



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Doctorado

**Confort térmico adaptativo y ahorro de
energía en un clima cálido seco para edificios no-
residenciales en México**

presentada por

MC. Jessica Gabriela Sánchez Montes

como requisito para la obtención del grado de
Doctora en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Director de tesis

Dr. José Jassón Flores Prieto

Codirectora de tesis

Dra. Alicia Martínez Rebollar

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2025.



Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 04/julio/2025

Oficio No. SAC/178/2025

Asunto: Autorización de impresión de tesis

JESSICA GABRIELA SÁNCHEZ MONTES
CANDIDATA AL GRADO DE DOCTORA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Confort térmico adaptativo y ahorro de energía en un clima cálido seco para edificios no-residenciales en México"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

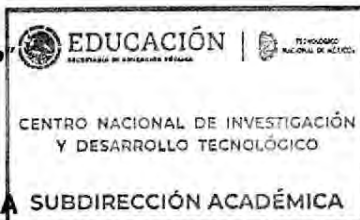
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al Servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104,
e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., a 30 de junio de 2025

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

AT'n: **DR. MIGUEL ANGEL CHAGOLLA ARANDA**
PRESIDENTE DEL CLAUSTRO DOCTORAL
DEL DEPARTAMENTO DE ING. MECÁNICA

Los abajo firmantes, miembros del Comité Tutorial de la estudiante **Jessica Gabriela Sánchez Montes** manifiestan que después de haber revisado el documento de tesis titulado **"Confort térmico adaptativo y ahorro de energía en un clima cálido seco para edificios no-residenciales en México"** realizado bajo la dirección de **Dr. José Jassón Flores Prieto** y la codirección de la **Dra. Alicia Martínez Rebollar**, el trabajo se ACEPTA para proceder a su impresión.

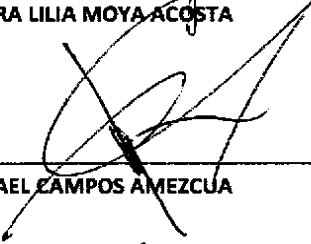
ATENTAMENTE



DRA. SARA LILIA MOYA ACOSTA
CENIDET



DR. MIGUEL ANGEL CHAGOLLA ARANDA
CENIDET



DR. RAFAEL CAMPOS AMEZCUA
CENIDET



DR. LUIS ADRIAN LOPEZ PÉREZ
UNISON



DR. JOSÉ JASSÓN FLORES PRIETO
CENIDET



DRA. ALICIA MARTÍNEZ REBOLLAR
CENIDET

c.c.p: Mtra. Verónica Sotelo Boyas Jefa del Departamento de Servicios Escolares
c.c.p: Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza Subdirector Académico
c.c.p: Expediente



2025
Año de
La Mujer
Indígena

Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C. P. 62490, Cuernavaca Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 2108,
e-mail: dir_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

cenidet
CENTRO NACIONAL DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO TECNOLÓGICO



Agradecimientos

Gracias a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico que me permitió dedicarme de tiempo completo al doctorado.

Al TecNM/CENIDET y a todos quienes lo conforman, por ser mi segundo hogar durante estos años. Gracias por todo lo aprendido y por las herramientas que hoy me acompañan.

A mi mamá y a mi papá, por estar siempre a mi lado, por ser mis más grandes confidentes y porristas. A ti, mamá, gracias por impulsarme en mis sueños y por creer en mí más de lo que yo misma creo. Y a ti, papá, por tus consejos que siempre llegan en el momento justo y por siempre hacer que la vida sea más sencilla.

A mis hermanas y sobrinos, por ser alegría y luz en todo momento. Gracias por estar, hacen que esta vida sea más bonita.

Al Dr. José Jassón Flores Prieto, gracias por ser mucho más que un director de tesis: guía, mentor y amigo. Me enseñaste seguridad, enfoque y fortaleza, y compartiste conmigo tu amor por la palabra, la belleza y el pensamiento profundo. Me mostraste que no basta con pensar, sino que hay que aprender a pensar cómo pensamos, porque en el cuestionamiento está la libertad.

A la Dra. Alicia Martínez Rebollar, gracias por su acompañamiento y por brindarme las herramientas para hacer posible este trabajo. Al Dr. Eddie, por tu apoyo, tiempo, amistad y sobre todo, tu paciencia.

A los doctores Luis Adrián López, Carlos Ríos Rojas y nuevamente al Dr. Jassón, por ser el mejor equipo. Los admiro y respeto profundamente. Gracias por su tiempo, paciencia y amistad.

A mis sinodales, Dr. Luis Adrián López, Dr. Rafael Campos, Dra. Sara Moya, y Dr. Miguel Chagolla, gracias por sus observaciones y recomendaciones para fortalecer este trabajo.

Gracias al Dr. Carlos Ríos Rojas por su amistad y todas las atenciones brindadas y al TecNM/ITTG Campus Chiapas por abrirme las puertas durante mi estancia académica. Al Dr. Francisco Javier, por convertirse en un gran amigo en este camino del doctorado; y al TecNM/ITT Campus Torreón por su hospitalidad.

A mi querido Laboratorio de Energía Solar y a todos quienes lo han integrado: son parte importante en mi proceso de formación.

A la Sra. Rocío, gracias infinitas por tu ayuda y calidez. Te admiro por la convicción con la que desempeñas tu trabajo y por la dedicación que pones en cada detalle.

A la teacher Paty, por convertirte en una gran amiga y por apoyarme siempre. A Lalo e Isa por su alegría, cariño y amistad. A la maestra Vero por sus consejos.

Y a todos los amigos y personas que me acompañaron en estos años: gracias por su cariño y por estar. Me los llevo en el corazón.

Y a mí, por persistir.

Dedicatoria

A Dios, por su infinito amor.

A mi mamá y a mi papá, mi mayor inspiración.

Contenido

<i>Lista de Figuras.....</i>	<i>III</i>
<i>Lista de Tablas.....</i>	<i>IV</i>
<i>Resumen.....</i>	<i>V</i>
<i>Abstract.....</i>	<i>VII</i>
<i>Nomenclatura</i>	<i>IX</i>
Capítulo 1: Introducción	1
1.1 Generalidades	2
1.2 Estado del Arte	4
1.2.1 Modelos de confort térmico adaptativo en México	4
1.2.2 Ahorros energéticos utilizando control adaptativo	5
1.2.3 Normativa aplicable.....	6
1.3 Objetivos y alcances	10
1.3.1 Objetivos	10
1.3.2 Alcances	10
1.4 Estructura de la tesis y artículos	11
Capítulo 2: Materiales y Método.....	12
2.1 Fundamentos teóricos	13
2.1.1 Física del problema.....	13
2.1.2 Intercambio de calor entre el cuerpo humano y el ambiente	14
2.1.3 Parámetros que influyen en el confort térmico	17
2.1.4 Modelos de confort térmico adaptativo existentes en la literatura.....	20
2.2 Caso de estudio	22
2.2.1 Climas predominantes en México	22
2.2.2 Edificios representativos.....	24
2.2.3 Localidades representativas en México	25
2.3 Recolección de datos en campo.....	28
2.3.1 Cuestionario de confort térmico	29
2.3.2 Construcción de la base de datos	33
2.3.3 Procesamiento y pre-análisis de datos	34
2.4 Modelos de confort térmico adaptativo	35
2.4.1 Estimación de la T_c con método de Griffiths	36
2.4.2 Modelo lineal.....	37
2.4.2 Modelo con programación genética.....	38
2.5 Ahorro energético	40

