R_{cond} = \frac{\epsilon}{k} \quad (5)$$

Donde:

$R_{cond}$ : Resistencia por conducción ( $\text{m}^2 \text{K/W}$ )

$\epsilon$ : Espesor del ducto (m)

$k$ : Conductividad térmica del tubo ( $\text{W m}^2/\text{K}$ )

La resistencia térmica por convección se obtiene con la velocidad del viento ( $v$ ), mediante:

$$R_{conv} = \frac{1}{5.55 * (v^{0.8})} \quad (6)$$

El siguiente paso consiste en determinar el flujo de calor medio por unidad de superficie ( $\text{W/m}^2$ ), el cual se obtiene con la siguiente expresión:

$$q_m = \frac{T_{suelo} - T_m}{R_t} \quad (7)$$

Para determinar la cantidad de energía cedida por el suelo hacia el aire que fluye por el pozo canadiense, se requiere la humedad relativa, los volúmenes específicos y las temperaturas de entrada y salida del aire. Después, mediante la carta psicrométrica se obtienen los valores de entalpía de aire seco y se podrá determinar la energía cedida por el suelo al aire, mediante la ecuación:

$$E_C = \frac{h_s}{(V_e)_{salida}} - \frac{h_e}{(V_e)_{entrada}} \quad (8)$$

Donde:

$E_C$ : Energía cedida por el suelo al aire en el ducto (kJ/m<sup>3</sup>)

$h$ : Entalpia del aire seco (kJ/kg)

$V_e$ : Volumen especifico del aire (m<sup>3</sup>/kg)

El penúltimo paso consiste en determinar el área total de intercambio de calor, dada por la siguiente expresión:

$$A_{IC} = \frac{E_C * \dot{V}_{climatización}}{q_m} \quad (9)$$

Por último, se debe determinar la longitud de los ductos con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{A_{IC}}{\pi D} \quad (10)$$

### 3.6.4 Factibilidad técnica de los intercambiadores de calor tierra aire

El estudio de factibilidad técnica permite diseñar y dimensionar el pozo canadiense para brindar confort térmico (calefacción) a la escuela primaria. Para realizar este estudio se consideran los siguientes factores:

Humedad relativa: Se analizan 3 humedades relativas representativas de Tres marías, Huitzilác, Morelos: 30%, 45% y 60%.

Temperatura ambiente promedio: Se consideran 3 temperaturas representativas de Tres Marías, Huitzilác, máxima, promedio y mínima, respectivamente: 21°C, 18°C, 15°C, 12°C, 4°C y 0°C. Estas temperaturas se eligen porque cubren las temperaturas de todos los meses del año.

Velocidad de viento: Se consideran 3 velocidades de viento; 3 m/s, 2 m/s y 1 m/s . Esto se realiza con el objetivo de diseñar un pozo canadiense capaz de satisfacer la carga térmica para calefacción del aula de la escuela preparatoria.

Geometría: Para el diseño geométrico se proponen y realizan cálculos para ductos de PVC con diámetro de 15.96 cm (6”), 20.32 cm (8”) y 25.4 cm (10”).

Además, debido a que en Tres Marías, la mayor parte del año se presentan temperaturas bajas y con el fin de mostrar los cálculos para calefacción, se presentarán los resultados correspondientes a una temperatura ambiente mínima de 4 °C con una humedad relativa promedio de los meses Noviembre, Diciembre, Enero y Febrero del 45 % , una velocidad de viento constante de 2.5 m/s y una tubería de 10 in.

Cabe mencionar que la velocidad del viento es constante ya para un mejor suministro y no presentar el problema de la búsqueda de dirección de vientos predominantes se implementó un ventilador alimentado por un panel solar.

Temperatura del aire a la entrada  $T_e = 4 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura del aire a la salida  $T_s = 18 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura media del Aire  $T_m = 11 \text{ }^\circ\text{C}$

Temperatura del suelo a 3 m  $T_{suelo} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$

Humedad Relativa = 45 %

La resistencia térmica total es de  $R_t = 0.1237 \frac{m^2K}{W}$

Reemplazando los valores correspondientes en la ecuación (7), se obtiene el flujo de calor medio por unidad de superficie:

$$q_m = 105 \frac{W}{m^2}$$

En tablas termodinámicas se leen los volúmenes específicos a la entrada y salida del sistema y de la carta psicométrica se obtienen las entalpías de aire seco:

Entalpía del aire seco a la entrada  $h_e = 11 \text{ kJ/Kg}$

Volumen específico del aire a la entrada:  $(V_e)_{entrada} = 0.7866 \frac{m^3}{kg}$

Entalpía del aire seco a la salida  $h_s = 33 \text{ kJ/Kg}$

Volumen Específico del aire a la salida:

$$(V_e)_{salida} = 0.83 \frac{m^3}{kg}$$

Mediante la ecuación (8) se obtiene la energía cedida por el suelo al aire:

$$E_C = 25,774 \frac{Ws}{m^3}$$

Con el flujo de calor medio y la energía cedida por el suelo al aire, se obtiene el área de intercambio de calor con la ecuación (9):  $A_{IC} = 31 \text{ m}^2$

Con el área de intercambio de calor ( $A_{IC}$ ) y con la ecuación (10) se determinó que la longitud del ducto es de 40 m con un diámetro de 25.34 cm (10”).

La configuración propuesta para el pozo canadiense será de tipo serpentin lo cual consistirá en instalar tres secciones con ductos de PVC corrugado, la primera sección será un ducto de entrada vertical, la segunda sección consiste en instalar 10 ductos de 3 m de largo en disposición horizontal con una separación de 1.2 m y la tercera sección será un ducto vertical aislado térmicamente a la salida. La profundidad propuesta para instalar los ductos de PVC es de 3 m, debido a que, la temperatura del suelo a profundidades de 2 a 5 m tiende a igualarse a la temperatura promedio anual registrada en la ubicación geográfica en estudio, y las propiedades termofísicas como conductividad térmica y calor específico describen un comportamiento homogéneo. Además, con la finalidad de disminuir las pérdidas de calor del pozo canadiense y así mejorar su rendimiento térmico se debe aislar térmicamente el ducto de salida.

### 3.7 Selección de aislante térmico

Para este proyecto se propuso un aislamiento térmico de clase “hecho en sitio” los cuales por lo general son materiales que vienen en presentación líquida o pellets expandibles, que pueden ser vaciados o aplicados para formar un aislamiento rígido o semirígido. Debido al retardo de flujo de calor que estas matrices presentan los aislantes térmicos de este tipo, presentan los siguientes beneficios descritos por la Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid y Consejería de Economía y Hacienda de Madrid [82]:

- 1.-Conservan la energía, pues reducen la pérdida o ganancia de calor de elementos y/o espacios.
- 2.-Controlan la temperatura de superficies de equipos, estructuras y espacios, para protección y confort térmico de los usuarios.
- 3.-Previenen la condensación de vapor de agua en superficies, y por ende el daño que ocasiona esto en los recubrimientos del edificio.
- 4.-Reducen la oscilación de la temperatura cuando el acondicionamiento de aire no es requerido o no está disponible.
- 5.-Reducen la variación de la temperatura en espacios acondicionados, para aumentar el confort térmico de los usuarios.
- 6.-Reducen la factura energética.
- 7.-Mejoran el rendimiento de las instalaciones térmicas al evitar pérdidas en las redes de distribución.
- 8.-Disminuyen las emisiones de gases efecto invernadero por la utilización de equipos eléctricos de climatización.

El aislante térmico propuesto es lana mineral, el cual es un material formado por fibras entrelazadas de origen mineral en las cuales el aire que queda confinado lo cual dota al material de unas excelentes propiedades térmicas, debido a su baja conductividad de 0.030 y 0.040 W/mK. Además, es un material que presenta poca densidad que va desde 10kg/m<sup>3</sup> hasta 40kg/m<sup>3</sup> en función del formato de presentación, lo cual puede ser adecuado para aplicaciones que requieran poco peso. Las fibras no se compactan con lo que apenas presentan asentamiento con el paso del tiempo previendo una vida media útil de más de 50 años. Es permeable al vapor de agua, lo cual permite que el vapor de agua del interior de los edificios fluya al exterior a través de las paredes, permitiendo que la humedad pueda escapar con facilidad. Este material requiere para su fabricación un alto porcentaje de vidrio reciclado, que puede oscilar entre un 10% y 30%, con lo cual contribuye de manera importante con la economía circular [83].



### 3.9 Selección del micro inversor

El funcionamiento de un sistema solar fotovoltaico requiere de una serie de elementos para que la energía solar pueda ser utilizada a través de los paneles solares y una de las piezas fundamentales es el inversor o microinversor, los cuales convierten la corriente directa obtenida a corriente alterna. Debido a la simplicidad del sistema con el que ya se cuenta en la preparatoria, se optó por un microinversor que ofrece varios beneficios para las instalaciones fotovoltaicas, principalmente en aplicaciones de bajo presupuesto, por lo que representan una alternativa viable en espacios reducidos, disminuyendo el efecto de sombreado y la afectación al rendimiento del sistema. Además, se cuenta con monitoreo independiente que permite observar el desempeño y conocer la eficiencia de cada panel solar, así como la energía generada.

Con la finalidad de analizar la factibilidad técnica del sistema fotovoltaico, se considero el consumo eléctrico del extractor de aire observado en la figura 3.9 (a). Tomando en cuenta la utilización de 8 horas diarias de uso de este sistema se obtiene un consumo eléctrico de 320 Wh por día.

La demanda de potencia de 40 W del extractor de aire puede ser satisfactoriamente abastecida por los dos paneles solares con los que actualmente se cuenta, las especificaciones técnicas por panel solar son observables en la figura 3.9 (b).

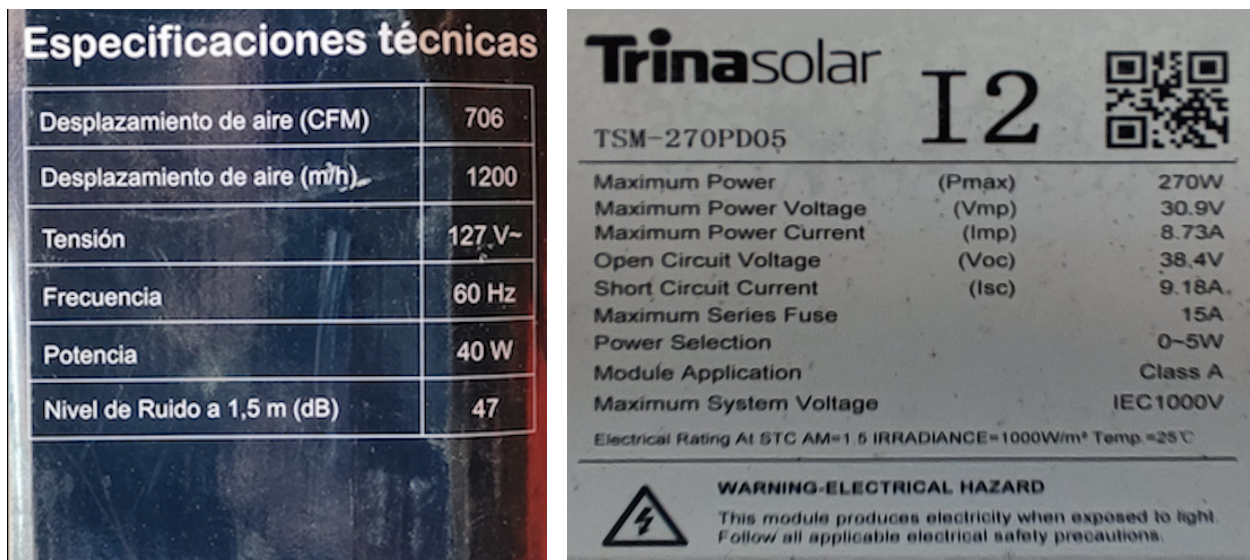


Figura 3.9 (a) especificaciones técnicas de aire disponible para la aplicación de flujo de aire constante (b) especificaciones técnicas del panel solar disponible

Una vez tomando en cuenta estas especificaciones se propuso adquirir un microinversor Walfront WVC - 600W el cual es impermeable gracias a su diseño aerodinámico a prueba de agua IP65, que puede prevenir eficazmente la erosión de la superficie por el agua de lluvia, posee un control digital completo que permite la supervisión y gestión inteligente de bajo coste de operación y mantenimiento, cuenta con tecnología automática que en días nublados, cuando la corriente de salida de cada celda solar es extremadamente pequeña, el inversor enciende automáticamente su función de búsqueda de energía de 6 niveles para lograr una salida de energía continua, estable y eficiente a baja potencia. Cabe mencionar que la escuela preparatoria no cuenta con un banco de baterías por lo que este inversor es propuesto debido a que este permite conectarse directamente a los paneles solares siendo no necesario conectar las baterías, este dispositivo se observa en la figura 3.9.1.



**Figura 3.9.1 Microinversor propuesto: Walfront WVC - 600W**

# CAPÍTULO 4

## RESULTADOS

### 4.1 Análisis de resultados

Con base en la metodología de diseño de la figura 3, aplicando las ecuaciones propuestas en el apartado 3.6.3 se obtuvo una matriz con más de 100 resultados. En la tabla 4.1 se observan 13 de los resultados más relevantes. Cabe destacar que se seleccionaron en base a su efectividad, credibilidad ambiental y condiciones meteorológicas representativas, como humedad del 45% . Este valor esta presente la mayor parte del día con decrementos de 8:00 a 17:00 hrs lo cual es favorable debido a la facilidad de calentar aire con menor porcentaje de humedad.

**Tabla 4.1 Variables bioclimáticas**

Humedad relativa	Velocidad del viento	Temperatura de entrada	Temperatura de salida	Diámetro de tubería	Q	N	L
60	2	4	12	10	113	2	19
60	2	4	15	10	103	2	30
45	2	0	15	10	117	2	25
45	2	4	15	10	102	2	23
45	2	2	12	10	120	2	18
45	1.5	4	15	10	86	2	20
45	2	4	18	10	91	2	26
45	2.5	4	18	10	120	1	34
30	3	4	18	10	100	1	42
30	3	4	18	10	100	1	42
30	2.5	4	15	10	102	2	23
30	2	4	15	10	103	2	19
30	2	4	18	10	92	2	30

## **4.2 Justificación de los parámetros físicos del sistema pasivo “GAHE”**

Se selecciono principalmente la tubería de 10 in debido a que la cantidad necesaria de aire a suministrar es de 720 m<sup>3</sup>/h y con una tubería de menor diámetro se necesitaría una mayor cantidad de ductos para cumplir con ese requerimiento. Se eligió una longitud de 39 m debido que con esa longitud en base a los cálculos es posible calentar el aire de los 4 °C a 18 °C con una velocidad de entrada de 2.5 m/s la cual se mantendrá constante debido al uso del extractor conectado al panel solar y una humedad relativa del 45 % la cual es representativa. La longitud es aceptable debido a que en la literatura publicada respecto a la implementación de este tipo de sistemas pasivos, se recomienda no exceder los 50 metros de longitud [84].

## **4.3 Cumplimiento de la norma ASHRAE 55 2020**

El estándar ASHRAE 55 plantea un método analítico para evaluar el confort cuando no es posible respetar algunas de las restricciones del método gráfico, por ejemplo vestimentas con un nivel de aislamiento superior a 1.0 clo. En este sentido, ofrece un poco más de flexibilidad para verificar el cumplimiento del estándar. Este método también se basa en el modelo de PMV, pero implica el uso de herramientas computacionales para calcular directamente sus indicadores de confort , es decir la sensación térmica y el porcentaje de personas en discomfort. Una de esas herramientas es la CBE Thermal Comfort Tool, la cual fue utilizada para verificar el cumplimiento del confort térmico en este caso de estudio [85]. El método de adaptabilidad es aplicable solo para espacios acondicionados naturalmente controlados por los ocupantes que cumplen con todos los siguientes criterios: (a) No hay un sistema de enfriamiento mecánico instalado. No hay ningún sistema de calefacción en funcionamiento; (b) Tasas metabólicas que oscilan entre 1,0 y 1,3 met; y (c) Los ocupantes son libres de adaptar su ropa a las condiciones térmicas interiores y/o exteriores dentro de un rango de al menos 0,5-1,0 clo [86].

Se consideró una humedad relativa del 45 % con una temperatura operativa de 25 °C y usuarios con vestimenta de 1 clo. Con base a estos valores en la figura 3.3 podemos observar que este diseño cumple con los valores de confort térmico cumpliendo límites de aceptabilidad del 80% y una temperatura operativa: 17,4 a 24,4 °C.

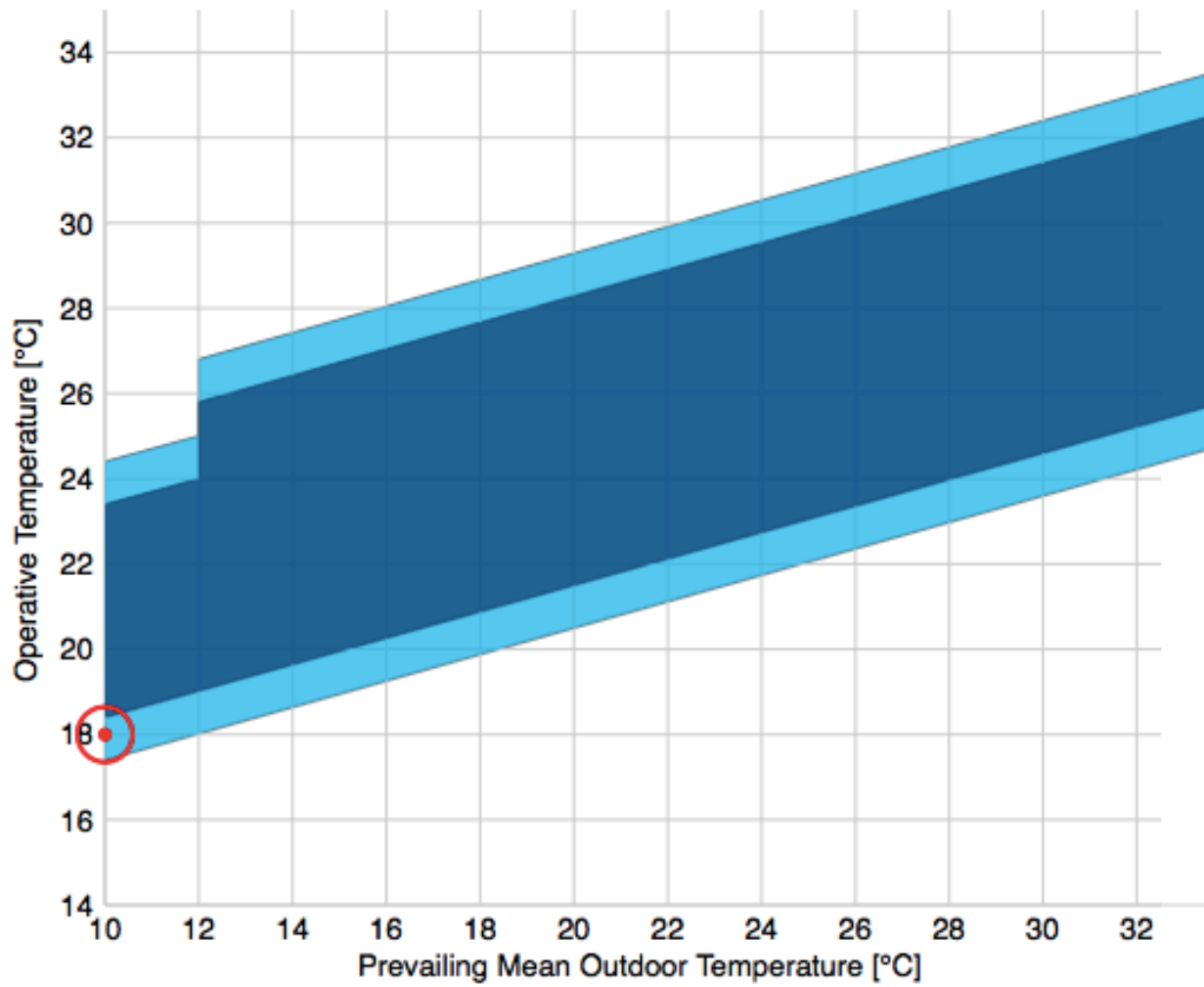


Figura 4.1 Cumplimiento de la norma ASHRAE 55 Elaborado en el método adaptativo en: <https://comfort.cbe.berkeley.edu>

## 4.4 Cálculo de pérdidas de presión

Cálculo de pérdidas menores por fricción

Considerando el área

$$\begin{aligned}A &= \left(\frac{\pi}{4}\right)(d^2) \\A &= \left(\frac{\pi}{4}\right)(0.2534^2) \\A &= 0.05043m^2\end{aligned}\tag{19}$$

Considerando el área obtenida y la velocidad requerida en los cálculos de 2.5 m/s. Se obtiene el flujo volumétrico mediante la ecuación.

$$\begin{aligned}Q &= AV \\Q &= (2.5m/s)(0.05043m^2) \\Q &= 453.88m^3/h\end{aligned}\tag{20}$$

Se obtienen propiedades del aire a 10 °C

$$\begin{aligned}\rho &= 1.247kg/m^3 \\ \gamma &= 12.23N/m^3 \\ \nu &= 1.42 \times 10^{-5}m^2/s\end{aligned}$$

Con la propiedades obtenidas se calcula el número de Reynolds

$$\begin{aligned}NR &= \frac{Vd}{\nu} \\ NR &= 4.46 \times 10^4\end{aligned}\tag{21}$$

Con el numero de Reynolds obtenido se puede observar que el flujo se encuentra pasando de transición a turbulento.

Se calcula la pérdida por fricción, pero para eso se debe obtener el valor del coeficiente de fricción  $f$ :

$$\begin{aligned}h_f &= f \cdot \frac{L}{d} \cdot \frac{V^2}{2g} \\ f &= \frac{64}{NR}\end{aligned}\tag{22}$$

$$f = \frac{64}{44,462.67}$$

$$f = 1.4349 \times 10^{-3}$$

(23)

La longitud previamente obtenida es  $L = 39 \text{ m}$  utilizando la ecuación (22) se obtiene:

$$h_f = 1.4349 \times 10^{-3} \cdot \frac{39 \text{ m}}{0.2534 \text{ m}} \cdot \frac{(2.5 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$

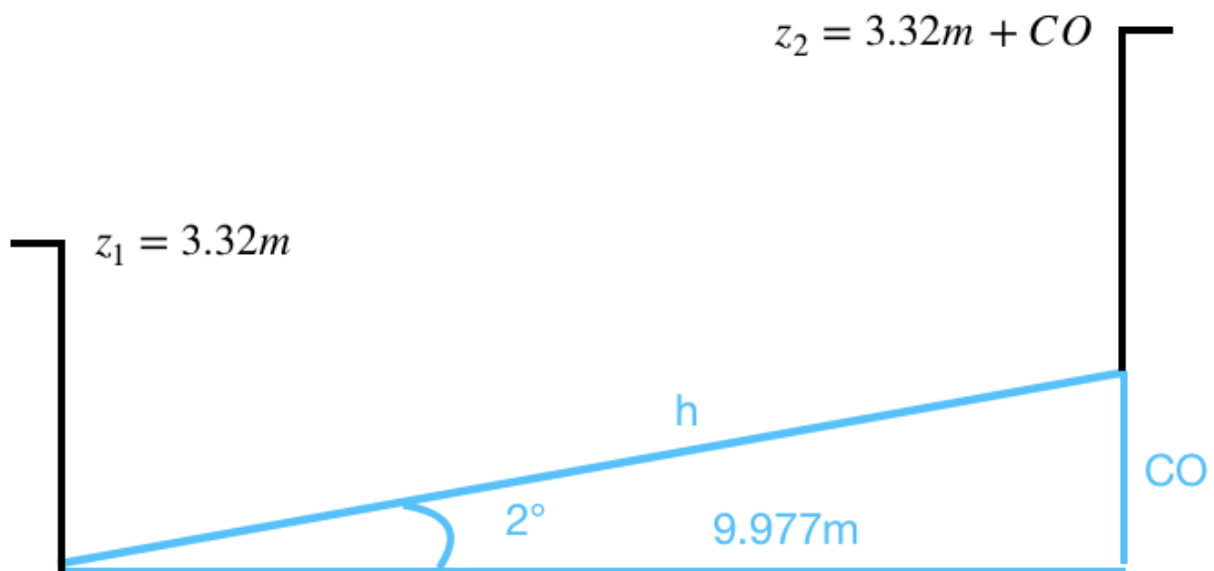
$$h_f = 0.0703$$

Aplicando la ecuación general de la energía tenemos que

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} - h_f = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

(24)

Para utilizar la ecuación (24) es necesario obtener los valores de  $z_1$  y  $z_2$  por lo que se utilizará el siguiente diagrama para obtener una visión más detallada de los valores relacionados a la altura. Considerando la inclinación necesaria de dos grados del GAHE se puede visualizar que  $z_2$  quedará en la posición más alta respecto a  $z_1$ :



**Figura 4.2 Visualización del sistema con su altura respectiva debido a la inclinación**

Utilizando identidades trigonométricas se obtiene  $CO$  y se le suman  $3.32\text{ m}$ , que es la altura de la tubería del GAHE

$$\cos(2) = \frac{9.977m}{h}$$

$$h = 9.9830m$$

$$\text{sen}(2) = \frac{CO}{h}$$

$$\text{sen}(2) = \frac{CO}{9.9830m}$$

$$CO = \text{sen}(2)(9.9830m)$$

$$CO = 0.3460m$$

$$z_1 = 3.32m$$

$$z_2 = 3.32m + 0.3460m$$

$$z_2 = 3.6684m$$

De la ecuación (24) se cancelan las velocidades debido a que se mantienen iguales, se despeja la ecuación para obtener la pérdida de presión por lo que se obtiene el siguiente término.

$$P_1 - P_2 = \gamma[(z_2 - z_1) + h_f] \tag{25}$$

$$P_1 - P_2 = 12.23N/m^3[(3.6684m - 3.32m) + 0.0703m]$$

$$P_1 - P_2 = 12.23N/m^3[0.4187m]$$

Realizando las sustituciones necesarias se puede obtener una pérdida de presión de:

$$P_1 - P_2 = 5.12Pa$$



## 4.5 Factibilidad económica de los intercambiadores de calor tierra aire

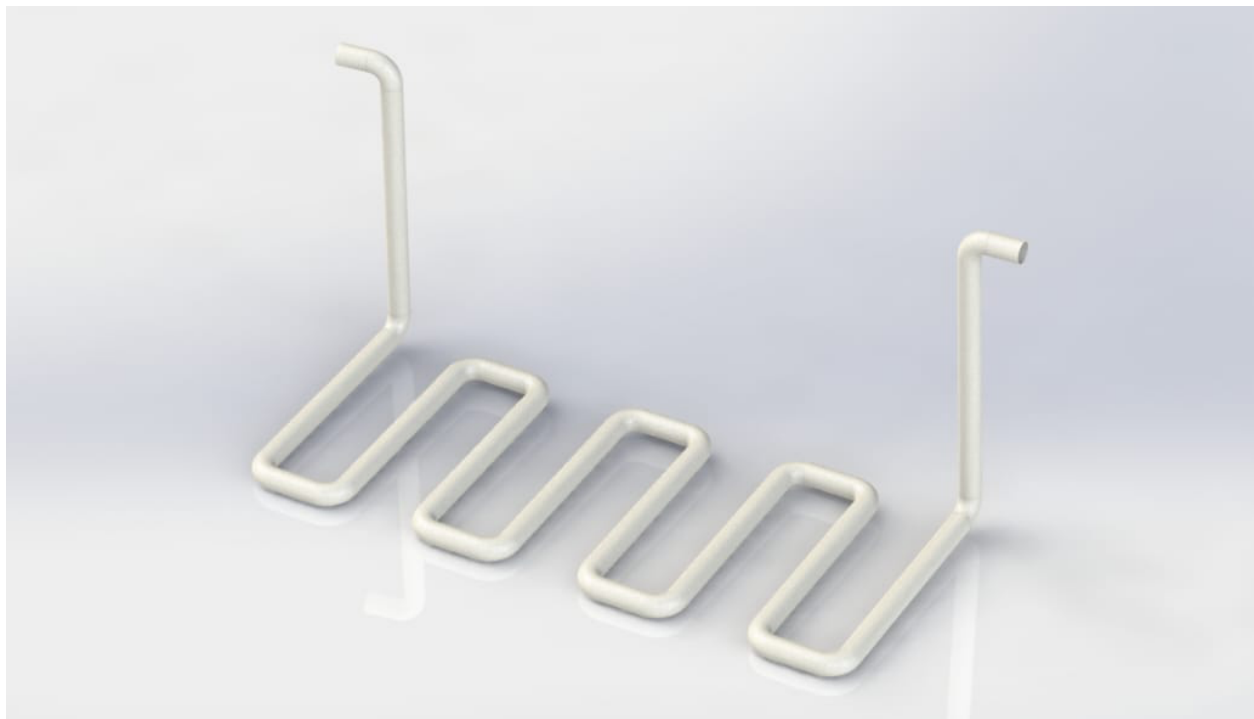
De manera comercial los ductos de PVC corrugado se venden por tramos de 6.10 m, así que, se requieren 8 tramos para obtener una longitud total de 48 m del pozo canadiense. Debido a la existencia de restricción de espacio, se propuso un arreglo tipo serpentín o rejilla, por lo cual, se necesita un total de 22 codos por ducto. También, se requieren 2 filtros de aire, colocados en la entrada y salida de los ductos verticales, esto para evitar la entrada de polvo o insectos. Cabe mencionar que la comunidad de Tres Marías es cooperativa por lo que los costos de mano de obra y herramientas para abrir la zanja pueden ser descartados, los costos de los componentes se muestran en la Tabla 4.2.