Capítulo 3: Diseño experimental- Estrategia de ahorro de energía	42
3.1 Estrategia de ahorro de energía.....	43
3.1.1 Modelos de confort térmico adaptativo	45
3.2 Ahorro energético	46
3.2.1 Cálculo de las cargas térmicas y grados día de enfriamiento	46
3.2.2 Simulación térmica	47
3.2.3 Verificación de la plataforma de simulación	48
3.3 Potencial de ahorros energéticos	49
Capítulo 4: Resultados y análisis	50
4.1 Recolección de datos en campo	51
4.1.1 Variables objetivas de confort térmico	52
4.1.2 Variables subjetivas de confort térmico.....	54
4.1.3 Análisis de correlación	56
4.1.4 Evaluación de la sensación de confort térmico adaptativo	58
4.2 Modelos adaptativos propuestos de T_c	60
4.2.1 Estimación de la T_c con método de Griffiths	61
4.2.2 Modelos adaptativos con regresión lineal simple	63
4.2.3 Modelos adaptativos con programación genética	65
4.3 Ahorro energético	70
4.3.1 Ahorros estimado con modelo adaptativo lineal simple	70
4.3.2 Ahorros estimado con modelos adaptativos utilizando programación genética	72
Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones	74
5.1 Conclusiones.....	75
5.2 Recomendaciones para trabajos futuros	76
Referencias	77

Lista de Figuras

Figura 1. Comparativo de cargas térmicas, a) espacio climatizado con el enfoque de referencia, b) climatización con el enfoque adaptativo.....	14
Figura 2. Tipo de clima y consumo eléctrico por metro cuadrado.	23
Figura 3. Porcentaje de edificios estudiados mediante el enfoque adaptativo.	24
Figura 4. Condiciones ambientales de la ciudad de Torreón.	27
Figura 5. Temperatura anual de Torreón, Coahuila.....	27
Figura 6. Lugar y edificios de estudio, ITT, Torreón, Coahuila.	28
Figura 7. Etapas del análisis de datos para obtener el modelado térmico.....	29
Figura 8. Parámetros del cuestionario de confort térmico.	30
Figura 9. Estrategia de toma de datos en campo.	32
Figura 10. Estrategia para la construcción de la base de datos.	33
Figura 11. Pre-procesamiento de la base de datos.	34
Figura 12. Proceso de Programación genética.....	38
Figura 13. Ejemplo de la expresión matemática expresada mediante árbol sintáctico.	39
Figura 14. Proceso de programación genética.	40
Figura 15. Metodología general del estudio.	41
Figura 16. Diseño experimental.	44
Figura 17. Plataforma de simulación para el cálculo de las cargas térmicas.	47
Figura 18. Edificio de referencia.	48
Figura 19. Comparativo de cargas térmicas.	48
Figura 20. Valores atípicos por variable, (a) edad, peso, estatura y (b) temperatura ambiente, temperatura media y temperatura operativa.	51
Figura 21. Aplicación de encuestas y salón de clases.	53
Figura 22. Voto de sensación térmica y preferencia térmica.....	54
Figura 23. Voto de sensación de humedad y preferencia de humedad.	55
Figura 24. Sensación de movimiento del aire, voto y preferencia.....	56
Figura 25. Matriz de correlación de los parámetros de confort térmico.	57
Figura 26. Análisis de importancia en T_c	58
Figura 27. VST vs T_{op} para modo AC y VN.	59
Figura 28. Aceptación térmica para modo AC y VN.	60
Figura 29. Temperatura de confort con el método de Griffiths con un α de 0.25 a 0.50 C^{-1} , en AC y VN.	61
Figura 30. Regresión lineal entre $T_a:T_{op}$ y $T_a:T_g$	62
Figura 31. T_c con el método de Griffiths para la escala de VST para AC (a) y VN (b).	62
Figura 32. Modelos de confort térmico adaptativo con regresión lineal simple.....	64
Figura 33. Zonas de T_c para AC y VN.	64
Figura 34. Box plot de la T_c utilizando modelos adaptativos propuestos con PG.	68
Figura 35. Comparativo de las cargas térmicas con los modelos propuestos.	71
Figura 36. Comparativo de grados día de enfriamiento con diferentes modelos de confort adaptativo.	72
Figura 37. Carga térmica anual utilizando los modelos propuestos con regresión simple y programación genética.....	73

Lista de Tablas

Tabla 1. Factor de ropa para distintas vestimentas.	18
Tabla 2. Tasa metabólica.	18
Tabla 3. Diferencias entre los modelos de confort térmico estático y adaptativo.	21
Tabla 4. Modelos de confort térmico adaptativo para diferentes regiones y edificios.	21
Tabla 5. Tipo de clima y porcentaje que ocupa en el territorio mexicano.	23
Tabla 6. Ciudades de México representativas para el estudio.	26
Tabla 7. Escala de respuestas en el cuestionario subjetivo.	30
Tabla 8. Instrumentación para el estudio de campo.	32
Tabla 9. Verificación de la plataforma de simulación del edificio de referencia "R".	49
Tabla 10. Variables demográficas y condiciones interiores y exteriores.	53
Tabla 11. Comparación de la sensación térmica en función de la temperatura operativa en los modos AC y VN.	60
Tabla 12. Coeficiente de correlación de T_a : T_{op} y T_a : T_g	61
Tabla 13. Parámetros del algoritmo evolutivo.	65
Tabla 14. Expresiones matemáticas para determinar la temperatura de confort, con programación genética.	66
Tabla 15. Temperatura mínima, máxima y promedio de los modelos locales propuestos.	66
Tabla 16. Representaciones matemáticas obtenidas con programación genética.	69
Tabla 17. Promedio, mínimo y máximo de valores de modelos de T_c comparados en AC, temporada de verano.	70
Tabla 18. Comparativo de la T_c con diferentes modelos.	71
Tabla 19. Comparativo de ahorros en la carga térmica anual (MWh).	73

Resumen

El estudio busca determinar el ahorro energético en edificios educativos en clima cálido seco implementando modelos de confort térmico adaptativo locales para clima cálido seco, en términos de las cargas térmicas, para edificios en modo aire acondicionado y la disminución de grados día de enfriamiento en modo ventilación natural. La muestra involucra una encuesta de 340 personas, realizada a finales del verano de 2023. El estudio es para un edificio educativo del TecNM, en Torreón Coahuila, con equipamiento de un salón de clases universitario, el cual se considera como representativo de México. Torreón presenta un clima seco desértico, con predominancia en México y es uno de los climas con mayor consumo de energía en la climatización.

Los modelos de temperatura de confort consideraron técnicas de regresión lineal simple y con programación genética, con parámetros subjetivos y objetivos de los ocupantes, y las condiciones térmicas del entorno. La simulación de la edificación en TRNSYS permite modelar la carga térmica de enfriamiento y los grados día de enfriamiento.

Para edificaciones con aire acondicionado, el estudio reveló que el modelo lineal propuesto puede lograr un ahorro energético para la temporada de verano de hasta del 24.2% en comparación con la NOM-008-ENER-2001, reducción de 92.9 a 70.4 kWh/m^2 . En ventilación natural, para la temporada de verano, la reducción de los grados día de enfriamiento mostró un potencial de ahorro del 45.7% en comparación con un modelo mexicano; el modelo lineal propuesto muestra una temperatura de confort hasta 2.5 °C por encima de los modelos convencionales utilizados en México.

Los resultados usando programación genética mejoran el ajuste de la temperatura de confort hasta cinco veces, con un fitness de 0.58 °C, y permite ahorros anuales de hasta el 55.0%.