**Tabla 4.2 – Inversión total para la implementación de un pozo canadiense**

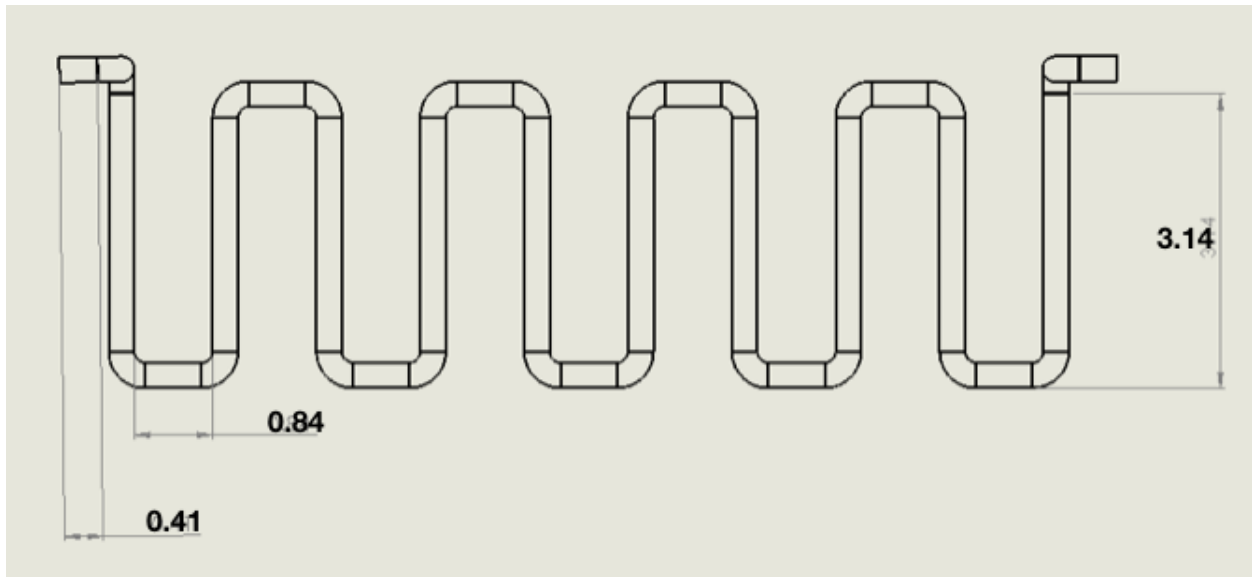
Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Ductos de PVC	48 m	\$210.98	\$10127
Codos	22 pzas	\$480	\$10560
Filtros de aire	2 pzas	\$1,100	\$2200.00
Aislante térmico (Lana mineral de 2" 1.22 x1 m)	3 m	\$312	\$ 935
Microinversor Walfront WVC 600W	1 Pza	\$2,160	\$2160.00
Pegamento Pvc 717 Transparente Weld On (1/2 Litro)	8 Pza	\$359	\$2872
<b>INVERSIÓN TOTAL</b>			<b>\$28,854</b>

## 4.6 Renderizado y parámetros físicos del sistema del calefacción pasivo

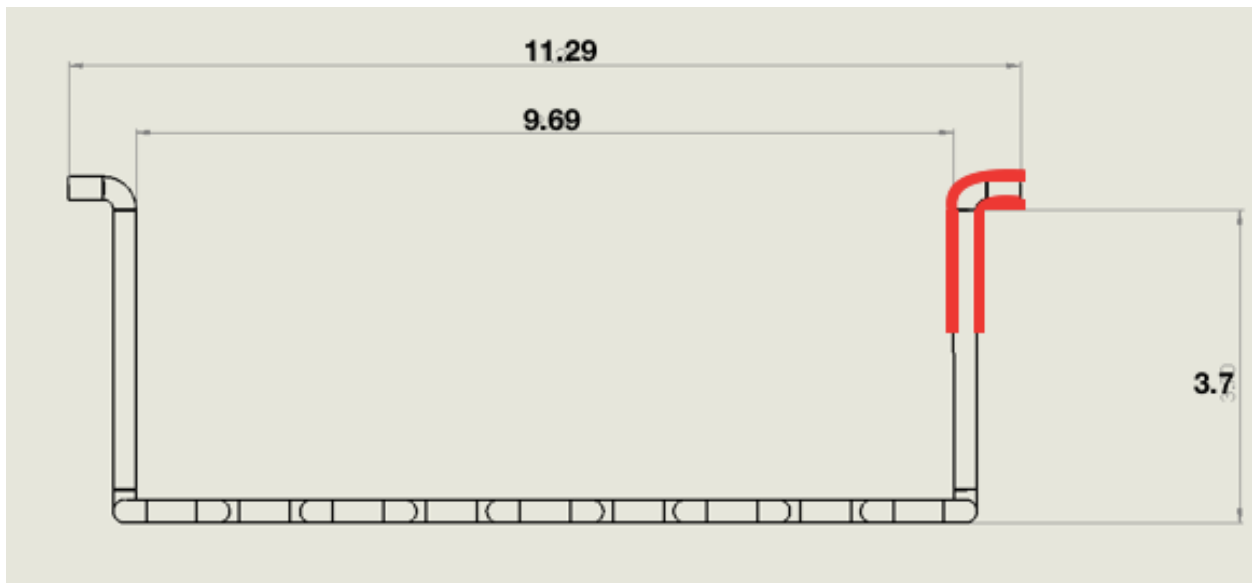
Una vez propuesta la longitud del calentador pasivo, se elaboró un renderizado en el software de diseño Solid Works el cual puede observarse en la figura 4.2. Además se observa en la figura 4.2.1 a y b las dimensiones finales en metros, de manera general la profundidad de entierro es de tres metros logrando sobresalir 70 cm de tubería sobre el suelo, con 40 cm de tubería horizontal colocada a la entrada y a la salida. Se consideran 8 tramos de 6 metros de tubería para cumplir con un metro de tubería extra por cualquier situación extraordinaria, cumpliendo así con 48 metros necesarios para la construcción del sistema de calefacción pasivo. En la figura 4.3.1 (b) de color rojo se representa el aislante térmico a la salida, este cubrirá la mitad del entierro ya que en la literatura publicada, en un análisis numérico experimental se determino que solamente es necesario asilar la mitad de la profundidad enterrada, reduciendo así material y costos. El espesor determinado es 0,05 m (2 pulgadas) en base a el artículo citado del Doctor Xamán [87-88].



**Figura 4.3 Renderizado de la Geometría final realizado en Solid Works 2018**



**Figura 4.3.1 (a) Dimensionamiento de la geometría final realizado en Solid Works 2018 unidades en metros**



**Figura 4.3.1(b) Dimensionamiento de la geometría final realizado en Solid Works 2018 unidades en metros**

## 4.7 Factibilidad económica de un sistema activo de calefacción

En la tabla 4.1 se observa la cotización para un sistema activo de calefacción, dichos sistemas son dependientes de la red eléctrica, además de poseer tecnología “inverter”, la cual actualmente es la más eficiente en el mercado, debido a su bajo consumo eléctrico gracias a que el compresor trabaja a máxima potencia para que al encender, los dispositivos de climatización alcancen la temperatura deseada en menor tiempo, dicho sistema se muestra en la figura 4.4. Los costos mostrados son para adquirir el equipo además de su instalación. Tomando en cuenta que su consumo es de 17574 W suponiendo un uso de 8 horas diarias de Lunes a Viernes y una tarifa en CFE de \$2.859 por cada kilowatt, el gasto aproximado en luz por año es de \$37,256.88.



**Figura 4.4 Sistema de Calefacción activo**

**Tabla 4.3 Inversión total para la implementación de un sistema activo de calefacción por minisplit**

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Precio total
Mini Split Piso Techo Frio Calor Mca. York Inverter 5.0 Tr 220V R-410A Consumo De 60,000 Btu , Compuesto Por Una Unidad Condensadora Y Una Unidad Evaporadora	1	\$67,500	\$67500
Instalación Fisica De Equipo, El Precio Incluye; Tuberia De Cobre Forrada Con Aislamiento Térmico O Armaflex Hasta 5 Mts. Distancia Para Interconexion De Evaporador A Condensador, Cableado De Evaporadora Y Condensadora Con Cable Uso Rudo De 4X14, Tuberia De Drenado Con Tubo De Pvc De 3/4, Resanes, Soldadura De Plata, Mano De Obra Especializada, Herramienta, Equipo, Pruebas De Arranque Y Puesta En Marcha Una Vez Que El Cliente Nos Suministra La Alimentacion Eléctrica A Pie De Condensador	1	\$52,000	\$52000
<b>Subtotal</b>			\$119500
<b>IVA</b>			\$19120
<b>INVERSIÓN TOTAL</b>			\$138620

### **4.7.1 Retorno de inversión**

Considerando una tarifa básica de \$0.843 por kWh, previamente consultada en la página de internet de CFE, para el sistema de calefacción activo en el periodo de tres meses se obtiene un gasto de \$7826.85 cabe mencionar que la al ser una escuela el consumo de energía eléctrica es mayor por lo que se paga la tarifa alta de \$2.983 por kWh, tomando en cuenta este costo se obtiene un gasto de \$27,695.72 repartido entre tres meses de \$9,232 pesos por mes.

Considerando el costo de adquisición de \$67,500 del sistema de calefacción activo de la tabla 4.3 y el gasto en consumo eléctrico de \$9,232 correspondiente por año se obtiene un total de inversión inicial de \$76,732 el primer año, cabe mencionar que dicho equipo requiere de una tensión eléctrica de 220 V por lo que se requeriría realizar un gasto adicional a dicha instalación. Sin tomar en cuenta el gasto de instalación de la tensión eléctrica el retorno de inversión es de 5 meses.

### **4.7.2 Mantenimiento**

Los intercambiadores deben estar equipados con filtros que impidan la entrada de partículas a la zona climatizada, el mantenimiento de los mismos debe ser el adecuado y los filtros deberán cambiarse periódicamente. El uso de filtros opacimétricos, que retienen el polvo y el polen es frecuente. El control de las bocas interiores debe hacerse al mismo tiempo que las exteriores. Una limpieza quincenal es aconsejable. Para el mantenimiento a largo plazo debe considerarse que la vida útil del extractor y los paneles suele situarse entre los 15 y 20 años. El riesgo de condensación en el interior de los intercambiadores es un riesgo a tener muy en cuenta. La existencia de humedades no tratadas en el sistema puede ocasionar el crecimiento de mohos y la generación de malos olores, el sistema debe ser accesible para permitir su lavado con una frecuencia anual parece razonable. El clima efectivo del emplazamiento, la profundidad de las instalaciones y la velocidad de flujo tienen una incidencia clara en los riesgos de condensación. El uso de productos especializados, la utilización de agua con soluciones desinfectantes solo es posible si las pendientes permiten la evacuación para evitar el estancamiento. La limpieza deberá realizarse teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas reinantes para favorecer un buen secado. Preferiblemente la instalación dispondrá de registros para facilitar el acceso a la instalación [89].

## 4.8 Factibilidad ambiental del intercambiador de calor tierra-aire

El factor de emisión del Sistema Eléctrico Nacional es proporcionado por la Comisión Reguladora de Energía (CRE) para el cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de electricidad correspondiente al año 2022, Se calculó en base a la posibilidad de implementar el sistema activo de calefacción con valor de 60,000 Btu de consumo [90].

$$1Btu = 1055.06J$$

$$60,000Btu = 63,303,600J$$

$$\frac{63,303,600J}{3,600s} = 17,584.33W$$

Por lo tanto el consumo en energía es de 17.5843 kW

Considerando un uso de 8 horas diario 5 días a la semana por mes se tiene un consumo de

3,094.84 kWh por mes

Tomando en cuenta el mes de Noviembre, Enero y Febrero sin contar Diciembre debido a las vacaciones por año se genera un consumo de:

9,284.52 kWh por periodo de utilización de tres meses

$$FE = 0.423 \text{ tCO}_2\text{e/MWh}$$

Para la estimación se requiere aplicar la ecuación:

$$HC = (C_E)(FC)(FE) \tag{18}$$

Dónde:

$C_E$  = Consumo de energía eléctrica (kWh)

$FE$  = Factor de emisión

$FC$  = Factor de conversión

$HC$  = Huella de carbono

Al remplazar los datos en la ecuación (20) se obtiene:

$$HC = (9,284.52 \text{ kWh}) \left( \frac{1 \text{ MWh}}{1000 \text{ kWh}} \right) \left( \frac{0.423 \text{ tCO}_2\text{e}}{\text{MWh}} \right)$$

El cálculo de las emisiones indirectas de gases de efecto invernadero por consumo de energía para calefacción de las aulas de la primaria sería:

$$HC = 3.92 \text{ tCO}_2e$$

Por lo tanto, se encontró que la mayor cantidad de emisiones evitadas sería por concepto de confort térmico, el impacto ambiental podría reducirse a cero con la implementación del pozo canadiense.

#### 4.9 Justificación del material de construcción

Para obtener la mejor propuesta técnica, económica y ambientalmente factible, se realizaron cálculos considerando tubería de acero de 10 pulgadas cédula 40, debido a su mayor conductividad térmica. Los resultados más relevantes son mostrados en la tabla 4.4 donde se puede observar que a una velocidad de viento a 2.5 m/s la longitud necesaria para conseguir un gradiente de temperatura de 14 grados Celsius, teóricamente se necesitarían 34 metros de tubería, los cuales son 5 metros menos que en el caso de la tubería de pvc. Este resultado posiblemente considere al acero una propuesta técnicamente factible, sin embargo al considerar el costo de la tubería de acero y la energía eléctrica necesaria de soldadura o de maquinado para dicho material, el pvc resulta ser una mejor opción económica como ambientalmente factible.

**Tabla 4.4 Resultados de longitud, utilizando tubería de acero de 10 in, cédula 40**

Humedad relativa	Velocidad del viento	Temperatura de entrada	Temperatura de salida	Diámetro de tubería	Q	N	Longitud
45	1.5	4	18	10	85	2	29
45	2	4	18	10	103	2	31
45	2.5	4	18	10	120	1	34



# CAPÍTULO 5

## CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS

### 5.1 Conclusiones

- 1.-En comparación con un sistema activo de calefacción, este sistema demuestra ser ampliamente viable debido al gran ahorro energético y económico que presenta, además de no producir gases de efecto invernadero.
- 2.-La calefacción cumple con la mayor parte de demanda energética de una edificación, es por esto que este sistema fue el principal enfoque de estudio. Sumado con otras menores posibles soluciones pasivas, si es posible reducir el consumo energético a 0.
- 3.- La velocidad del aire en este caso de estudio debió mantenerse en los 2.5 m/s ya que si se incrementaba la velocidad por 5 décimas la longitud aumentaba por dos metros. Esto es debido a que no se le permitiría al aire el suficiente tiempo para ser calentado. De lo contrario con una menor velocidad se necesitarían un mayor número de ductos para cubrir con la demanda de flujo volumétrico necesaria.
- 4.- Debido al enfoque en calefacción de este trabajo con entalpías muy bajas, se obtuvieron dimensiones más extensas de lo que podría ser para el caso de este sistema enfocado a refrigeración.
- 5.-El PVC fue una certera elección de material debido a su versatilidad y facilidad de conseguir. Si se utilizaba un material como acero, los cálculos tenían una variación de 10 metros menos, con el inconveniente de la dificultad de trabajar acero y de su obtención, resulta de mayor facilidad haber trabajado con el material seleccionado.
- 6.-De no haber utilizado un dispositivo de ventilación mecánica se habría tenido que calcular las direcciones predominantes de viento para así poder orientar la captación de aire de dicho sistema.
- 7.-La obtención de resultados puede ser más eficiente si se programa una memoria de cálculo en excel con una macro donde se ajusten los valores de acuerdo a la humedad y temperatura de manera automática. De igual forma puede ser programada en otro lenguaje de programación para obtener valores con mayor versatilidad.
- 8.-Un GAHE puede ser utilizado en casi cualquier tipo de condiciones climatológicas, en situaciones de temperaturas extremas, puede utilizarse junto con un sistema activo, para así disminuir el trabajo de dicho sistema y reducir su consumo energético, permitiendo un mayor confort térmico con un menor uso de fuentes no renovables o incluso fuentes renovable, lo cual sería lo más favorable.

## **5.2 Perspectivas a futuro**

1.-Este sistema puede ser mucho más eficiente y de menor costo, si se implementará una chimenea solar, de esta forma la ganancia térmica podría ser considerable.

3.-Sería de interés diseñar este sistema con una rejilla para volver el flujo turbulento en laminar, de esta forma se supondría que el aire permanecería mayor tiempo y podría calentarse con un mayor gradiente.

4.-La implementación y diseño de un recuperador de calor, es un tema que podría mejorar la amplitud de esta investigación, si se colocara un ventilador para reintroducir el aire caliente por un ducto conectado a la tubería horizontal. La temperatura podría incrementar, mejorando así el confort térmico, permitiendo al usuario una elección de clo menor.

5.-Es de interés realizar los cálculos para el caso de la utilización de dos materiales, posiblemente uno de menor costo a la introducción y uno de mayor conductividad térmica en la posición horizontal junto con la salida, o variar estos parámetros, observando si la longitud podría disminuir, traduciéndose en un menor costo.

## BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES CONSULTADAS

[1] Jorge Dehays, “Medio ambiente”, Laura Baca y Judith Bosker, Léxico de la política, Fondo de Cultura Económica, México, 2000, pp-407-411

[2 ] El documento que recoge estas conclusiones se conoce como Informe Brundtland, Organización de las Naciones Unidas, “Cumbre para la Tierra + 5. Documento de antecedentes”, Nueva York, junio de 1997, disponible en [www.un.org](http://www.un.org) (consulta: 17/Febrero/2022).

[3] <http://www.lineaverdehuelva.com/lv/consejos-ambientales/energias-renovables/Que-son-las-energias-renovables.asp>

[4] Assessing Energy Poverty in Urban Regions of Mexico: The Role of Thermal Comfort and Bioclimatic Context Karla G. Cedano , Tiare Robles-Bonilla \*, Oscar S. Santillán and Manuel Martínez Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de Mexico, Temixco 04510, Mexico; [kcedano@ier.unam.mx](mailto:kcedano@ier.unam.mx) (K.G.C.); [oss@ier.unam.mx](mailto:oss@ier.unam.mx) (O.S.S.); [mmf@ier.unam.mx](mailto:mmf@ier.unam.mx) (M.M.) \* Correspondence: [trb@ier.unam.mx](mailto:trb@ier.unam.mx); Tel.: +52-17352069012

[5] Fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático resumen para responsables de políticas y resumen técnico Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático Resumen para responsables de políticas  
Informe del Grupo de trabajo III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC)

[6] Claudia Herrán\* EL CAMINO HACIA UNA ECONOMÍA VERDE México, 2012  
Proyecto Energía y Clima de la Fundación Friedrich Ebert – FES <http://www.fes-energiayclima.org/> Este texto puede ser reproducido con previa autorización con un objetivo educativo y sin ánimo de lucro.

[7] Measuring multiple impacts of low-carbon energy options in a green economy context Applied Energy 179 (2016), 1409-1426DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.07.027

[8] <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/economy/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>

[9] <https://alusinsolar.com/el-importante-papel-de-la-energia-solar-en-la-economia-circular/>

[10] <https://blogedificacionyenergia.com/edificios-energia-cero/>

Department of energy DOE. Disponible en: <https://www.energy.gov/eere/buildings/articles/doe-releases-common-definition-zero-energy-buildings-campus-and>

[11] LA ENERGÍA SOLAR EN LA EDIFICACIÓN: LA ENERGÍA SOLAR TÉRMICA

[12] Pătrașcu Gh. *Arhitectura și tehnica populară (Folk technique and architecture)*. Editura Tehnică, Bucharest; 1984.

[13] A'zami A. Badgir in traditional Iranian architecture. In: *Proceedings of international conference on passive and low energy cooling for the built environment*, Santorini, Greece; 2005.

[14] Jones G, Bouamane L. *Power from sunshine: a business history of solar energy*. United States: Harvard Business School; 2012.

[15] Duffie JA, Beckman WA. *Solar engineering of thermal processes*. 3rd ed.. New Jersey: John Wiley & Sons Inc.; 2006.

[16] Marszal J, Heiselberg P, Bourrelle JS, Musall E, Voss K, Sartori I, Napolitano A. Zero energy building – a review of definitions and calculation methodologies. *Energy Build* 2011;43(4):971–9.

[17] Vale B, Vale RJD. *The autonomous house: design and planning for self-sufficiency*. London: Thames and Hudson; 1975.

[18] Vale B, Vale RJD. *Ecological Architecture: The Cutting Edge?* In: *Proceedings of Solar 97 – Australian and New Zealand Solar Energy Society*, Canberra, Australia; 1997. paper 72.

[19] Stahl W, Voss K, Goetzberger A. The self-sufficient solar house in Freiburg. *Sol Energy* 1994;52(1):111–25.

[20] <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>

[21] *La huella del carbono en la producción, distribución y consumo de bienes y servicios* Heloísa Schneider Joseluis Samaniego LC/W.298 Copyright © Naciones Unidas, marzo 2010. Todos los derechos reservados Impreso en Naciones Unidas, Santiago de Chile.

[22] <https://porelclima.org> Fecha de consulta 19/06/23

[23] <https://www.un.org/es/actnow/ten-actions> Fecha de consulta 19/06/23

[24] <https://inarquia.es/edificios-net-zero-un-ejemplo-de-arquitectura-sostenible/> Fecha de consulta 19/06/23

[25] <https://www.eluniversal.com.mx/estados/intenso-frio-pone-en-alerta-pobladores-de-tres-marias-morelos> Fecha de consulta 19/06/23

- [26] <https://energiesprong.org> Fecha de consulta 19/06/23
- [27] <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/climate-change-2/> Fecha de consulta 19/06/23
- [28] [https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0164\\_ES.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/A-8-2015-0164_ES.html) Fecha de consulta 19/06/23
- [29] Eficiencia Energética en la Edificación Dr. Luis Rocha Chiu Dr. Víctor Jiménez Argüelles Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco Departamento de Materiales Área de Construcción [rcla@correo.azc.uam.mx](mailto:rcla@correo.azc.uam.mx) 2016
- [30] UNIVERSIDAD DE VALLADOLID DISEÑO Y ESTUDIO ENERGÉTICO DE UN EDIFICIO NZEB (NEAR ZERO ENERGY BUILDING). PLANTEAMIENTOS DE SOSTENIBILIDAD Francisco J. Valbuena García 2020
- [31] ESTRATEGIA A LARGO PLAZO PARA UNA ECONOMÍA ESPAÑOLA MODERNA, COMPETITIVA Y CLIMÁTICAMENTE NEUTRA EN 2050. Madrid, noviembre 2020 Autor Miteco
- [32] <https://cordis.europa.eu/article/id/430390-a-collaborative-approach-promotes-net-zero-energy-settlements/es> Fecha de consulta 19/06/23
- [33] Universidad De San Carlos De Guatemala Facultad De Arquitectura Escuela de Arquitectura Proyecto De Graduación Arquitectura Verde Y Sistemas De Certificación Aplicado a Edificaciones Sostenibles Irma Leticia Itzep Xicará 2015
- [34] <https://www.mundohvacr.com.mx/2009/10/ahorro-energetico-y-aprovechamiento-de-la-energia-en-la-climatizacion-de-edificios/> Fecha de consulta 19/06/23
- [35] <https://www.bbc.com/mundo/noticias-43712276> Fecha de consulta 19/06/23
- [36] Jing Chen UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE EDIFICACIÓN MÁSTER EN INNOVACIÓN TECNOLÓGICA EN EDIFICACIÓN TRABAJO FIN DE MÁSTER CURSO 2020-2021
- [37] <https://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-arquitectura-bioclimatica> Fecha de consulta 19/06/23
- [38] LAURA MERCADO MALDONADO [laura.mercado@unison.mx](mailto:laura.mercado@unison.mx) Universidad de Sonora, Mexico Mitigación y adaptación al efecto de isla de calor urbana de clima cálido seco. El caso de

Hermosillo, Sonora Vivienda y Comunidades Sustentables, núm. 11, pp. 85-110, 2022  
Universidad de Guadalajara Recepción: 29 Junio 2021 Aprobación: 05 Noviembre 2021

[39] <https://cordis.europa.eu/article/id/430390-a-collaborative-approach-promotes-net-zero-energy-settlements/es> Fecha de consulta 19/06/23

[40] [https://www.comunicacionfi.unam.mx/mostrar\\_noticia.php?id\\_noticia=1645](https://www.comunicacionfi.unam.mx/mostrar_noticia.php?id_noticia=1645) Fecha de consulta 19/06/23

[41] Net-zero building designs in hot and humid climates: K. Sudhakar, Maximilian Winderl, S. Shanmuga Priya, Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pahang, Malaysia Energy Centre, Maulana Azad National Institute of Technology Bhopal, M.P., India Automotive Engineering Centre, Universiti Malaysia Pahang, 26600 Pekan, Pahang, Malaysia Department of Civil, Geo and Environmental Engineering, TU München, Germany. Department of Chemical Engineering, Manipal Institute of Technology, Manipal Academy of Higher Education, Manipal, 576104, Karnataka, India

[42] Solar radiations S.C. Bhatia, in Advanced Renewable Energy Systems, 2014

[43] A review on zero energy buildings – Pros and cons Tabbi Wilberforce. Olabi, Enas Taha Sayed, Khaled Elsaid, Hussein M. Maghrabie f, Mohammad Ali Abdelkareem 2020

[44] Tianyi Chen, Yaning An and Chye Kiang Heng. A Review of Building-Integrated Photovoltaics in Singapore: Status, Barriers, and Prospects 2022

[45] A framework for NZEB design in Mediterranean climate: Design, building and set-up monitoring of a lab-small villa Fabrizio Ascione, Martina Borrelli, Rosa Francesca De Masi, Filippo de Rossi, Giuseppe Peter Vanoli. 2019

[46] <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:7730:en> Fecha de consulta 19/06/23

[47] The Regulation of Body Temperature\* C. Bruce Wenger, Ph.D 2009 Fecha de consulta 19/06/23

[48] <http://www.arquitecturayenergia.cl/home/el-confort-termico/> Fecha de consulta 19/06/23

[49] <https://www.seiscubos.com/conocimiento/modelos-de-confort> fecha de consulta 24/08/23

[50] <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>. Fecha de consulta 19/06/23

[51] Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Approved by ASHRAE and the American National Standards Institute on July 31, 2020. Fecha de consulta 19/06/23

[52] <https://www.seiscubos.com/conocimiento/modelos-estadisticos-confort> fecha de consulta 24/08/23

[53] Thermal Comfort and Energy Efficiency: Challenges, Barriers, and Step towards Sustainability Iasmin Lourenço Niza, Inaiele Mendes da Luz, Ana Maria Bueno and Evandro Eduardo Broday IEQ Lab, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Rua Doutor Washington Subtil Chueire, 330, Jardim Carvalho, Ponta Grossa 84017-220, Brazil. Correspondence: [niza@alunos.utfpr.edu.br](mailto:niza@alunos.utfpr.edu.br) Fecha de consulta 19/06/23

[64] Yunus Cengel Transferencia de calor y masa Sexta Edición

[65] Experimental investigation of the performance of earth-to-air heat exchangers in arid environments. Nasreddine Sakhri, Younes Menni, Houari Ameer. 2020

[66] Thermal analysis of horizontal earth-air heat exchangers in a subtropical climate: An experimental study. Farkad A. Lattieff<sup>1</sup>, Mohammed A. Atiya<sup>2</sup>, Rudainah Ali Lateef<sup>3</sup>, Anmar Dulaimi<sup>4</sup>, Muhsin J. Jweeg<sup>5</sup>, Azher M. Abed<sup>6</sup>, Jasim M. Mahdi<sup>1</sup> and Pouyan Talebizadehsardari<sup>7\*</sup> 2022

[67] Utilization of Earth-to-Air Heat Exchanger to Pre-Cool/Heat Ventilation Air and Its Annual Energy Performance Evaluation: A Case Study Chong Zhang, Jinbo Wang, Liao Li, Feifei Wang, and Wenjie Gang. 2020

[68] <https://ecoinventos.com/earth-air-tunnel/> Fecha de consulta 19/06/23

[69] Elith, J., M. Kearney, and S. Phillips, The art of modelling range-shifting species. *Methods in ecology and evolution*, 2010. 1(4): p. 330-342.

[70] Kumar, S., L. Neven, and W.L. Yee, Evaluating correlative and mechanistic niche models for assessing the risk of pest establishment. *Ecosphere*, 2014. 5(7): p. 1-23.

[71] Potencial de enfriamiento geotérmico para edificaciones de los autores: Mario Cúnsulo, Alejandra Kurbán, Santiago Tosetti, Eduardo Montilla en la revista Hábitat Sustentable. 2019.

[72] [https://coespo.morelos.gob.mx/images/Datos\\_municipales/2021/HUITZILAC.pdf](https://coespo.morelos.gob.mx/images/Datos_municipales/2021/HUITZILAC.pdf)

[73] [http://www.transparenciamorelos.mx/sites/default/files/OCA15.Plan%20de%20desarrollo%20municipal%20o%20estatal4\\_1.pdf](http://www.transparenciamorelos.mx/sites/default/files/OCA15.Plan%20de%20desarrollo%20municipal%20o%20estatal4_1.pdf)

[74] <https://www.mundohvacr.com.mx/2023/02/la-industria-hvac-experimentara-un-impresionante-crecimiento/> fecha de consulta 24/08/23

[75] <https://www.mundohvacr.com.mx/2015/11/sistemas-activos-y-pasivos-la-combinacion-mas-eficiente-en-la-proyeccion-de-espacios/> fecha de consulta 24/08/23

[76] <https://arquitectura-sostenible.es/la-geotermia-para-las-viviendas-unifamiliares-como-solucion-idonea-de-futuro/> fecha de consulta 24/08/23

[77] Iannelli, L., Bezzo, E., Bermejo, A., Cozza, P., Fiora, J., Niño, J., Prieto, R., Romero P., Gil S. (2013). La tierra como acondicionador natural de ambientes. 1er Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía. Universidad de Buenos Aires, Argentina.

[78] Badescu, V. Simple and accurate model for the ground heat exchanger of a passive house. (2007). Renewable Energy, Vol. 32, 845–855.

[79] Carro, M. E., Peiretti, A. y Francisca, F.M. (2018). Energía geotérmica de baja entalpía en suelos loésicos: cálculo y diseño para caso de estudio. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, Vol. 22, 23-34.

[80] <https://todorehabilitacion.com/construcciones-ecologicas-todo-tenes-saber/> fecha de consulta 24/08/23

[81] Su, H., Liu, X.-B., Ji, L., & Mu, J.-Y. (2012). A numerical model of a deeply buried air-earth tunnel heat exchanger. Energy and Buildings, 233–239.

[82] <https://www.solerpalau.com/es-es/blog/materiales-aislantes-termicos/> fecha de consulta 24/08/23

[83] <https://afelma.org/que-es-lana-mineral/> fecha de consulta 24/08/23

[84] Effect of geo-climatic conditions and pipe material on heating performance of earth-air heat exchangers Mohammed Cherif Lekhal a , Mohammed-Hichem Benzaama b , Andrea Kindinis , Abderahmane-Mejedoub Mokhtari d , Rafik Belarbi e 15 July 2020 Accepted 11 August 2020 Available online 29 August 2020

[85] <https://comfort.cbe.berkeley.edu> fecha de consulta 24/08/23

[86] Arballo, B. D., Kuchen, E., y Chuk, D. (2019). Optimización de la eficiencia energética aplicando confort térmico adaptativo en un edificio de oficinas público en San Juan-Argentina. Revista hábitat sustentable, 9(1), 58-67.