Las temperaturas interiores en ventilación natural fueron hasta 3.0 °C más altas que en modo aire acondicionado, y la variación de la humedad relativa fue del 2.2%. En ventilación natural, para un

voto de sensación térmica (VST) neutro, la temperatura de confort (T_c) media fue significativamente menor que en los espacios con ventilación natural, con una diferencia de 1.9 °C. Por lo que se observó que, los ocupantes de ventilación natural fueron menos tolerantes a temperaturas de confort más altas que los ocupantes de aire acondicionado. El modelo algebraico obtenido con programación genética resulta con facilidad de aplicación/interpretación similar a los modelos lineales, mejorando la exactitud hasta 5 veces más.

Abstract

The study aims to determine energy savings in educational buildings by implementing local adaptive thermal comfort models for hot and dry climates, in terms of cooling loads for air-conditioned buildings and the reduction of cooling degree days in naturally ventilated buildings. The sample consists of 340 surveys conducted at the end of summer 2023. The case study focuses on an educational building at TecNM in Torreón, Coahuila, equipped with a university classroom considered representative of Mexico. Torreón has a desert dry climate, one of the most predominant in Mexico and among those with the highest energy consumption for air conditioning.

The comfort temperature models were developed using both simple linear regression and genetic programming techniques, considering subjective and objective occupant parameters, as well as surrounding thermal conditions. TRNSYS simulation was used to model cooling loads and cooling degree days.

For air-conditioned buildings, the study revealed that the proposed linear model can achieve up to 24.2% energy savings compared to NOM-008-ENER-2001, reducing consumption from 92.9 to 70.4 kWh/m^2 . For naturally ventilated buildings, the reduction in cooling degree days showed a potential savings of 45.7% compared to a Mexican model; the proposed linear model presented a comfort temperature up to 2.5 °C higher than conventional models used in Mexico.

Results from genetic programming improved the prediction of comfort temperature by up to five times, reaching a fitness of 0.58 °C, and enabled annual savings of up to 55.0%.

Indoor temperatures in naturally ventilated spaces were up to 3.0 °C higher than in air-conditioned ones, while relative humidity variation was 2.2%. In naturally ventilated spaces, for a neutral thermal sensation vote (VST), the mean comfort temperature (T_c) was significantly lower than in air-conditioned spaces, with a difference of 1.9 °C. It was observed that naturally ventilated occupants

were less tolerant to higher comfort temperatures than those in air-conditioned spaces. The algebraic model derived from genetic programming proved as easy to apply and interpret as linear models, while achieving up to five times higher accuracy.

Nomenclatura

<i>Variable</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidades</i>
AC	Aire acondicionado	-
A	Área de la edificación	m^2
ΔT	Diferencia de temperatura	$^{\circ}C$
C_p	Calor específico	$kJ/kg \cdot K$
F_{edad}	Factor de edad	años
F_{peso}	Factor de peso	kg
$F_{estatura}$	Factor de estatura	m
F_{genero}	Factor de género	-
F_{clo}	Factor de arropamiento	clo
F_{met}	Factor metabólico	$kcal/hm^2$
F_{res}	Factor de tiempo de residencia	años
GDE	Grados Día de Enfriamiento	$^{\circ}C$
HR	Humedad relativa	%
k	Conductividad térmica del material	$W/m \cdot K$
n_{zt}	Número de zonas térmicas	-
Q_T	Carga térmica	MWh
Q_{T_mp}	Carga térmica utilizando modelo propuesto	MWh
Q_{int}	Carga térmica de interior	MWh
Q_{int_m}	Carga térmica interior utilizando modelo propuesto	MWh
Q_{sol}	Ganancias por flujo de calor solar	MWh
Q_{alm}	Energía almacenada en la edificación	MWh
ST	Sensación térmica	-
ST_d	Sensación térmica deseada	-
SH	Sensación de humedad	-
SH_d	Sensación de humedad deseada	-
SV_a	Sensación de velocidad del viento	-
SV_{ad}	Sensación de velocidad del viento deseada	-
T_{amb}	Temperatura ambiente	$^{\circ}C$
T_{conf}	Temperatura de confort	$^{\circ}C$
T_{confd}	Temperatura de confort deseada	$^{\circ}C$
$T_{c,lin}$	Temperatura de confort lineal	$^{\circ}C$
T_{pre}	Temperatura preferida	$^{\circ}C$
T_{bs}	Temperatura del bulbo seco	$^{\circ}C$
T_{bh}	Temperatura del bulbo húmedo	$^{\circ}C$
T_g	Temperatura del globo	$^{\circ}C$
T_{conf}	Temperatura de confort	$^{\circ}C$
T_{op}	Temperatura operativa	$^{\circ}C$
T_{op_m}	Temperatura operativa con modelo propuesto	$^{\circ}C$
T_{rm}	Temperatura radiante media	$^{\circ}C$
T_{env}	Temperatura de la envolvente	$^{\circ}C$
T_{sol}	Temperatura sol	$^{\circ}C$
WWR	Proporción ventana pared	%
VN	Ventilación natural	-
V_a	Velocidad del aire	m/s
VST	Voto de sensación térmica	-

Capítulo 1: Introducción

Este capítulo introduce al tema de ahorro de energía con modelos de confort térmico adaptativo propuestos, resaltando: la motivación del trabajo, el estado del arte, los objetivos, alcances y la estructura de la tesis.

1.1 Generalidades

En la actualidad, las personas pasan alrededor del 80.0-90.0% de su tiempo en edificaciones [1,2], ya sea residenciales, educativas, oficinas, hospitales, entre otros. Así, el consumo energético de los edificios oscila entre 30.0-40.0% de la energía total mundial [3]. El acondicionamiento del clima representa una de las principales formas en las que se consume la energía, llegando a ser hasta del 70.0% [4–6]. Diversos autores han mencionado que, las personas que habitan en entornos con limitado confort térmico son más propensas a cometer errores y presentar una menor productividad [2,7,8]. En las últimas dos décadas, los modelos de confort térmico adaptativo han venido surgiendo, y a la vez, mostrado que permiten mitigar el consumo energético al climatizar edificaciones, y mejorar el confort térmico [9,10]. Sin embargo, los estudios sobre modelos de confort térmico bajo el enfoque adaptativo y el potencial de ahorro energético aún son escasos en occidente, y principalmente en climas cálidos [11–14].

En las últimas cinco décadas, el modelado del confort térmico comenzó a tomar gran relevancia para calcular la temperatura de confort [2,15]. La mayoría de los estudios se basan en el enfoque estático que se deriva de pruebas en laboratorios, bajo condiciones controladas de las variables ambientales [16]. En algunas ocasiones, la evaluación con el enfoque estático o también llamado tradicional, presenta limitada cobertura de las expectativas de los ocupantes, ya que los datos objetivos llegan a diferir de los subjetivos hasta en un 60.0% [17,18]. Hoy en día, el modelado se realiza principalmente con el enfoque estático, y el uso del enfoque adaptativo aún es muy incipiente y más en zonas tropicales[1]. El enfoque adaptativo ha evolucionado y considera adicionalmente la subjetividad de los ocupantes, logrando niveles de aceptabilidad en el confort térmico de hasta el 90.0% [16].

Los modelos de confort térmico adaptativo comúnmente correlacionan la temperatura de confort T_c , con la temperatura media de funcionamiento exterior (T_{rm}). Diversos estándares internacionales han incluido los modelos de confort térmico basados con el enfoque adaptativo como son la Guía A de CIBSE, ASHRAE, CEN estándar EN 15251. Sin embargo, los estudios sobre los modelos adaptativos

aún son escasos en el continente europeo y americano y los existentes se centran principalmente en el continente asiático.