[87] Parametric Study of the Ground-Air Heat Exchanger (GAHE): Effect of Burial Depth and Insulation Length Alfredo Aranda-Arizmendi 1 , Martín Rodríguez-Vázquez 2 , Carlos Miguel Jiménez-Xamán 3 , Rosenberg J. Romero 4 and Moisés Montiel-González 1,\* 2023

[88] Xamán, J.; Hernández-Pérez, I.; Arce, J.; Álvarez, G.; Ramírez-Dávila, L.; Noh-Pat, F. Numerical study of earth-to-air heat exchanger: The effect of thermal insulation. Energy Build. 2014, 85, 356–361. [CrossRef] 2023

[89] Intercambiadores tierra-aire en la climatización de construcciones. Pozos provenzales y técnicas emparentadas, geoconsultores técnicos y ambientales <http://www.geoconsultores.org/ficheros/10351934d072e37e99e71a43de3ad64a.pdf>

[90] [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/706809/aviso\\_fesen\\_2021.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/706809/aviso_fesen_2021.pdf) fecha de consulta 24/08/23

## ANEXOS

### Anexo 1

#### Matriz de resultados

Humedad relativa	Velocidad del viento	Temperatura de entrada	Temperatura de salida	Diámetro de tubería	Q	N	Longitud
30	0.07	0	12	6	11	156	3.33
30	2	0	12	6	136	5.4	8.16
30	5	0	12	6	230	2.19	12
30	2	0	12	8	132	3	11
30	0.07	0	12	8	11.64	88	4.46
30	5	0	12	8	218.12	1.23	17
30	0.07	0	12	10	11.61	56	5.59
30	2	0	12	10	127.94	2	14
30	5	0	12	10	207	1	22
45	2	0	12	6	125	5.4	10
45	2	0	12	8	132	3	13
45	2	0	12	10	127	2	18
45	2	0	15	6	125	5.4	14.58
45	2	0	15	8	121	3	20
45	2	0	15	10	117	2	25
45	2	4	15	6	109	5.4	13
45	2	4	15	8	106	3	18
45	2	4	15	10	103	2	23
45	2	4	18	6	98	5.4	20

45	2	4	18	8	95	3	27
45	2	4	18	10	92	2	35

Humedad relativa	Velocidad del viento	Temperatura de entrada	Temperatura de salida	Diámetro de tubería	Q	N	Longitud
------------------	----------------------	------------------------	-----------------------	---------------------	---	---	----------

45	2	4	21	6	98	5	24
45	2	4	21	8	95	3	33
45	2	4	21	10	92	2	42

45	2	2	12	8	124	3	14
45	2	2	15	8	113	3	20
45	2	2	18	8	102	3	29

45	2	2	12	10	120	2	18
45	2	2	15	10	110	2	26

45	2	2	18	10	99	2	37
----	---	---	----	----	----	---	----

60	2	4	12	8	117	3	14
60	2	4	15	8	106	3	24
60	2	4	18	8	95	3	33

60	2	4	12	10	113	2	19
60	2	4	15	10	103	2	30

60	2	4	18	10	92	2	43
----	---	---	----	----	----	---	----

30	2	4	15	10	103	2	19
45	2	4	15	10	103	2	23

60      2      4      15      10      103      2      30

30	2	4	18	10	92	2	30
----	---	---	----	----	----	---	----

Humedad relativa	Velocidad del viento	Temperatura de entrada	Temperatura de salida	Diámetro de tubería	Q	N	Longitud
------------------	----------------------	------------------------	-----------------------	---------------------	---	---	----------

45      2      4      18      10      92      2      35

60      2      4      18      10      92      2      43

45      0.07      4      15      10      9.35      56      9

45      0.17      4      15      10      18      23      11

45      0.27      4      15      10      26      14      12

45      0.37      4      15      10      33      10      13

45      0.47      4      15      10      39      8      14

45      0.57      4      15      10      45      7      15

45      0.67      4      15      10      50      6      16

45      0.77      4      15      10      55      5      16

45      0.87      4      15      10      60      4      17

45      0.97      4      15      10      65      4      18

45      1      4      15      10      66      4      18

45	1.5	4	15	10	86	2	20
----	-----	---	----	----	----	---	----

45	2	4	15	10	103	2	23
----	---	---	----	----	-----	---	----

30      1      4      15      10      66      4      14

30      1.5      4      15      10      86      3      17

30	2	4	15	10	103	2	19
----	---	---	----	----	-----	---	----

60	1	4	15	10	66	4	23
60	1.5	4	15	10	86	3	27
60	2	4	15	10	103	2	30
30	2	4	21	10	81	2	39
45	2	4	21	10	81	2	48
Humedad relativa	Velocidad del viento	Temperatura de entrada	Temperatura de salida	Diámetro de tubería	Q	N	Longitud
60	2	4	21	10	81	2	54
45	0.5	4	15	10	39	8	15
45	1	4	15	10	61	4	19
45	1.5	4	15	10	78	2	23
45	2	4	15	10	91	2	26
45	2.5	4	15	10	102.63	1	29
45	3	4	15	10	111	1	32
30	0.5	4	15	10	39	8	12
30	1	4	15	10	61	4	15
30	1.5	4	15	10	78	3	18
30	2	4	15	10	91	2	21
30	2.5	4	15	10	102	2	23.5
30	3	4	15	10	111	1	26
60	0.5	4	15	10	39	8	20
60	1	4	15	10	61	4	25
60	1.5	4	15	10	78	3	30
60	2	4	15	10	91	2	34
60	2.5	4	15	10	102	2	38

60	3	4	15	10	111	1	42
----	---	---	----	----	-----	---	----

45      0.5      4      18      10      35      8      23

45      1      4      18      10      55      4      29

45      1.5      4      18      10      70      2      34

Humedad    Velocidad    Temperatura    Temperatura    Diámetro    Q      N      Longitud  
relativa    del viento    de entrada    de salida    de tubería

45	2	4	18	10	91	2	26
----	---	---	----	----	----	---	----

45      2.5      4      18      10      82      2      40

45      3      4      18      10      92      1      44

45	4	4	18	10	113	1	57
----	---	---	----	----	-----	---	----

30      0.5      4      18      10      35      8      19

30      1      4      18      10      55      4      25

30      1.5      4      18      10      70      2.6      30

30      2      4      18      10      82      2      34

30      2.5      4      18      10      92      1.5      38

30	3	4	18	10	100	1	42
----	---	---	----	----	-----	---	----

30	3.5	4	18	10	107	1	46
----	-----	---	----	----	-----	---	----

Tubería de acero de 10 in cédula 40

Conductivad térmica de 43

45      0.5      4      18      10      39      8      21

45      1      4      18      10      64      4      25

45	1.5	4	18	10	85	2	29
----	-----	---	----	----	----	---	----

45	2	4	18	10	103	2	31
----	---	---	----	----	-----	---	----

45	2.5	4	18	10	120	1	34
----	-----	---	----	----	-----	---	----

45      3      4      18      10      134      1      36

45	3.5	4	18	10	148	1	39
45	4	4	18	10	160	1	41
45	4.5	4	18	10	171	1	43
45	5	4	18	10	182	1	45
Humedad relativa	Velocidad del viento	Temperatura de entrada	Temperatura de salida	Diámetro de tubería	Q	N	Longitud
30	5	0	12	6	230	2	12
30	5	0	12	8	218	1	17
30	5	0	12	10	207	1	22
45	2	0	12	8	132	3	13
45	2	0	15	10	117	2	25
45	2	4	15	10	103	2	23
45	2	2	12	10	120	2	18
45	2	2	15	10	110	2	26
60	2	4	12	10	113	2	19
30	2	4	15	10	103	2	19
45	2	4	15	10	103	2	23
30	2	4	18	10	92	2	30
45	1.5	4	15	10	86	2	20
45	2	4	15	10	103	2	23
45	2	4	21	10	81	2	48
45	1.5	4	15	10	78	2	23
45	2	4	15	10	91	2	26
45	3	4	15	10	111	1	32
30	2	4	15	10	91	2	21
30	2.5	4	15	10	102	2	23.5
30	3	4	15	10	111	2	26
60	3	4	15	10	111	1	42

45	2	4	18	10	91	2	26
45	4	4	18	10	113	1	57
30	3	4	18	10	100	1	42
30	3.5	4	18	10	107	1	46
30	5	0	12	10	207	1	22
45	2	0	15	10	117	2	25
45	2	4	15	10	103	2	23
45	2	2	12	10	120	2	18
45	2	2	15	10	110	2	26
30	2	4	15	10	103	2	19
45	1.5	4	15	10	86	2	20
45	1.5	4	15	10	78	2	23
30	2	4	15	10	91	2	21
45	2	4	18	10	91	2	26
30	3	4	18	10	100	1	42



## ANEXO 2 COTIZACIÓN DE SISTEMA ACTIVO



A&C Aire Acondicionado y Refrigeración

EMPRESA	
ATENCIÓN:	SR. EDUARDO HERNANDEZ
MAIL:	
TEL:	984 593 6312
FAX:	

02 de Marzo de 2023
No. C&A/23-4464

Estimado (a): **SR. EDUARDO HERNANDEZ**

En atención a su solicitud, me permito enviarle la cotización correspondiente al suministro de equipo de aire acondicionado según solicitud:

CANT.	UNIDAD	DESCRIPCION	P.U.	TOTAL
1	PZA	<b>MINI SPLIT PISO TECHO FRIO CALOR MCA. YORK INVERTER 5.0 TR 220V R-410a</b> SUMINISTRO DE EQUIPO MINI SPLIT, COMPUESTO POR UNA UNIDAD CONDENSADORA Y UNA UNIDAD EVAPORADORA TIPO PISO TECHO SOLO FRIO DE <b>60,000 Btu/h</b> , DE LA MARCA <b>YORK 220V SISTEMA INVERTER-410a</b> EL EQUIPO CUENTA CON CONTROL REMOTO PARA OPERACION DE UNIDAD EVAPORADORA, EL PRECIO INCLUYE; SOLO SUMINISTRO	67,500.00	67,500.00
1	PZA	<b>INSTALACIÓN FÍSICA DE EQUIPO ANTES DETALLADO</b> INSTALACIÓN FÍSICA DE EQUIPO MINI SPLIT ANTES DETALLADO, EL PRECIO INCLUYE; TUBERIA DE COBRE FORRADA CON AISLAMIENTO TÉRMICO O ARMAFLEX HASTA 5 MTS. DISTANCIA PARA INTERCONEXION DE EVAPORADOR A CONDENSADOR, CABLEADO DE EVAPORADORA Y CONDENSADORA CON CABLE USO RUDO DE 4X14, TUBERIA DE DRENADO CON TUBO DE PVC DE 3/4, RESANES, SOLDADURA DE PLATA, MANO DE OBRA ESPECIALIZADA, HERRAMIENTA, EQUIPO, PRUEBAS DE ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA UNA VEZ QUE EL CLIENTE NOS SUMINISTRA LA ALIMENTACION ELÉCTRICA A PIE DE CONDENSADOR	5,200.00	5,200.00
(OCHENTA Y CUATRO MIL TRESCIENTOS TREINTA Y DOS 00/100 M.N.) <b>PRECIOS SUJETOS A CAMBIO SIN PREVIO AVISO</b>			<b>SOBTOTAL:</b>	72,700.00
			<b>IVA:</b>	11,632.00
			<b>TOTAL:</b>	84,332.00

EMPRESA	
ATENCIÓN:	SR. EDUARDO HERNANDEZ
MAIL:	
TEL:	984 593 6312
FAX:	

02 de Marzo de 2023
No. C&A/23-4464

Estimado (a): **SR. EDUARDO HERNANDEZ**

En atención a su solicitud, me permito enviarle la cotización correspondiente al suministro de equipo de aire acondicionado según solicitud:

CANT.	UNIDAD	DESCRIPCION	P.U.	TOTAL
1	PZA	<b>MINI SPLIT PISO TECHO FRIO CALOR MCA. MIDEA INVERTER 4.0 TR 220V R-410a</b> SUMINISTRO DE EQUIPO MINI SPLIT, COMPUESTO POR UNA UNIDAD CONDENSADORA Y UNA UNIDAD EVAPORADORA TIPO PISO TECHO SOLO FRIO DE <b>48,000 Btu/h</b> , DE LA MARCA <b>MIDEA 220V SISTEMA INVERTER-410a</b> EL EQUIPO CUENTA CON CONTROL REMOTO PARA OPERACION DE UNIDAD EVAPORADORA, EL PRECIO INCLUYE; SOLO SUMINISTRO	55,550.00	55,550.00
1	PZA	<b>INSTALACIÓN FÍSICA DE EQUIPO ANTES DETALLADO</b> INSTALACIÓN FÍSICA DE EQUIPO MINI SPLIT ANTES DETALLADO, EL PRECIO INCLUYE; TUBERIA DE COBRE FORRADA CON AISLAMIENTO TÉRMICO O ARMAFLEX HASTA 5 MTS. DISTANCIA PARA INTERCONEXION DE EVAPORADOR A CONDENSADOR, CABLEADO DE EVAPORADORA Y CONDENSADORA CON CABLE USO RUDO DE 4X14, TUBERIA DE DRENADO CON TUBO DE PVC DE 3/4, RESANES, SOLDADURA DE PLATA, MANO DE OBRA ESPECIALIZADA, HERRAMIENTA, EQUIPO, PRUEBAS DE ARRANQUE Y PUESTA EN MARCHA UNA VEZ QUE EL CLIENTE NOS SUMINISTRA LA ALIMENTACION ELÉCTRICA A PIE DE CONDENSADOR	5,200.00	5,200.00
(SETENTA MIL CUATROCIENTOS SETENTA 00/100 M.N.) <b>PRECIOS SUJETOS A CAMBIO SIN PREVIO AVISO</b>			<b>SOBTOTAL:</b>	60,750.00
			<b>IVA:</b>	9,720.00
			<b>TOTAL:</b>	70,470.00

## ANEXO 2 COTIZACIÓN DE SISTEMA PASIVO

PRODUCTO	DESCRIPCIÓN	REF.	PRECIO UNITARIO	CANTIDAD	TOTAL
	0000000090 Tubería PVC C/A 10 Pulg. (250 mm.) clase 3.5 (unids mts.)	HMR-42	\$ 210.98	+ - 4€	\$ 10,127.04 x
Total productos:					\$ 10,127.04
<p><b>VALES DESCUENTO</b> <input type="text"/> <input type="button" value="OK"/></p> <p><b>IVA NO INCLUIDO</b> <b>COSTOS DE ENVIO SUJETOS A REVISION</b></p>					<p><b>TOTAL</b></p> <p><b>\$ 10,127.04</b></p>



# POTENCIAL DE ENFRIAMIENTO GEOTÉRMICO PARA EDIFICACIONES EN ZONA ÁRIDA

Recibido 14/08/2019  
 Aceptado 12/11/2019

## THE GEOTHERMAL COOLING POTENTIAL FOR BUILDINGS IN ARID ZONES

MARIO CÓNUL

Ingeniero Civil, Docente adjunto e Investigador  
 Universidad Nacional de San Juan - Instituto de Estudios  
 en Arquitectura Ambiental INEA - Consejo Nacional de  
 Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
<https://orcid.org/0000-0001-7981-6683>  
 mcónsul@unjs.edu.ar

SANTIAGO TOSETTI

Doctor en Ingeniería  
 Investigador Instituto de Automática (IAUT)  
 Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
 (CONICET) - Universidad Nacional de San Juan Argentina  
<https://orcid.org/0000-0001-9255-5422>  
 tosetti@gmail.com

ALEJANDRA KURBAN

Doctora en Arquitectura y Urbanismo  
 Docente Titular Facultad de Arquitectura  
 Universidad Nacional de San Juan - Consejo Nacional de  
 Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)  
<https://orcid.org/0000-0002-8795-1129>  
 akurban@unjs.edu.ar

EDUARDO MONTILLA

Arquitecto  
 Docente Titular Facultad de Arquitectura Urbanismo y Diseño  
 Universidad Nacional de San Juan, San Juan, Argentina  
<https://orcid.org/0000-0001-7814-5734>  
 alejo\_montilla@yahoo.com.ar

### RESUMEN

En el presente artículo se analiza cuantitativamente el potencial geotérmico para ser usado como sistema pasivo de refrescamiento edificio en un ambiente árido urbano, tomando como caso de estudio el Área Metropolitana de San Juan (República Argentina). Se utiliza como insumo la base de datos climáticos y meteorológicos correspondiente a la estación verano, obtenida en el Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM) de la Universidad Nacional de San Juan, lugar donde el Instituto de Estudios en Arquitectura Ambiental "Arq. Alberto Papparelli" (INEAA) registra: temperatura del suelo, a distintas profundidades, y parámetros meteorológicos ambientales. Los resultados están relacionados con la identificación de gradientes y profundidades óptimas para el aprovechamiento del recurso como Sistema Pasivo de Refrescamiento Geotérmico, a fin de proveer condiciones de confort higrotérmico en zonas urbanas áridas durante el verano. En promedio, se obtiene una diferencia máxima de 8,7°C entre la temperatura del aire y la de la tierra, a una profundidad de 3m. La longitud de los conductos enterrados necesaria resulta de 64m para una velocidad del aire de 3m/s, la cual se reduce a 27m para una velocidad de aire de 2m/s.

### Palabras clave

arquitectura bioclimática, sistemas pasivos, ahorro energético.

### ABSTRACT

In this article geothermal potential is quantitatively studied to be used as a passive building cooling system in an arid urban environment. The San Juan Metropolitan Area, Argentina is taken as a case study. A climate and weather database for the summer season was used as input. It was generated at the National University of San Juan's Islas Malvinas University Complex (CUIM), where the Arq. Alberto Papparelli Institute for Studies in Environmental Architecture (INEAA) records data on soil temperature at different depths and meteorological parameters in the environment. The results identify gradients and optimal depths to use this resource as a passive geothermal cooling system in order to provide hygrothermal comfort in arid urban zones during the summer. There was an average maximum difference of 8.7 °C between the air temperature and the ground temperature at a depth of 3m. The required length of the buried tubes is 64m for an air speed of 3 m/sec, which decreases to 27m for an air speed of 2m/s.

### Keywords

bioclimatic architecture, passive systems, energy savings

## INTRODUCCIÓN

Los sistemas pasivos de acondicionamiento térmico de viviendas se presentan como una alternativa válida para lograr el confort higrotérmico, en particular para aquellas personas que no pueden acceder al uso de sistemas que utilizan energías convencionales, por su elevado costo. El ahorro energético que se obtendría con la implementación del concepto de arquitectura sustentable concretamente en la planificación y ejecución de viviendas sociales produciría un gran impacto en la demanda de la matriz energética local, ya que se podría usar este ahorro energético en actividades de producción. Al mismo tiempo, se consigue, mediante esta perspectiva, una reducción de las peligrosas emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera (Kurbán, Cúnsulo, Álvarez, Montilla y Ortega, 2015).

La provincia de San Juan, se encuentra localizada en el centro-oeste de la República Argentina (latitud sur 31°32'; longitud oeste 69° 31'), en la diagonal árida Sudamericana. El Área Metropolitana de San Juan (AMSJ), ubicada al suroeste de la provincia; presenta un clima urbano árido (índice Thornthwaite = 0,0794) y continental (Gorczynsky [K]= 34,12). Posee elevadas amplitudes térmicas, tanto diarias como estacionales y anuales (17,3°C), bajos tenores de humedad (promedio anual = 40,92%), régimen estival de escasas precipitaciones (anual = 77,72mm), una elevada radiación solar en todo el año (490W/m<sup>2</sup>), como consecuencia de una nubosidad cada más reducida, y un déficit de agua de 979,28mm. Durante todo el año el viento más frecuente es del sector sur (promedio 7km/h), con ráfagas intensas asociadas a tempestades de polvo, en ocasiones, propias de un cambio de tiempo. En efecto, previo a los cambios de tiempo suele aparecer un viento local denominado "zonda", que constituye un efecto föhn, caracterizado por aire muy deshidratado y tórnido que puede durar desde unas horas hasta varios días (Kurbán et al., 2015).

En suma, la zona de estudio posee recursos que pueden aprovecharse para dar respuestas de confort higrotérmico a la población, al tiempo que comporta una estrategia altamente sustentable al incidir directamente en el ahorro energético y, con ello, en la disminución de la contaminación ambiental (Kurbán et al., 2015; Cabezas, 2013). Siempre que se diseñen sistemas de acondicionamiento térmico de edificios es muy importante que se valide su eficiencia a través de programas de simulación con el propósito de evaluar la pertinencia de su aplicación (Flores Larsen y Lesino, 2001).

Los insumos básicos de diseño de la mayoría de los sistemas pasivos son los registros de temperatura, radiación solar, humedad relativa y vientos; usualmente difíciles de conseguir para áreas urbanas. De ahí la importancia del banco de datos meteorológicos urbanos obtenidos en el INEAA, el cual cuenta con 20 años de registros continuados, lo que permite realizar estudios con datos certeros y confiables.

El uso de sistemas pasivos y/o híbridos para acondicionar el aire que ingresa a los edificios ha ganado creciente aceptación

en los últimos años debido al ahorro económico que se logra en los requerimientos energéticos necesarios para acondicionarlos térmicamente (Flores Larsen, Hernández, Lesino y Salvo, 2001; Bansal, Misra, Agrawal y Mathur, 2010).

No ocurre lo mismo cuando el sistema pasivo es el refrescamiento geotérmico. En San Juan, previo a la realización del proyecto que dio origen al presente artículo, no se contaba con registros de temperatura ni humedad del suelo con objetivos de aprovechamiento pasivo geotérmico. Para realizar algún tipo de estimación del recurso, se recurría a datos extraídos de otras regiones con características climáticas y edáficas generalmente diferentes a esta zona. Esta escasez de datos hacía poco confiables las posibles aplicaciones de una estrategia empleada en otras latitudes con buenos resultados bioclimáticos. Las condiciones de aridez intervienen de manera directa en las propiedades termofísicas de la tierra, por lo que no es válido simplemente extrapolar las aplicaciones a otros ambientes urbanos de contextos geográficos diferentes.

La Tierra se comporta como un gran colector y acumulador de energía. El suelo ostenta muchas propiedades térmicas potencialmente valiosas debido a su alta capacidad calorífica y gran inercia térmica. **Con una densidad media de 1800-2500kg/m<sup>3</sup>, posee un calor específico de 920J/kg°K y una conductividad térmica media de 0.3W/m°K (comparada con 0.58W/m°K para el agua y 380W/m°K para el cobre). La capacidad térmica volumétrica del suelo es de alrededor de 2MJ/m<sup>3</sup>°K comparada con 4.5MJ/m<sup>3</sup>°K del agua (Iannelli y Gil, 2012).** Por otra parte, su baja conductividad térmica hace que la penetración del calor en el suelo sea muy lenta, al igual que su enfriamiento (Xamán et al., 2014, Ahmed, Ip, Miller y Gidado, 2009).

Las propiedades térmicas del suelo hacen que las variaciones diurnas de la temperatura no penetren más allá de 0,5m, pero las variaciones anuales de temperatura, llegan hasta una profundidad de unos 4m. Más allá de estas profundidades, la temperatura de la tierra se mantiene constante todo el año (Iannelli et al., 2013).

La sistematización del aprovechamiento geotérmico puede realizarse utilizando el fluido aire para la transferencia térmica. En ese caso, se emplean tubos enterrados cuya función es la climatización estival o invernal del aire de ventilación. El sistema consiste en hacer circular aire desde el exterior al interior del edificio a través de conductos bajo tierra, que son los que permiten el intercambio de calor (Vidal y Vidal, 2011, Bisoniyya T. 2015, Tiwari, Singh, Joshi, Shyam y Prabhakant, 2014).

Según Hollmuller y Lachal (2005), la temperatura interior que se obtiene aprovechando el potencial geotérmico es de 15°C en cualquier parte del mundo, de día o de noche, en invierno o en verano, pero estos autores no especifican la profundidad de la tubería.

Un estudio realizado en Asunción (Cohenca, Bordas y Schwartzman, 2013) indica que, a una profundidad del orden de 3,5m, se produce una estabilización de la temperatura del suelo en torno de los 23,5°C. En verano, la temperatura media ambiental es de 28,4°C siendo ésta apreciablemente superior a la media del suelo.

Investigaciones realizadas en Kusuda (EE.UU.) en 1965 determinaron que la temperatura a una profundidad mayor a 2m ya no presenta variabilidad y corresponde a la media de la temperatura anual (Baver, Gardner y Gardner, 1991).

En climas cálidos, la temperatura del suelo en verano es más fría que la temperatura exterior nocturna, pero aún muy cálida para producir un enfriamiento efectivo edilicio. Por tanto, es necesario enfriar el suelo por debajo de su temperatura natural.

Una de las experiencias llevadas a cabo en zonas de clima cálido y árido, como es el caso de San Juan, es la de Neguev (Israel). Por las características desérticas de la región, en la Universidad Ben Gurion, Sede Boquer, se experimentó cubriendo el suelo con 10cm de una capa de áridos, la cual era mojada muy temprano en la mañana. La condición fue que el suelo no fuera arenoso, a fin de que retuviera la humedad. El monitoreo consideró 10cm, 30cm y 60cm de espesor. Desde el comienzo del regado de la capa de áridos hasta que el suelo registró un equilibrio térmico, pasó aproximadamente una semana; equilibrio que se tornó continuo, siempre que no cesara el regado. Si esto último ocurría, en 5 días aumentaba la temperatura (Givoni, 1984).

Para Hazim Zaki, Al-musaed y Khalil (2005), los diseños de tubos enterrados exhiben una variada combinación en tamaño y forma: algunos sistemas tienen tubos en paralelo que terminan en una cabecera, otros presentan un prototipo radial de recolección en un sumidero central (para facilitar la eliminación de humedad) y, en otros casos, se trata sólo de un tubo. Sostienen, además, que es importante diseñar el sistema para reducir al mínimo el costo y maximizar los beneficios, y, por otra parte, que la longitud de un tubo de más de 10m, por ejemplo, es ineficiente.

De igual forma, los tubos de diámetro pequeño son más eficaces por unidad que los tubos grandes y deben colocarse lo más profundamente posible, aunque no se registra especificaciones sobre dicha profundidad (De Paepe y Janssens, 2003; Rouag, Benchabane y Mehdid, 2018).

#### ADQUISICIÓN DE DATOS

A efectos de evaluar el real potencial de enfriamiento del sistema geotérmico en una zona árida y ante tanta disparidad de valores en la bibliografía específica, en el INEAA se está desarrollando una investigación con medición de valores de temperatura y humedad *in situ*. Desde diciembre de 2018 se registran valores de temperatura y humedad del



Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: Pitaluga et al, 2019, p. 4.

subsuelo en un área suburbana de San Juan (Rivadavia-San Juan), en simultáneo con mediciones de parámetros ambientales.

El sector en estudio (Figura 1) se ubica en el Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), complejo que congrega a varias facultades dependientes de la UNSJ. Geográficamente, se encuentra en el departamento de Rivadavia, situado al oeste de la ciudad capital de San Juan (Figura 1).

Con el fin de identificar los suelos presentes en el sector de estudio y reconocer las principales características y cualidades que permitan entender su origen, conocer sus propiedades físicas y químicas y poder clasificarlos taxonómicamente, se realizó un estudio (Pitaluga, Ocaña y Cortez, 2019) cuyos objetivos específicos fueron:

- Caracterización edafológica del sector a analizar
- Determinación de propiedades físicas de los suelos
- Muestreo para caracterización de propiedades en laboratorio
- Clasificación taxonómica de los suelos presentes

El sitio de observación se encuentra en la porción proximal del mega-abanico de Tulúm, geoforma desarrollada en el denominado valle de Tulúm, que corresponde a una depresión intermontana de origen tectónico, rellena con centenares de metros de depósitos fluviales de

Un estudio realizado en Asunción (Cohenca, Bordas y Schwartzman, 2013) indica que, a una profundidad del orden de 3,5m, se produce una estabilización de la temperatura del suelo en torno de los 23,5°C. En verano, la temperatura media ambiental es de 28,4°C siendo ésta apreciablemente superior a la media del suelo.

Investigaciones realizadas en Kusuda (EE.UU.) en 1965 determinaron que la temperatura a una profundidad mayor a 2m ya no presenta variabilidad y corresponde a la media de la temperatura anual (Baver, Gardner y Gardner, 1991).

En climas cálidos, la temperatura del suelo en verano es más fría que la temperatura exterior nocturna, pero aún muy cálida para producir un enfriamiento efectivo edilicio. Por tanto, es necesario enfriar el suelo por debajo de su temperatura natural.

Una de las experiencias llevadas a cabo en zonas de clima cálido y árido, como es el caso de San Juan, es la de Neguev (Israel). Por las características desérticas de la región, en la Universidad Ben Gurion, Sede Boquer, se experimentó cubriendo el suelo con 10cm de una capa de áridos, la cual era mojada muy temprano en la mañana. La condición fue que el suelo no fuera arenoso, a fin de que retuviera la humedad. El monitoreo consideró 10cm, 30cm y 60cm de espesor. Desde el comienzo del regado de la capa de áridos hasta que el suelo registró un equilibrio térmico, pasó aproximadamente una semana; equilibrio que se tornó continuo, siempre que no cesara el regado. Si esto último ocurría, en 5 días aumentaba la temperatura (Givoni, 1984).

Para Hazim Zaki, Al-musaed y Khalil (2005), los diseños de tubos enterrados exhiben una variada combinación en tamaño y forma: algunos sistemas tienen tubos en paralelo que terminan en una cabecera, otros presentan un prototipo radial de recolección en un sumidero central (para facilitar la eliminación de humedad) y, en otros casos, se trata sólo de un tubo. Sostienen, además, que es importante diseñar el sistema para reducir al mínimo el costo y maximizar los beneficios, y, por otra parte, que la longitud de un tubo de más de 10m, por ejemplo, es ineficiente.

De igual forma, los tubos de diámetro pequeño son más eficaces por unidad que los tubos grandes y deben colocarse lo más profundamente posible, aunque no se registra especificaciones sobre dicha profundidad (De Paepe y Janssens, 2003; Rouag, Benchabane y Mehdid, 2018).

#### ADQUISICIÓN DE DATOS

A efectos de evaluar el real potencial de enfriamiento del sistema geotérmico en una zona árida y ante tanta disparidad de valores en la bibliografía específica, en el INEAA se está desarrollando una investigación con medición de valores de temperatura y humedad *in situ*. Desde diciembre de 2018 se registran valores de temperatura y humedad del



Figura 1. Ubicación del área de estudio. Fuente: Pittaluga et al, 2019, p. 4.

subsuelo en un área suburbana de San Juan (Rivadavia-San Juan), en simultáneo con mediciones de parámetros ambientales.

El sector en estudio (Figura 1) se ubica en el Complejo Universitario Islas Malvinas (CUIM) de la Universidad Nacional de San Juan (UNSJ), complejo que congrega a varias facultades dependientes de la UNSJ. Geográficamente, se encuentra en el departamento de Rivadavia, situado al oeste de la ciudad capital de San Juan (Figura 1).

Con el fin de identificar los suelos presentes en el sector de estudio y reconocer las principales características y cualidades que permitan entender su origen, conocer sus propiedades físicas y químicas y poder clasificarlos taxonómicamente, se realizó un estudio (Pittaluga, Ocaña y Cortez, 2019) cuyos objetivos específicos fueron:

- Caracterización edafológica del sector a analizar
- Determinación de propiedades físicas de los suelos
- Muestreo para caracterización de propiedades en laboratorio
- Clasificación taxonómica de los suelos presentes

El sitio de observación se encuentra en la porción proximal del mega-abanico de Tulúm, geoforma desarrollada en el denominado valle de Tulúm, que corresponde a una depresión intermontana de origen tectónico, rellena con centenares de metros de depósitos fluviales de



Figura 2. a) Estación meteorológica, b) Calibración, c) Colocación de termocuplas en el terreno. Fuente: Elaboración de los autores.

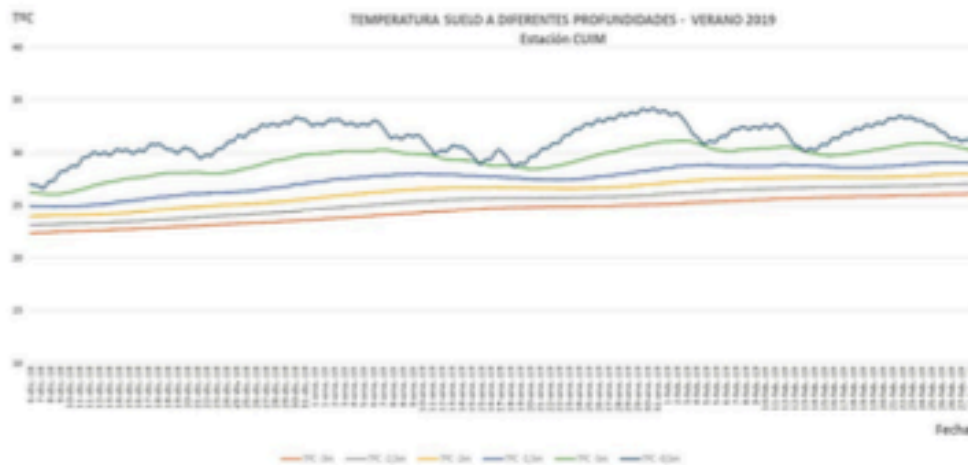


Figura 3. Temperaturas del aire y del suelo a distintas profundidades Fuente: Elaboración de los autores.

edad cuaternaria. Las muestras analizadas presentan una estructura en bloques relativamente grandes que indican que el suelo resiste a la penetración y al movimiento del agua. El tamaño promedio de los agregados individuales se puede clasificar como grueso a muy grueso y el grado de desarrollo es *muy fuerte*. Con el análisis de pH, las capas seleccionadas evidencian, asimismo, valores que oscilan entre 6.67 y 8.03, a partir de los cuales es posible clasificar al suelo como *moderadamente básico a neutro*. Los escasos contenidos de materia orgánica en las muestras indican la presencia de un suelo joven, desarrollado en climas secos y cálidos, derivados de materiales con texturas gruesas.