En el modelado del confort térmico, el uso de inteligencia artificial ha ganado relevancia debido a su capacidad para representar fenómenos no lineales con alta precisión [19–21]. Técnicas como redes neuronales, lógica difusa y algoritmos evolutivos han demostrado un buen desempeño predictivo; sin embargo, presentan limitaciones en cuanto a la interpretación de los resultados [20,22,23]. En este sentido, la programación genética ha surgido como una técnica de regresión simbólica capaz de generar modelos matemáticos explícitos que describen las relaciones complejas entre variables ambientales, fisiológicas y subjetivas. Esta característica permite no solo obtener una alta precisión, sino también interpretar fácilmente los factores que afectan la temperatura de confort, lo cual resulta valioso en el diseño y operación de estrategias de climatización adaptativa.

Los modelos de confort térmico adaptativo permiten mitigar el consumo energético en la climatización de edificaciones en climas cálidos. López-Pérez *et al.* (2019) [9] mostraron que es posible incrementar el nivel de confort con los modelos de confort adaptativo, a la vez de reducir el consumo energético. Sin embargo, el efecto en otros climas aún permanece incierto [24–27]. Por ejemplo, en climas secos, los modelos locales de confort con enfoque adaptativo pueden incrementar el intervalo de la temperatura de confort T_c , de los ocupantes, para incrementar ahorros en la carga térmica de enfriamiento [28,29]. Sin embargo, en un clima cálido seco, el estudio de la temperatura de confort, cargas térmicas y Grados Día de Enfriamiento (*GDE*) considerando enfoque adaptativo es escaso, y particularmente en edificaciones educativas funcionan en modo aire acondicionado AC y ventilación natural VN.

1.2 Estado del Arte

Esta sección presenta el estado del arte relacionado con el confort térmico, abordando los principales enfoques teóricos y prácticos del confort térmico. Asimismo, se analizan las limitaciones actuales en su implementación, con énfasis en los retos que enfrentan diferentes tipos de edificaciones y climas. También, se examina la relación entre el confort térmico y el ahorro energético, destacando los modelos adaptativos para optimizar el consumo de energía. Los modelos de confort térmico adaptativo son modelos empíricos que estiman la temperatura de confort interior a partir de variables climáticas, como la temperatura exterior, bajo el principio de que las personas se adaptan al entorno y ajustan sus expectativas térmicas.

1.2.1 Modelos de confort térmico adaptativo en México

Como se mencionó anteriormente, los modelos de confort térmico en todo el mundo han tomado gran relevancia impulsando soluciones de confort y eficiencia energética en edificaciones [10]. En México, la construcción de modelos inició hace una década, la cobertura es limitada se han reportado modelos principalmente para clima cálido subhúmedo, edificios tipo residencial y ocupantes jóvenes. Marincic *et al.* (2012) [30] reportaron un modelo de confort térmico adaptativo para la ciudad de Hermosillo para edificios residenciales con T_c de 32.2 ± 2.5 °C y para invierno de 26.9 °C. Oropeza *et al.* (2017) [10] muestran modelos de confort térmico adaptativo para las cuatro principales regiones climáticas de México (árido, trópico seco, templado y trópico húmedo), para edificios residenciales en modo de ventilación natural y aire acondicionado. López *et al.* (2019) propusieron un modelo de confort térmico adaptativo para edificios educativos, para un clima tropical tipo Aw, considerando edificios climatizados con VN y AC. En general se observa que los autores buscan proponer modelos para determinar la temperatura de confort térmico, para mejorar el control de los sistemas de aire acondicionado y ventilación natural en edificaciones, utilizando estrategias de enfriamiento pasivo. Sin embargo, los modelos solo aplican para un limitado tipo de edificaciones del norte o sur del país.

1.2.2 Ahorros energéticos utilizando control adaptativo

Los modelos de confort térmico adaptativo han mostrado que permiten mitigar el consumo energético en la climatización de edificaciones, logrando aceptación térmica [9,10]. Nicol y Humphreys (2002) [28] mencionaron que, la tasa de cambio de la temperatura de confort depende de la temperatura exterior, de lo cual se puede obtener un algoritmo adaptativo para calcular el punto de ajuste en el interior de un edificio. Los autores mencionan que, los primeros indicios son que tal punto de ajuste no incrementa la incomodidad y permite reducciones en el uso de energía. Por medio de la simulación, para predecir el ahorro de energía con el uso de una temperatura interior variable, se visualizó que en Reino Unido, el ahorro en la carga de refrigeración podía estimarse en un 10.0% [28].

En climas cálidos, mencionan que, la temperatura de confort aumenta significativamente debido a la adaptación, por este factor es posible el ahorro de energía [31]. Attia y Carlucci (2015) [32] compararon diferentes modelos de confort térmico con los modelos de Fanger, en climas cálidos para edificios con cero energías en Cairo Egipto. Los resultados de la comparación de los modelos, EN 15251, ASHRAE 55 y Giovani, con el modelo Fanger, se obtuvo un ahorro del consumo energético del 16.0, 21.0 y 24.7%, respectivamente. Hoyt *et al.* (2015) [33] simularon edificios de oficina en diferentes zonas climáticas de Estados Unidos. Los autores encontraron que, sin reducir los niveles de satisfacción, al aumentar el punto de ajuste de enfriamiento de 22.2 °C a 25.0 °C, se logró un ahorro promedio de energía de enfriamiento del 29.0%. Wu *et al.* (2018) [34] realizaron un estudio de campo sobre el confort térmico y el uso de energía en edificios de oficina en China. Los autores encontraron que, cuando la temperatura exterior era de 35.0 °C, lo cual es muy normal para un día de verano en Guangzhou, aumentar la temperatura interior de 26.0 °C a 29.0 °C ahorraría aproximadamente un 60.0% de energía de enfriamiento. Wu *et al.* (2019) [35] estudiaron el confort térmico y el potencial de ahorro en edificios de oficina en Changsha, China. Los autores encontraron que, los ocupantes presentaron una temperatura más alta que la predicha por el porcentaje previsto de personas insatisfechas (PPD) por sus siglas en inglés *Predicted Percentage of Dissatisfied*, el 95.0% de los

ocupantes se mostraron satisfechos con el ambiente térmico. En comparación con el voto medio previsto (PMV) por sus singlas en inglés *Predicted Mean Vote*. El modelo adaptativo era más aplicable a edificios con aire acondicionado y hubo ahorros del 8.6% en la energía de refrigeración durante el verano, en edificios con aire acondicionado.

Du *et al.* (2019) [36] evaluaron el ahorro de energía mediante el uso de la temperatura dinámica de un modelo de confort térmico adaptativo en comparación con una temperatura constante, en seis ciudades de China. El máximo potencial de ahorro fue de 34.4% para Nanjing, seguido por Chongqing con 31.8% y Wuhan el menor potencial de ahorro con 18.8%. En particular, los autores observaron un mayor ahorro de energía para la refrigeración en verano que para la calefacción en invierno y mencionan que, la diferencia en los ahorros de energía se atribuye a la diferencia de climas. Ming *et al.* (2020) [37] evaluaron la contribución del confort térmico adaptativo al ahorro energético en edificios de oficina en China. Los autores mencionan que, el primer periodo evaluado con una temperatura estándar de la normativa China hubo un consumo de energía de 28.1 kWh/m^2 , mientras que, el segundo periodo, con una temperatura variable, se consumió 19.1 kWh/m^2 , lo que indica un ahorro energético total del 34.3%. Xu *et al.* (2020) [38] analizaron el ahorro de energía aplicando una temperatura de ajuste interior basada en el confort térmico adaptativo en viviendas tradicionales chinas. Los autores encontraron que, la estrategia de control dinámico interior basada en la temperatura neutra tiene un gran potencial de ahorro de energía, que puede ahorrar entre un 26.8% y un 36.5% de energía en el período de refrigeración y calefacción de todo el año. Diversos autores [37,38], mencionan que, utilizar una temperatura de confort variable con el tiempo basada en el enfoque adaptativo en comparación con una temperatura rígida, genera ahorros de energía en la climatización térmica de edificaciones de hasta más del 60.0%.

1.2.3 Normativa aplicable

La mayoría de los datos de confort térmico se sustentan con los estándares internacionales de confort, como el estándar 55 de ASHRAE, [39]. Los modelos de confort térmico adaptativo se establecieron

por primera vez en el estándar 55 de ASHRAE en 2004 [40]. Hoy en día se utilizan como corriente principal para reflejar los requisitos térmicos reales para los ocupantes de entornos construidos [41]. El modelo ASHRAE 55 incluye una recopilación de más de 21000 muestras de evaluaciones de confort tomadas de 160 edificios de oficinas, formulado en el marco del proyecto RP-884 de ASHRAE. Por otro lado, CIBSE involucra internacionalmente a profesionales desarrolladores de guías y documentos para temas de construcción, ingeniería y sustentabilidad. La Guía A de CIBSE ofrece recomendaciones para mejorar la calidad ambiental de los espacios interiores en edificios. Los criterios que recomienda se basan en el concepto del enfoque adaptativo. La Guía A formulada en el proyecto europeo *Smart Controls and Thermal Comfort*, emplea un modelo bajo el enfoque adaptativo, para edificios AC. En la norma EN 15251 y su revisión prEN 16798, se incluyeron tanto los modelos PMV como adaptativos. En 2007 EN 15251, el modelo adaptativo se basó en datos empíricos de alrededor de 1500 respuestas [28]. El objetivo de los autores es la mitigación del uso de energía de los sistemas de aire acondicionado variando las temperaturas operativas en función de la temperatura exterior mediante el uso de un "algoritmo adaptativo".

Hoy en día, el ahorro de energía en las edificaciones con un considerable nivel de confort térmico es un tema de interés, ya que se estima que más del 70.0% de la energía demandada en las edificaciones la consumen los sistemas HVAC [4–6]. Los modelos de confort térmico adaptativo han mostrado que permiten mitigar el consumo energético en la climatización de edificaciones, logrando aceptación térmica [9,10]. Forgiarini-Rupp *et al.* 2022 [42] mencionan que los modelos adaptativos dependen de las características contextuales y culturales locales de los ocupantes. La normativa del confort térmico ha sido una referencia importante para el diseño de edificios. La mayoría de los datos de confort térmico se sustentan con los estándares internacionales de confort, como el estándar 55 de ASHRAE, EN 15251, Guía A de CIBSE [39]. Sin embargo, la normativa internacional aplica para un específico grupo de personas, ya que, los datos con los cuales se construyeron los modelos fueron tomados de países europeos y de Norte América. En las últimas décadas, diversos autores han propuesto modelos

de confort térmico para predecir las respuestas térmicas de los ocupantes a diferentes condiciones ambientales. El crecimiento de las publicaciones, sobre los modelos de confort térmico adaptativo locales, aumenta a lo largo de los años. Es muy importante establecer un modelo de confort térmico en caso de desórdenes térmicos extremos [43]. Vivir en diferentes regiones climáticas llevó a una adaptación diferente, por lo que los modelos adaptativos se generaron y desarrollaron [43]. El continente asiático, con un porcentaje del 67.0%, es el continente con mayor número de publicaciones sobre modelos de confort térmico adaptativo en el mundo [14,44]. China e India, países asiáticos, representan el 23.0 y 21.0% del total, respectivamente, siendo los países con mayor número de publicaciones sobre modelos de confort térmico adaptativo. Europa representa el 15.0% de publicaciones sobre confort térmico adaptativo [45–47], teniendo a España y Reino Unido con un porcentaje, del total, del 5.0% cada uno. Por otra parte, América presenta el 13.0% de artículos publicados sobre el confort térmico adaptativo [3,10,48], México presenta el 8.0%. África [29] al igual que Oceanía [49], representan el 3.0%, cada uno, del total. Cabe destacar que, los modelos de confort térmico con control adaptativo se han estudiado en gran parte del mundo, sin embargo, la cobertura de los modelos se considera limitada en climas, operación del edificio y grupo de personas. El aumento de la actividad de investigación en los países asiáticos ha ido acompañado de esfuerzos para localizar modelos adaptativos en contextos cada vez más específicos [50]. Además, la región climática afecta significativamente la relación del modelo adaptativo entre la temperatura exterior y la temperatura neutra interior para los ocupantes en edificios con ventilación natural [42].

En Cairo Egipto [32] se han encontrado ahorros de hasta el 24.7%. En Estados Unidos el ahorro promedio de energía de enfriamiento se ha encontrado en un 29.0%. En oficina en China [34] los ahorros se han encontrado hasta en un 60.0% de energía de enfriamiento. En México para clima tropical, los ahorros en la carga térmica de enfriamiento anual han sido de hasta el 43.0%. En climas secos, los modelos locales de confort basados en enfoque adaptativo pueden incrementar el intervalo de la T_c de los ocupantes, dando paso a generar ahorros en la carga térmica de enfriamiento. Los

modelos de confort térmico incrementan la posibilidad de reducir la carga térmica de enfriamiento en las edificaciones con aire acondicionado. Mientras que, con ventilación natural permite tener una temperatura de referencia para el diseño de los edificios, disminuyendo los grados Día de Enfriamiento. En ambos casos AC y VN sin afectar la comodidad térmica de los ocupantes. Con lo anterior, se observa que, los modelos de confort térmico basados en el enfoque adaptativo para edificios no-residenciales en climas cálidos secos de México pueden coadyuvar al ahorro de energía.

1.3 Objetivos y alcances

Los objetivos y alcances del trabajo de investigación se plantean con base en el estado del arte.

1.3.1 Objetivos

Determinar el ahorro energético implementando modelos de confort térmico adaptativo locales propuestos, para edificios educativos con aire acondicionado (AC) y ventilación natural (VN) en un clima cálido seco de México. El potencial del ahorro energético se estudia en términos de las cargas térmicas de enfriamiento en edificios AC y en la reducción de los grados día de enfriamiento en edificaciones VN.

- a) Establecer el estado del arte del uso de modelos de confort adaptativo en edificaciones educativas en climas cálidos secos.
- b) Proponer modelos de confort adaptativo local para las edificaciones con aire acondicionado y ventilación natural en un clima cálido seco de México, a partir de encuestas de parámetros térmicos y monitoreo de parámetros ambientales.
- c) Determinar el potencial de ahorro de energía considerando los modelos de confort adaptativo. El potencial se estudia en términos de las cargas térmicas para con aire acondicionado y de los grados día de enfriamiento para ventilación natural.

1.3.2 Alcances

- a) Obtener dos modelos de confort térmico local basado en el enfoque adaptativo uno para edificio aire acondicionado y el segundo para ventilación natural, utilizando regresión lineal simple y programación genética, para una edificación educativa ubicada en clima cálido seco.
- b) Identificar el ahorro energético que se puede lograr aplicando un modelo de confort térmico adaptativo local como estrategias de climatización, en un edificio con aire acondicionado ubicado en clima cálido seco con un nivel de confort térmico adecuado.