Para las mediciones geotérmicas se instalaron pares de termocuplas desde 0,50m hasta 3,00m de profundidad (Figura 2 c), con un intervalo de 0,50m y un sensor de humedad a una profundidad de 1,5m. La información se

almacenó en una tarjeta SIM colocada en el dispositivo electrónico de control que recibía la señal de los sensores enterrados. A esta información se accedió periódicamente con una notebook, la que fue complementada con los registros de una estación meteorológica automática (Figura 2 a y b), que mide temperatura y humedad relativa del aire, radiación solar, precipitaciones y presión atmosférica, entre otras variables. Los registros de ambos sistemas se realizan con intervalos de 1 hora.

## PROCESAMIENTO DE DATOS DE TEMPERATURA

La información meteorológica recabada se procesó para obtener las condiciones propias del verano, considerando el período comprendido entre los meses de diciembre de

HORA	-3m	-2,5m	-2m	-1,5m	-1m	-0,5m	EXT	Dif. Aire/Suelo(-3m)
0	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,5	27,2	2,8
1	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,5	26,3	2,0
2	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	25,6	1,2
3	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	24,9	0,5
4	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	24,1	-0,3
5	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	23,3	-1,1
6	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	22,7	-1,7
7	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	22,3	-2,1
8	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	23,5	-0,9
9	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	25,1	0,7
10	24,4	25,4	26,4	27,6	29,5	31,7	26,4	2,0
11	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	27,7	3,3
12	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,7	29,0	4,6
13	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	30,3	5,9
14	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	31,3	6,9
15	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	32,2	7,8
16	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	32,8	8,4
17	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	33,1	8,7
18	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	33,1	8,7
19	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	32,7	8,3
20	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	31,6	7,2
21	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	30,3	5,9
22	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	29,2	4,8
23	24,4	25,3	26,4	27,6	29,5	31,5	28,2	3,8
PROMEDIO	24,4	25,3	26,3	27,6	29,5	31,6	28,0	3,6

Tabla 1. Valores de temperaturas promedio horarias para verano. Fuente: Elaboración de los autores.

2018, enero y febrero de 2019. Se promediaron los pares de registros horarios a igual profundidad y, posteriormente, los 60 valores correspondientes a cada hora del día, obteniéndose así un registro para cada hora del día promedio de verano. En la Figura 3 se exponen la temperatura ambiente y las registradas a distintas profundidades de suelo, en el período considerado.

Los valores promedio para cada hora del período estudiado se muestran en la Tabla 1.

En la Figura 4 se grafican los promedios horarios estacionales para verano de las variaciones de temperatura del aire y del suelo a distintas profundidades.

Si bien hasta el presente la cantidad de registros en el CUIM es escasa (7 meses), las mediciones realizadas no confirman

las estimaciones de Hollmuller y Lachal (2005), según las cuales, en cualquier parte del mundo, de día o de noche, en invierno o en verano se tienen temperaturas del suelo de 15°C. En cambio, se acercan en mayor medida a lo sostenido por Bayer et al., (1991), quienes establecen que la temperatura a una profundidad de 2m corresponde a la media de la temperatura anual. Al respecto, y como indica la estadística del clima urbano del Área Metropolitana de San Juan (Ortega, Montilla y Cúnsulo, 2013), la temperatura a 2m de profundidad es de 21.07°C.

Para Iannelli et al. (2013), las propiedades térmicas del suelo hacen que las variaciones diurnas de la temperatura no penetren más allá de 0,5m, pero las variaciones anuales de temperatura llegan hasta una profundidad de unos 4m. Más allá de estas profundidades, la temperatura de la tierra se mantiene constante todo el año. Su valor es



aproximadamente  $1,7^{\circ}\text{C}$  mayor que el valor medio de la temperatura anual del aire en superficie. No obstante, se observa que las temperaturas registradas por los sensores instalados en el CUIM muestran valores superiores a los indicados por esa bibliografía.

Con los valores de temperatura del suelo obtenidos, se elaboraron dos gráficos que muestran el perfil de esa variable climática en las horas de máxima y mínima exterior (07h y 17h). Estos se presentan en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

## APLICACIÓN DEL SISTEMA GEOTÉRMICO EN LA CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA SOCIAL

A efectos de diseñar el sistema de refrescamiento geotérmico, aplicándolo a una vivienda bioclimática de tres dormitorios de interés social (Kurbán, Cúnsulo, Matar, Ripoll y Ortega, 2017), se parte del cálculo del caudal necesario para climatizar el volumen de la vivienda, el cual

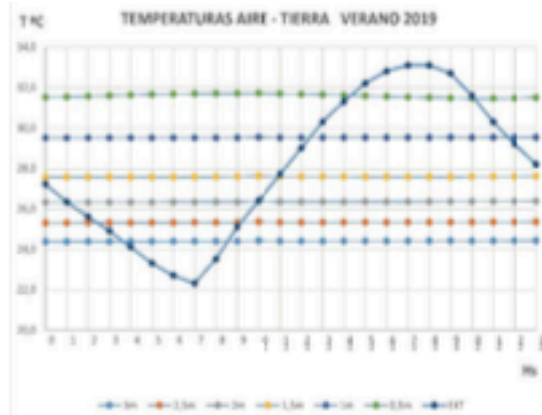


Figura 4. Temperaturas del subsuelo a distintas profundidades. Fuente: Elaboración de los autores.

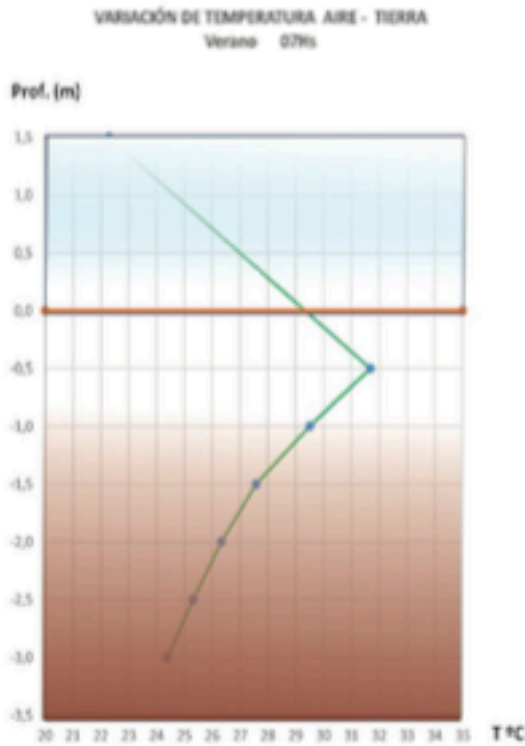


Figura 5. Perfil de temperatura del aire y del suelo a las 07 h. Fuente: Elaboración de los autores.

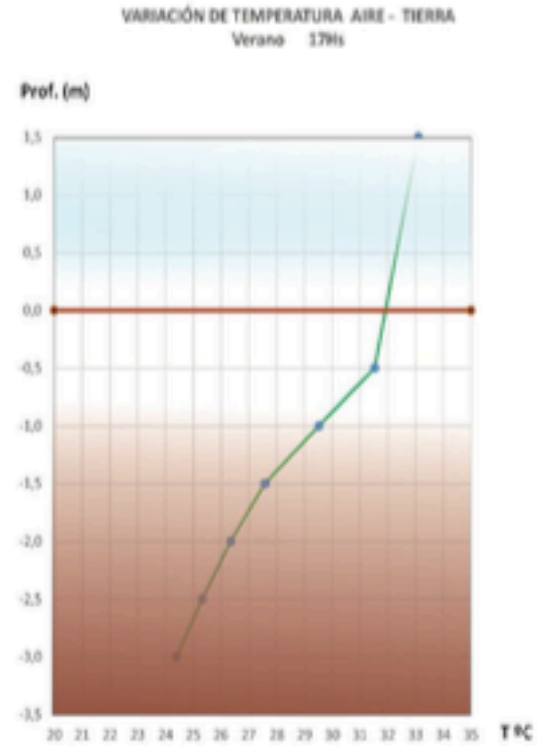


Figura 6. Perfil de temperatura del aire y del suelo a las 17 h. Fuente: Elaboración propia.

aproximadamente 1,7°C mayor que el valor medio de la temperatura anual del aire en superficie. No obstante, se observa que las temperaturas registradas por los sensores instalados en el CUIM muestran valores superiores a los indicados por esa bibliografía.

Con los valores de temperatura del suelo obtenidos, se elaboraron dos gráficos que muestran el perfil de esa variable climática en las horas de máxima y mínima exterior (07h y 17h). Estos se presentan en las Figuras 5 y 6, respectivamente.

## APLICACIÓN DEL SISTEMA GEOTÉRMICO EN LA CLIMATIZACIÓN DE UNA VIVIENDA SOCIAL

A efectos de diseñar el sistema de refrescamiento geotérmico, aplicándolo a una vivienda bioclimática de tres dormitorios de interés social (Kurbán, Cúnsulo, Matar, Ripoll y Ortega, 2017), se parte del cálculo del caudal necesario para climatizar el volumen de la vivienda, el cual

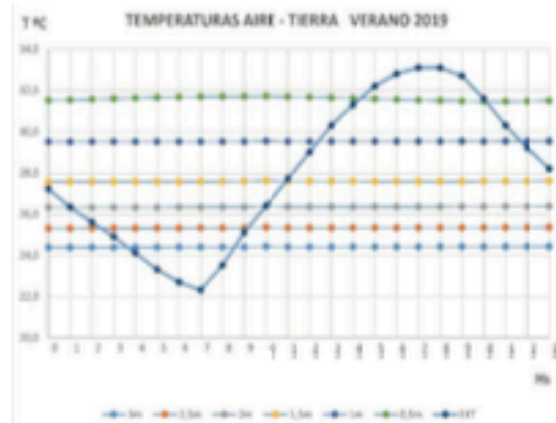


Figura 4. Temperaturas del subsuelo a distintas profundidades. Fuente: Elaboración de los autores.

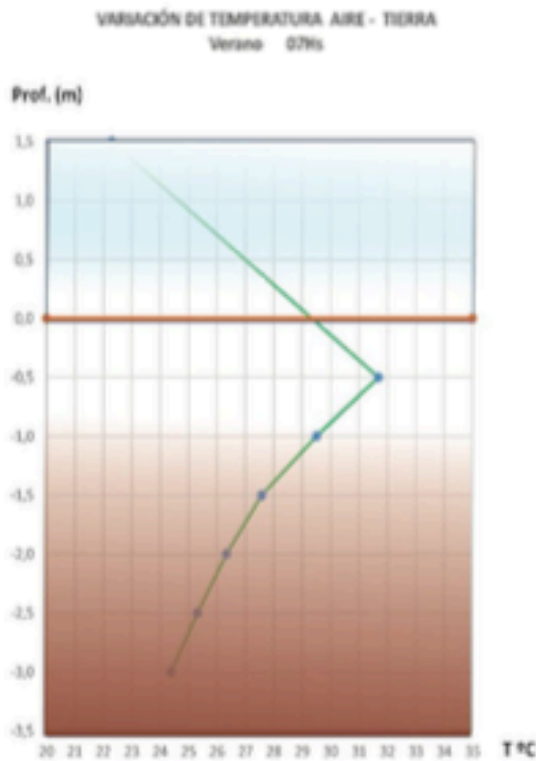


Figura 5. Perfil de temperatura del aire y del suelo a las 07 h. Fuente: Elaboración de los autores.

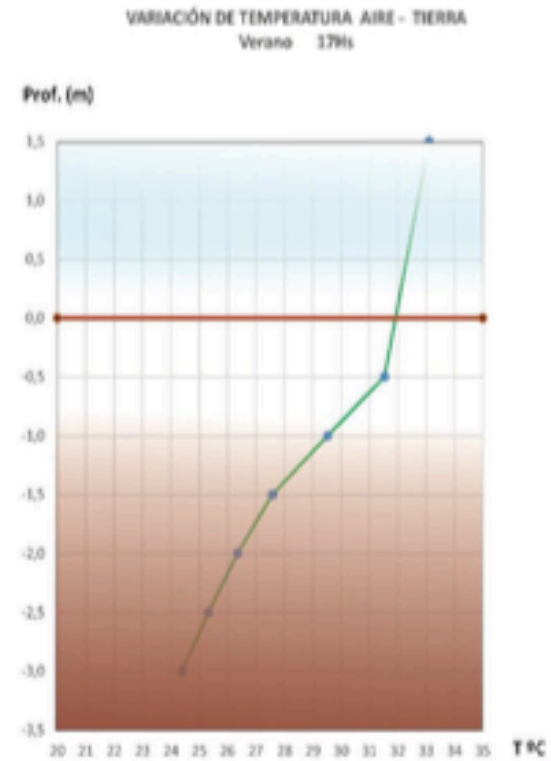


Figura 6. Perfil de temperatura del aire y del suelo a las 17 h. Fuente: Elaboración propia.

fue de 212m<sup>3</sup>/h. Inicialmente, se considera una velocidad de 3m/s dentro del conducto de PVC de 200mm de diámetro y 5,9mm de espesor de pared, con una conductividad térmica = 0.17W/m<sup>2</sup>K.

El caudal de aire que pasa por cada ducto está dado por la siguiente expresión:

$$q_t = A \cdot v = \pi 0.1^2 m^2 \cdot 3 \frac{m}{s} = 0.09 \frac{m^3}{s} = 325 m^3/h$$

Donde

(m<sup>2</sup>) es el área del ducto y (m/s) es la velocidad del aire en el ducto.

Con este valor se calcula la cantidad de ductos necesarios en función del caudal necesario y del disponible, de acuerdo a la sección del ducto seleccionado. Se redondea al entero superior.

$$n = \frac{q_r}{q_t} = \frac{212 m^3/h}{325 m^3/h} = 0.65 \rightarrow n = 1$$

Es decir que con un solo tubo alcanza para cubrir la demanda de aire. Con este valor, se calcula la longitud de la tubería en función de la temperatura interior deseada (25°C), del aire de entrada (33,15°C) y de la del terreno a 3m de profundidad (24.4°C).

Para determinar la superficie de intercambio de calor y la longitud de la tubería, es necesario calcular la temperatura media dentro del conducto  $T_{ma}$ .

$$T_{ma} = \frac{(T_{ae} + T_{as})}{2} = \frac{33.15^\circ C + 25^\circ C}{2} = 29^\circ C$$

Siendo  $T_{ae}$  la temperatura a la entrada del ducto (°C) y  $T_{as}$  la temperatura a la salida.

A fin de evaluar el intercambio de calor entre el suelo y el aire que circula, se calcula la resistencia térmica (m<sup>2</sup>C/W) del conducto, la cual está dada por la resistencia de conducción  $R_{cond}$  y la resistencia de convección  $R_{conv}$ .

$$R = R_{cond} + R_{conv}$$

Para definir la  $R_{cond}$ , se tiene en cuenta el espesor de la pared del ducto (e=0.0059m) y la conductividad térmica ( $\lambda$  = 0.17W/m<sup>2</sup>K)

$$R_{cond} = \frac{e}{\lambda} = \frac{0.0059}{0.17} = 0.035 m^2 K/W$$

La resistencia por convección  $R_{conv}$ , es función de la velocidad del aire, v(m/s) está dada por la expresión:

$$R_{conv} = \frac{1}{5.55 v^{0.8}} = \frac{1}{5.55 \cdot 3^{0.8}} = 0.075 m^2 K/W$$

En consecuencia,

$$R = R_{cond} + R_{conv} = 0.035 + 0.075 = 0.11 m^2 K/W$$

El flujo de calor medio por unidad de superficie (W/m<sup>2</sup>) es proporcional a la diferencia de temperatura entre el suelo y el interior del ducto e inversamente proporcional a la resistencia térmica de la pared del ducto.

$$T_{suelo} = 29^\circ C = 302^\circ K$$

$$T_{ducto} = 24^\circ C = 297^\circ K$$

$$R = 0.11 m^2 K/W$$

$$\phi_m = \frac{(T_{suelo} - T_{ducto})}{R} = \frac{302^\circ K - 297^\circ K}{0.11 m^2 K/W} = 45.5 W/m^2$$

La energía que es necesaria extraer del aire dentro del ducto es (Ws/m<sup>3</sup>) y está dada por la fórmula:

$$E_e = \left(\frac{i}{V_e}\right)_{entrada} - \left(\frac{i}{V_e}\right)_{salida}$$

Siendo:

i: Entalpia del Aire Seco

$V_e$ : Volumen Especifico del Aire

De la carta psicométrica, que considera una humedad relativa del 35%, se obtienen los valores de i y  $V_e$  a la entrada y a la salida, contemplando las temperaturas de aire a la entrada y salida, respectivamente.