- c) Identificar los Grados Día de Enfriamiento que se pueden reducir aplicando un modelo de confort térmico adaptativo local como estrategia de climatización en un edificio con ventilación natural, ubicado en clima cálido seco y el nivel de confort térmico alcanzado.

1.4 Estructura de la tesis y artículos

Este trabajo presenta cinco capítulos, el **Capítulo 1** introduce a la motivación del estudio, el estado del arte, el objetivo general, los objetivos específicos, los alcances de la tesis y la estructura de la tesis y artículos. El **Capítulo 2** muestra los fundamentos teóricos, el caso de estudio, los modelos de confort térmico y la metodología general del estudio. El **Capítulo 3** presenta el diseño experimental, la estrategia de ahorro de energía, el cálculo de las cargas térmicas, los grados día de enfriamiento y el potencial de ahorros energéticos. El **Capítulo 4** muestra los resultados y análisis de estudio, la simulación térmica del edificio y el análisis del ahorro de energía. El **Capítulo 5** muestra las conclusiones del estudio y las recomendaciones para trabajos futuros.

En lo que respecta a escritura de artículos, se contemplan artículos de congreso nacional e internacional y del tipo JCR. El primer artículo titulado “*Alternativas de climatización para edificios no-residenciales en climas cálidos de México*”, se publicó y presentó en 2021 en congreso nacional. El segundo artículo se tituló “*Preferencias térmicas en edificios educativos en clima tropical en temporada de lluvia*” se publicó en congreso internacional en 2023. El tercer artículo titulado “*Voto de sensación térmica en edificios educativos en un clima tropical para temporada cálida y húmeda*” se publicó en congreso nacional en 2023. El artículo titulado “*Adaptive thermal comfort models comparison in dry and rainy seasons: A tropical climate case*” se publicó en la revista *Energy and Buildings*, en 2025.

Capítulo 2: Materiales y Método

Este capítulo describe el caso de estudio y la metodología para determinar el ahorro de energía implementando modelos adaptativos propuestos. Resaltando los fundamentos teóricos, el caso de estudio, la recolección de datos en campo y los modelos de confort térmico adaptativo.

2.1 Fundamentos teóricos

El confort térmico impacta tanto al bienestar humano como a la eficiencia energética de las edificaciones. Esta sección aborda la base teórica para el desarrollo de los modelos propuestos y cómo influye en el ahorro de energía.

2.1.1 Física del problema

Los modelos de confort térmico adaptativo permiten ajustar la temperatura de consigna, lo cual incide directamente en las cargas térmicas de enfriamiento y los grados día de enfriamiento del edificio. Al incrementar la temperatura de confort en respuesta a la capacidad adaptativa de los ocupantes, se reduce la diferencia de temperatura que el sistema de climatización debe compensar, disminuyendo así el consumo energético. La **Figura 1** muestra un análisis comparativo en las cargas térmicas entre dos enfoques de climatización en un mismo edificio.

- a) Enfoque de referencia, con una temperatura operativa fija T_θ .
- b) Enfoque adaptativo, con una temperatura de confort variable T_c .

En ambos casos, el edificio recibe una carga térmica externa Q_{sol} proveniente de la radiación solar incidente sobre la envolvente, y una carga térmica acumulada Q_{int} . El sistema de refrigeración remueve dicha carga mediante un flujo de extracción Q_T , generando un delta de temperatura ΔT entre el interior y el exterior. En el caso a), al mantener una temperatura operativa de referencia T_θ , la carga térmica de enfriamiento Q_T es mayor, dado que el sistema debe compensar una mayor diferencia térmica. A diferencia de, el caso b) la implementación del modelo adaptativo permite una T_c más elevada $T_c > T_\theta$, lo que reduce la diferencia térmica y, en consecuencia, la carga térmica requerida $Q_{r_mp} < Q_T$. Los modelos de confort térmico basados en el enfoque adaptativo en climas cálidos pueden incrementar la temperatura de confort debido a la capacidad adaptativa de los ocupantes, y así se requiere menor carga térmica de enfriamiento, como lo mencionan diversos autores [33,35,37,38].

Diversos estudios han mencionado que incrementar el punto de ajuste ayuda a generar ahorros del 10.0 -70.0% en la carga térmica de enfriamiento total de una edificación.

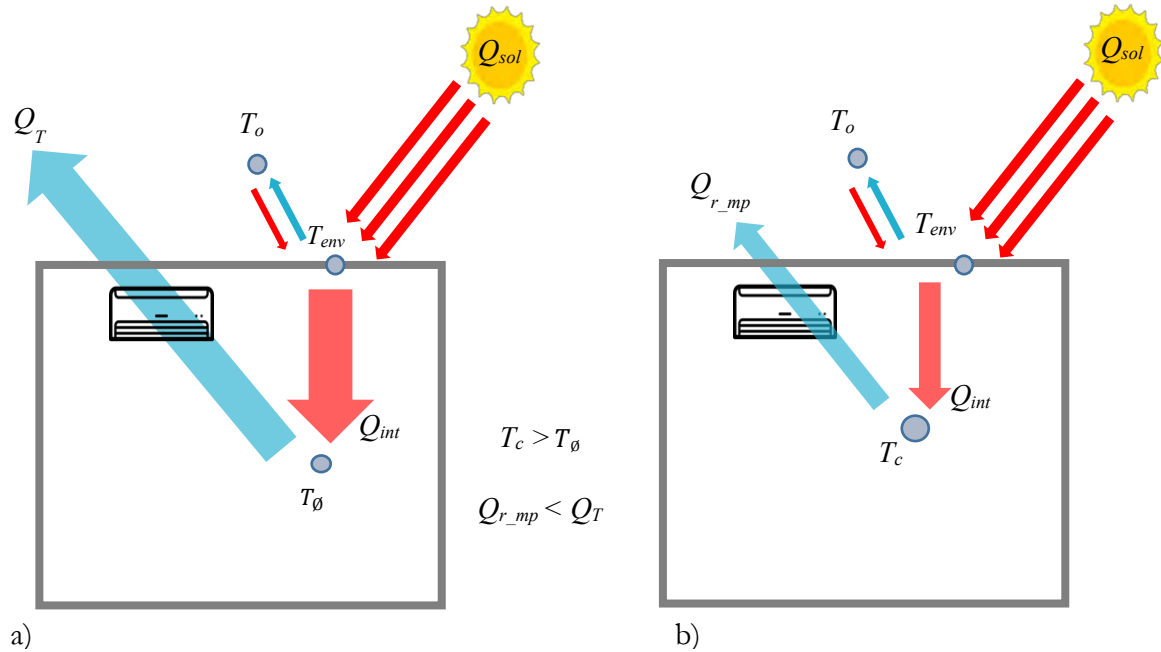


Figura 1. Comparativo de cargas térmicas, a) espacio climatizado con el enfoque de referencia, b) climatización con el enfoque adaptativo.

2.1.2 Intercambio de calor entre el cuerpo humano y el ambiente

La interacción térmica entre el cuerpo humano y su entorno térmico ocurre a través de cuatro mecanismos principales: conducción, convección, radiación y evaporación. A continuación, se describe cada uno, para entender cómo influye el confort térmico en el ahorro de energía.

Conducción

La conducción de calor es un mecanismo de transferencia de energía debido a un gradiente térmico, donde fluye calor del cuerpo con mayor temperatura al de menor temperatura, con el fin de alcanzar un equilibrio térmico. La Ec. (2.1) rige la transferencia de calor por conducción a través de una placa plana, la cual está dada por la ecuación de Fourier.

$$Q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

donde Q_{cond} es el flujo de calor por conducción W , k es la conductividad térmica del material $W/m \cdot K$ (en este caso el aire que rodea el cuerpo), A es el área expuesta al flujo de calor m^2 , $\frac{dT}{dx}$ es la diferencia de temperatura. El cuerpo humano consta de diferentes capas (músculo, hueso, grasa, piel y el arropamiento) cada una con distinta conductividad térmica.

Convección

La transferencia de calor por convección es la transferencia de energía a través del movimiento molecular aleatorio y a la energía que se transfiere mediante el movimiento macroscópico de un fluido. En espacios cerrados, el aire caliente tiende a elevarse mientras que el aire frío desciende, formando corrientes de convección natural. La ventilación natural o mecánica puede ayudar a disipar el calor, reduciendo la necesidad de enfriamiento mecánico. La transferencia de calor entre el cuerpo humano y su ambiente ocurre cuando las moléculas de aire al estar en movimiento, chocan con la piel. La Ec. (2.2) muestra la expresión de la transferencia de calor por convección, la cual se rige mediante la ley de enfriamiento de Newton, que establece que la tasa de pérdida de calor de un cuerpo es proporcional a la diferencia de temperatura entre el cuerpo y el ambiente.

$$Q_{conv} = h_{conv} A (T_s - T_{\infty}) \quad (2.2)$$

donde Q_{conv} es el flujo de calor por convección W , A es el área superficial expuesta y $T_s - T_{\infty}$ es la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido. El h_{conv} es el coeficiente convectivo $W/m^2 \cdot K$ el cual depende de diferentes factores, si es natural depende de las diferencias de temperatura y del tipo de cuerpo y si es forzada depende fundamentalmente de la velocidad del aire.

Radiación

La transferencia de calor por radiación se da por medio de la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas, sin la necesidad de un medio material. En edificaciones, la radiación solar que ingresa a través de ventanas o se absorbe en las superficies puede aumentar la carga térmica.

Los flujos de calor Q que irradian todos los cuerpos es consecuencia directa de su temperatura. La **Ec. (2.3)** expresa cómo la energía radiante E al chocar con un cuerpo, es absorbida A , reflejada R y transmitida T , de acuerdo al principio de conservación de la energía.

$$E=A+R+T \quad (2.3)$$

El cuerpo humano es capaz de regular el calor que es absorbido/ disipado. Las pérdidas de calor ocurren por medio de vasodilatación, estimulación muscular, reducción de velocidad del metabolismo y la producción de hormonas.

Evaporación

La evaporación o evapotranspiración es la pérdida de calor debido a la transpiración del cuerpo en forma de sudor. Cuando el agua se evapora de la superficie corporal, se pierden 0.58 calorías por cada gramo de agua evaporada.

Termorregulación

El hipotálamo es el órgano encargado de regular la temperatura corporal, asegurando que el cuerpo genere y mantenga calor. La temperatura de la piel fundamental de un ser humano está alrededor de 37.0 °C. Sin embargo, la temperatura de la piel varía dependiendo del volumen de sangre, de las cargas de calor metabólicas y ambientales. El calor es producido por el metabolismo como resultado de la actividad física. El calor se libera al medio ambiente por convección (flujo de calor sensible), conducción (contacto con sólidos), evaporación (flujo de calor latente), radiación (onda larga y corta) y respiración (latente y sensible) [51]. El sistema termorregulador puede dividirse en dos subsistemas: el sistema de control activo que incluye las respuestas termorreguladoras de los escalofríos, sudor y regulación del flujo sanguíneo; y el sistema pasivo controlado que se ocupa de la transferencia de calor que ocurre dentro del cuerpo humano y en su superficie.

2.1.3 Parámetros que influyen en el confort térmico

El confort térmico de acuerdo a ASHRAE 55 es “*el estado mental, que expresa satisfacción con el ambiente térmico*”, sin embargo, para que el estado mental pueda expresar satisfacción se requieren de diferentes parámetros ambientales. El confort térmico presenta diferentes parámetros objetivos y subjetivos, del ocupante y del entorno térmico, considerando las características demográficas, las características principales del ocupante, las preferencias térmicas, el monitoreo térmico, los parámetros ambientales exteriores e interiores y el funcionamiento del edificio.

Características de los ocupantes que afectan su confort térmico

Las características demográficas juegan un papel importante en el confort térmico de un ocupante, principalmente factores como la edad, el peso, el género y la estatura del ocupante, así como la ocupación, el nivel socioeconómico y la cultura. Estas características afectan la manera en que los individuos experimentan y regulan su confort térmico en diferente contexto. Las características de los ocupantes como la tasa metabólica, arropamiento y tiempo de residencia son factores que influyen en la satisfacción térmica de los ocupantes.

Nivel de arropamiento

El aislamiento térmico proporcionado por la ropa influye directamente en la cantidad de calor que una persona retiene. La ropa actúa como una barrera térmica entre el cuerpo y el ambiente, modificando la cantidad de calor que el cuerpo puede perder o ganar. La elección de ropa adecuada para las condiciones ambientales puede reducir la necesidad de ajustar las temperaturas interiores y, por ende, el consumo energético. La unidad es el *clo* clothing, esta unidad equivale a una resistencia térmica de $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$. La ropa ofrece una eficaz protección frente a la radiación solar, si es oscura, absorbe la radiación de onda más corta, si la ropa es blanca, son reflejadas. En la **Tabla 1** se presenta el factor de ropa *clo* para distintos tipos de vestimentas, de acuerdo con la norma ISO 7730. El factor de arropamiento I_{clo} es un factor que puede ser estimado directamente de los datos presentados. El

clo es equivalente a una resistencia térmica de $0.15 \text{ W/m}^2\text{K}$. El arropamiento aumenta o disminuye los efectos de los parámetros climáticos, el cual repercute en el intercambio de calor por convección, conducción, evaporación y radiación del individuo.

Tabla 1. Factor de ropa para distintas vestimentas.

Vestimenta	Factor de ropa (clo)
Desnudo	0
Pantalones cortos	0.1
Ropa de verano ligera (pantalón largo y ligero, camisa de cuello abierto y manga corta)	0.5
Conjunto de trabajo ligero (Shorts deportivos, calcetines, camisa de trabajo de algodón, pantalones de trabajo)	0.6
Traje típico de negocios	1
Traje típico de negocios más abrigo de algodón	1.5
Ropa deportiva ligera al aire libre (Camisa de algodón, pantalones, camiseta, pantalones cortos, calcetines, zapatos, chaqueta de popelina de una sola capa)	0.9
Traje de negocios tradicional europeo pesado	1.5

Nivel de actividad

La actividad física de una persona genera calor adicional debido a la energía que consume el cuerpo para realizar trabajo físico. Un aumento en la actividad metabólica, como al realizar ejercicio, eleva la producción de calor, lo que puede hacer que las personas perciban un ambiente más cálido, incluso si la temperatura del aire es la misma. Por tanto, ajustando la temperatura ambiental a los niveles de actividad, es posible mejorar el confort térmico sin necesidad de aumentar el uso de sistemas de climatización. La unidad de medida del calor metabólico es el *met* (metabolic energy termal) que equivale a 50 kcal/hm^2 que corresponde a una persona inactiva. En la **Tabla 2** se presenta la tasa metabólica de distintas actividades, según la norma ISO 7730.

Tabla 2. Tasa metabólica.