Temperatura Aire de Entrada ( $T_{ae}$ ) = 33.15°C

Humedad Relativa = 35%

De la carta psicométrica, se obtiene entonces:

Entalpia del Aire Seco i = 62kJ/Kg

Volumen Especifico del Aire  $V_e$  = 0.88m<sup>3</sup>/Kg

Temperatura Aire de Salida ) = 25°C

Humedad Relativa = 35%

De la carta psicométrica, se obtiene entonces:

Entalpia del Aire Seco i = 42.5kJ/Kg

Volumen Especifico del Aire  $V_e$  = 0.85m<sup>3</sup>/Kg

Reemplazando los valores en la fórmula anterior, se obtiene:

$$E_e = \left(\frac{i}{V_e}\right)_{entrada} - \left(\frac{i}{V_e}\right)_{salida} = \left(\frac{62 kJ/kg}{0.88 m^3/kg}\right)_{33.15^\circ C} - \left(\frac{42.5 kJ/kg}{0.85 m^3/kg}\right)_{25^\circ C} =$$

$$E_e = 20.45 \frac{kJ}{m^3} = 20450 Ws/m^3$$

El área de intercambio necesaria  $S(m^2)$  resulta:

$$S = (E_e + q_e) / \phi_m = \frac{(20450 W/m^2 + 0.09 m^2/s)}{45.5 W/m^2} = 40.45 m^2$$

Para calcular la longitud del ducto, resta dividir la superficie de intercambio, teniendo en cuenta el diámetro ( $D$ ) de los caños.

$$L = \frac{S}{\pi D} = \frac{40.45 m^2}{\pi 0.2 m} = 64.3 m \approx 64 m$$

Si se baja la velocidad del aire a 2m/s, el caudal de aire que circularía por los ductos sería de 0.06m<sup>3</sup>/s, y la longitud de los ductos podría reducirse a 27m.

## CONCLUSIONES

El sistema de enfriamiento geotérmico es una buena alternativa a considerar para el acondicionamiento térmico de verano, especialmente en las horas en que la temperatura del aire exterior es de 35°C o más, ya que se consigue un salto térmico de 11°C. A esto se le debe agregar el efecto de refrescamiento que produce la ventilación por el movimiento del aire impulsada desde los ductos (Neilla F., Bedoya C. (2001).

El sistema no es efectivo en algunas horas, sobre todo en las nocturnas, cuando la temperatura del aire exterior es más baja que la del suelo a 3m de profundidad. En estos casos, la estrategia de ventilación nocturna es más efectiva, a causa del refrescamiento.

La temperatura a 3m de profundidad en verano resulta aproximadamente 3°C más elevada que el promedio anual de temperatura del aire, con las características del suelo presente en el lugar de las mediciones. Esto puede variar en presencia de otro tipo de suelo, lo cual deberá validarse mediante estudios de campo.

La temperatura del suelo presenta una tendencia a seguir decreciendo en función de la profundidad, más allá de los 3m con el tipo de suelo analizado. En consecuencia, se podría obtener un mayor salto térmico enterrando la tubería a mayor profundidad, pero se debería estudiar el mayor sobrecosto a fin de evaluar su factibilidad y el tiempo de amortización.

A partir de los valores hallados, se puede afirmar que la implementación de un sistema geotérmico para refrescamiento edilicio resulta altamente beneficiosa desde el punto de vista del confort térmico de los habitantes y contribuye a generar importantes ahorros de dinero en climatización edilicia, es decir, colabora con la sustentabilidad del hábitat humano.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ahmed, A., Ip, K., Miller, A. y Gidado, K. (2009). Thermal performance of earth-air heat exchanger for reducing cooling energy demand of office buildings in the United Kingdom. En *Eleventh International IBPSA Conference, Glasgow, Scotland, July 27-30, 2009*.
- Bansal, V., Misra, R., Agrawal, G.D. y Mathur, J. (2010). Performance analysis of earth-pipe-air heat exchanger for summer cooling. *Energy and Buildings*, 42 (5), 645-648.
- Baver, L., Gardner, W. y Gardner, W. (1991). *Física de suelos*. Primera ed. México: Grupo Noriega.
- Bisoniya, T. (2015). Design of earth-air heat exchanger system. *Geothermal Energy*, 3(18). DOI 10.1186/s40517-015-0036-2
- Cabezas, A. (2013). Eficiencia energética a través de utilización de pozos canadienses con el análisis de datos de un caso real "Casa Pomaret". Tesina final de Master en Edificación, Universidad Politécnica de Catalunya – UPC, Barcelona.
- Cohenca, D., Bordas, M., Schwartzman, D. (2013). Caracterización de las propiedades térmicas del suelo – Campus universitario San Lorenzo –Paraguay. En *Acta de la XXXVI Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente*. Vol. 1 (pp. 08.43-08.52). Salta: ASADES.
- De Paepe, M. y Janssens, A. (2003). Thermo-hydraulic design of earth-air heat exchangers. *Energy and Buildings*, 35(4), 389-397.
- Flores Larsen, S., Hernández, A., Lesino, G. y Salvo, N. (2001). Measurement and simulation of the thermal behavior of a massive building with passive solar conditioning. En *Proceedings of VII International Building Simulation Congress* (pp. 183-190), Rio de Janeiro, Brazil.
- Flores Larsen, S. y Lesino, G. (2001). Modelización de intercambiadores tierra-aire para acondicionamiento térmico de edificios. En *Actas del 8º Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia (LATCYM 2001)*, México.
- Givoni, B. (1984). Curso Extensivo "Acondicionamiento térmico para edificios en verano, mediante energías naturales". Mendoza (5 al 28 de mayo).
- Hazim Zaki, H., Al-musaed, A. y Khalil, A. (2005). En *Thermal earth inertia such a source of energy for bio-sustainable house. The 2005 World Sustainable Building Conference*, Tokyo.
- Hollmuller, P. y Lachal, B. (2005). *Buried pipe systems with sensible and latent heat. Exchange validation of numerical simulation against analytical solution and long-term monitoring*. Montreal: Escuela Politécnica de Montreal.
- Iannelli, L., Bezzo, E., Bermejo, A., Cozza, P., Fiora, J., Niño, J., Prieto, R., Romero P., Gil S. (2013). La tierra como acondicionador natural de ambientes. En *Primer Encuentro Latinoamericano de Uso Racional y Eficiente de la Energía* (25-27 septiembre 2013), Universidad de Buenos Aires (UBA), Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería



**DR. MOISES MONTIEL GONZÁLEZ**  
**DR. MARIO LIMON MENDOZA**  
**DR. JOSE GERARDO VERA DIMAS**  
**MTRO. FRANCISCO JAVIER BECERRA GONZALEZ**  
**ING. SERGIO RENE PEDRAL MONSALVO**  
**P R E S E N T E**

## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT  
SGC Certificada en la norma ISO 9001:2015

FORMA T-4A  
NOMBRAMIENTO COMITÉ REVISOR

Cuernavaca, Mor., a 13 de junio del 2023

Me permito comunicarles que han sido designados integrantes del **COMITÉ REVISOR** del trabajo de:  
**TESIS**  
Titulado:

### **DESARROLLO Y CARACTERIZACIÓN DE UN SISTEMA DE CALEFACCIÓN PASIVO, COMO SOLUCIÓN A LA ALTA DEMANDA ENERGÉTICA**

Que presenta (el) o (la) **C. EDUARDO ARTURO HERNÁNDEZ CAMPOS**

Director de tesis: **DR. MOISES MONTIEL GONZALEZ**

Para obtener el grado académico de: **INGENIERO MECÁNICO**

**A T E N T A M E N T E**  
Por una humanidad culta

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ DIRECTORA**

Se anexa firma electrónica

### **D I C T A M E N**

**DRA. VIRIDIANA AYDEÉ LEÓN HERNÁNDEZ DIRECTORA DE LA FCQeI**  
**P R E S E N T E**

En respuesta a su amable solicitud para emitir DICTÁMEN sobre el trabajo que se menciona, me permito informarle que nuestro voto es:

<b>VOTO</b>	<b>NOMBRE</b>	<b>FIRMA</b>
<b>APROBATORIO</b>	<b>DR. MOISES MONTIEL GONZÁLEZ</b>	
<b>APROBATORIO</b>	<b>DR. MARIO LIMON MENDOZA</b>	
<b>APROBATORIO</b>	<b>DR. JOSE GERARDO VERA DIMAS</b>	
<b>APROBATORIO</b>	<b>MTRO. FRANCISCO JAVIER BECERRA GONZALEZ</b>	
<b>APROBATORIO</b>	<b>ING. SERGIO RENE PEDRAL MONSALVO</b>	

El voto del comité es aprobatorio, se anexan firmas electrónicas

Av. Universidad 1001 Col. Chamilpa, Cuernavaca Morelos, México, 62209,  
Tel. (777) 329 70,00, Ext. 7039/ fcqei@uaem.mx





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS



Facultad de Ciencias  
Químicas e Ingeniería



## FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS e INGENIERÍA

Programas educativos de calidad reconocidos por CIEES, CACEI y CONACYT  
SGC Certificada en la norma ISO 9001:2015

---



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**VIRIDIANA AYDEE LEON HERNANDEZ** | Fecha:2023-06-14 14:05:07 | Firmante

C2x8MsxUkAfScpJEogS5kdjbsrwx8WmlRLbq2s2z9EqABjcbmSx1ljkNDw4KSo3SIQxNwu7YBRcqI0pi+dAwh3EqQhy6aSLBLPIVUcrGBEtSdoguPfdWAh8tArQ/jGd/wfyDxvMmS  
PhbPFGxal1GVFQocmc+ki6798IXJDy9gFQtJF6HSiOZf0MvFVtOFAAhuF3jMvSzl/dwRs2nBTW7mBWYWS9+ZKpfuyc196Yp29brdN7QaRhyhBSs9GedUlx5G7qFxi69eJjatQn6j4  
V41VhkzjATQjzblPfwavGIVWhumpHh+cLMxoX+ArbmEJ1CJLHTCYBx95plLYvrsUjg==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o  
escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



[Cb2Y7kFdT](#)

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/8FRYEql0ECrx9Hqi1OAXTj09FyOHOpZD>





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL  
ESTADO DE MORELOS

Se expide el presente documento firmado electrónicamente de conformidad con el ACUERDO GENERAL PARA LA CONTINUIDAD DEL FUNCIONAMIENTO DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MORELOS DURANTE LA EMERGENCIA SANITARIA PROVOCADA POR EL VIRUS SARS-COV2 (COVID-19) emitido el 27 de abril del 2020.

El presente documento cuenta con la firma electrónica UAEM del funcionario universitario competente, amparada por un certificado vigente a la fecha de su elaboración y es válido de conformidad con los LINEAMIENTOS EN MATERIA DE FIRMA ELECTRÓNICA PARA LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ESTADO DE MORELOS emitidos el 13 de noviembre del 2019 mediante circular No. 32.

### Sello electrónico

**FRANCISCO JAVIER BECERRA GONZALEZ** | Fecha:2023-06-19 17:08:17 | Firmante

hu4tU9Pr6nIYPuElrIlgGAEbKx9RERyB1WPFrrOqUNimekqLjRFGJ8+jPnGMNLoZeticnzX6+TEc7ACJsqldHo4fEg+d/RNVcNuyXgJF5yd8S6Q+HvZMurasUkf64pmr6sYdbURkm feYoA7xFzPma+dWcxSo+1knFjTdnLnp7iMY2xYxMCimBAIHnpRo0VS1/OfnJPVj8BpUvh/R6HaJvHKQaU8i5Mx2E3tlm8iYfJsFIPr1Rz2dqXpXnSDVTXVs48E1cNSiV0KMTVefaq Z9SSf/VeZfVaKfYkHUVjhm6ktH4iP3KSpjDKUsSL17DcH7qpULVnvolajA/AW0xshLw==

**MARIO LIMON MENDOZA** | Fecha:2023-06-19 17:55:41 | Firmante

dzS1p7bT7k9tgZv065uyIwNeAYPaitun1zySJJRIHfngEdIs5qzw0KLD2Z2x4eFqV/oiUCWpkEDFRvgGnEFP57j+If9XZUXgLDN2ZpCB+MD8KffNln+AUeKgeIqpPotlR664ftSO40E yj4aHGbar49PqQZzZpgL/V9Q9QcmBmZyPgXHRH3dnYCW3HKIYqXh4lkOI0+CMFIPpETHrxGMDMJ4/WkBs56H7lLm8AixFiKEZyrygELP6P2KJhRPi4kM85LGNPzlgKr0L661Vv eJPwcoRqQkhZDvGiuQp5MDUpYFesSMQdhCA11ooAaVmht8ISDS0N0EH11OhdKK1Aw==

**SERGIO RENE PEDRAL MONSALVO** | Fecha:2023-06-20 15:17:42 | Firmante

Eg7OiTNVbslqy/u3qx61Scb1IZ/bc4K6qK6X8GayAFC1mF7LOyCiua1trasA6olQXWCLnv+HhnmjS8A4gu10Uzv+KIXkO1r2QNQSG8vogLy6ymgps9BnzBR2pJfiA0ojZiCxdd7IOk jg5TrC3U36uWDDOwMJr9oAYrCJ7+g/ZFbA264IXGEy9VQm7qjEXLAQF8l2d8zB/tjpUfxaySXoS/HBAyzZWttc/dz2LPfTFobgHykLOFKzK1fHNVWVO6/2COxRqNnEruUWKlkbdaV kPDC9Gz2zhAP/LBTZ/hYRFynCx21HAMmpQPQIDHUBUr+hRZ7Z2ttvYQu16EF0rjQ==

**JOSE GERARDO VERA DIMAS** | Fecha:2023-06-20 16:49:32 | Firmante

We0bdHycNiXNXmjKfkAHHx1M5nOobFSzOWIaBDbaXLT195IK9Xp+zI8QFduBH/2vhlgy2j1MLBMxKAsZgpUYEVKUZeGL6Xp/z+LX6VW3FwotVBTsfw2BiuoL5NEuQWeYWRH/1 r24f00OZlk+n6cg+Cq39cwsMmfVKfGudgwXeHi0xAWzdbxz55UqbEsixZwZKfqlvyf57qjFesOHkU+zklO/MroHvQCJP8ILWuzaTTUDD0bu+FjG5Q5GqWA3NjV5vZs8636lcMrggfC Q217PclZ+CmUY3VhQ0E/S5viUE8TTX7vnr5M7ff6mDMhllcWI9olb8tok2lX+MCcsilw==

**MOISES MONTIEL GONZALEZ** | Fecha:2023-06-21 10:14:51 | Firmante

HOmAwgJ6Qaugy3zv8uoiKaVBJAW6ZGxRuVAm1w4lv1JakGaNo9HMMPEczEucr04+WD4xiRcJtWGx62KHaE1Nlj6/64M8PR+VEKufKUE4xkSsHFog0vmBtD7JB3aHhWP5Qx qLbOJMo2TYqQCgMpB2d0l/09+GvyGvwPLEDq0CxMA1Tkno0VIVmJUVL2S3eJbHF32mcQ1Hxc5gUZh7pSS5+9/G3TD7/ym6T86DSsFmBfYhyUbuzDkP5OtwkSg835mQAmK4 qc3IBGvFgk1eb1Y7jEwCnFqDKK45QvzjQHGkjbCUCeFXjGFogcd80Gq3FGIKlbj3KOPonl9oJhVvEp3g==

Puede verificar la autenticidad del documento en la siguiente dirección electrónica o escaneando el código QR ingresando la siguiente clave:



fiL8UGp2j

<https://efirma.uaem.mx/noRepudio/DRrCJJTb02rAsrXfz86dWmwDPA4DcWf>