Actividad	Tasa metabólica	
	W/m^2	met
Reclinado	46	0.8
Sentado, relajado	58	1.0
Actividad sedentaria (oficina, vivienda, escuela, laboratorio)	70	1.2
De pie, actividad ligera (compras, laboratorio, industria ligera)	93	1.6
De pie, actividad media (asistente de compras, trabajo doméstico, trabajo de máquina)	116	2.0
Caminata 2 km/h	110	1.9
Caminata 3 km/h	140	2.4
Caminata 4 km/h	165	2.8
Caminata 5 km/h	200	3.4

Parámetros ambientales que influyen en el confort térmico

El entorno térmico influye directamente en la satisfacción térmica de los ocupantes, afectando el equilibrio térmico para mantener un confort térmico adecuado [52,53]. Este equilibrio depende de una serie de parámetros ambientales que, al interactuar con las condiciones fisiológicas y de actividad de los individuos, influyen en su sensación térmica y bienestar. A continuación, se describen los principales factores ambientales que afectan directamente este equilibrio.

Temperatura del aire

La temperatura del aire es uno de los parámetros ambientales principales en el confort térmico de un espacio. El organismo de una persona no detecta la temperatura del aire, si no las pérdidas o ganancias de calor [54,55]. Estas transferencias ocurren por convección, y están influenciadas por la diferencia de temperatura entre la piel y el aire, la velocidad del flujo de aire y la humedad. Temperaturas del aire muy altas o muy bajas, sin control de los demás parámetros, pueden generar incomodidad térmica o incluso estrés térmico.

Velocidad del aire

La velocidad del aire es un flujo de aire en una determinada dirección, se expresa en unidades de m/s . Según ASHRAE, para que un ambiente obtenga condiciones de confort, la velocidad del aire debe ser de $0.15 m/s$, este valor cambia según las estaciones de verano o invierno, y de las condiciones de operación del edificio [54].

Verano: velocidades hasta $0.25 m/s$ son aceptables, ya que el movimiento del aire incrementa la pérdida de calor corporal. En edificios con ventilación natural, velocidades mayores (hasta $0.8 m/s$) pueden ser toleradas si los ocupantes tienen control sobre ventanas o ventiladores [56].

Invierno: velocidades $\leq 0.15 m/s$ para evitar corrientes frías, que exacerbaban la sensación de discomfort en ambientes cálidos [57].

Humedad relativa

La humedad relativa mide la cantidad de vapor de agua presente en el aire en relación con la cantidad máxima que el aire puede contener a una temperatura dada. En un ambiente caluroso, si los valores son altos, impiden que el cuerpo humano pierda calor por evaporación, es decir, por el sudor, pero si son muy bajos el organismo se puede deshidratar. La norma ISO 7730 [56] recomienda un rango de humedad relativa del 30.0-70.0%. El Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios aconseja por razones sanitarias mantener la humedad relativa dentro del campo del 40.0 al 60.0% [58].

Temperatura media radiante

La temperatura media radiante describe la temperatura promedio de todas las superficies que rodean a una persona (paredes, techo, piso, ventanas) que pueden emitir radiación térmica hacia el cuerpo. Su valor se obtiene en función de la temperatura del aire, la temperatura seca del aire y la velocidad del aire [15]. El cálculo de la temperatura media radiante se expresa con la **Ec. (2.4)**.

$$T_{rm} = T_{globo} + 1.9 (T_{globo} - T_{sa}) \sqrt{v_{ar}} \quad (2.4)$$

donde T_{globo} es la temperatura del globo, V_{ar} es la velocidad del aire y T_{sa} es la temperatura seca del aire.

2.1.4 Modelos de confort térmico adaptativo existentes en la literatura

Diversos investigadores han desarrollado modelos de confort térmico, en la literatura se puede observar que existen dos enfoques; el enfoque estático y el adaptativo [59–61]. Sin embargo, las limitaciones del modelo son que no se pueden utilizar en ambientes no uniformes, en lugares con ventilación natural, lugares para dormir, ni para niños y/o adultos mayores [43].

En la **Tabla 3** se presentan las principales diferencias entre los modelos de confort térmico basados en los dos enfoques, estático y adaptativo.

Tabla 3. Diferencias entre los modelos de confort térmico estático y adaptativo.

Estático	Adaptativo
Estudios en laboratorio bajo condiciones controladas	Estudios de campo en condiciones reales
Modelo basado en el intercambio térmico entre el cuerpo humano y su ambiente	Modelos estadísticos basados en datos obtenidos en campo
Mediciones en los cambios fisiológicos	Toma de datos subjetivos sobre la sensación de confort del ocupante
Ineficientes en condiciones con ventilación natural	Consideran ventilación natural, aire acondicionado y modo mixto.

Los modelos basados en el enfoque adaptativo se han esparcido en diferentes regiones climáticas, considerando diferentes culturas, factores psicológicos y fisiológicos. La temperatura es una de las variables más utilizadas en los estudios, por lo general, la correlación de la temperatura de confort y la temperatura media de funcionamiento exterior es la más utilizada [1,43]. En la **Tabla 4** se presentan los modelos de confort térmico adaptativo que se han desarrollado en diferentes regiones climáticas y para diferentes tipos de edificio utilizando la relación entre la temperatura de confort y la temperatura exterior.

Tabla 4. Modelos de confort térmico adaptativo para diferentes regiones y edificios.

Clima/Región	Tipo de edificio	Condiciones	Modelo	Observaciones
Árido	Edificios residenciales	VN	$T_c=0.59 \cdot T_{rm} + 11.62$	-
Trópico húmedo		AC	$T_c=0.59 \cdot T_{rm} + 9.60$	-
		VN	$T_c=0.47 \cdot T_{rm} + 14.07$	
		AC	$T_c=0.47 \cdot T_{rm} + 9.07$	
		VN	$T_c=0.96 \cdot T_{rm} - 3.6$	
Trópico seco		AC	$T_c=0.96 \cdot T_{rm} -5.62$	
cálido sub-húmedo	Edificios educativos	VN	$T_c=0.32 \cdot T_{rm} + 18.45$	$29.3 \pm 2.6^{\circ}C$
		AC	$T_c=0.13 \cdot T_{rm} + 22.70$	$27.4 \pm 1.9^{\circ}C$
Clima cálido	Ventilación natural	VN	$T_c=0.341 \cdot T_{rm} + 18.83$	$26-34^{\circ}C$
Clima cálido	Hospitales	AC	$T_c=0.33 \cdot T_{out} + 14.85$	$23.3-26.5^{\circ}C$
Clima cálido	Apartamentos	VN	$T_c=0.506 \cdot T_{out} + 11.39$	$26-32.45^{\circ}C$
Pakistán	No residenciales	AC	$T_c=0.534 T_{out} + 11.9$	-
-	Edificios de oficina	Ventilación natural	$T_c=0.54 \cdot T_{rm} + 12.83$	$19.6-28.5^{\circ}C$
		Modo mixto	$T_c=0.28 \cdot T_{rm} + 17.87$	$21.5-28.7^{\circ}C$

2.2 Caso de estudio

El caso de estudio se seleccionó partiendo del clima con mayor predominancia y consumo eléctrico por m^2 , en una localidad económicamente representativa en México, tomando en cuenta un edificio con alto requerimiento de enfriamiento para su operación. Hoy en día, los edificios educativos representan a la sociedad un espacio para una de las actividades sociales más importantes para el desarrollo humano. Los edificios mayormente evaluados para estudios de confort térmico son los destinados a oficinas y universidades, esto se debe a la búsqueda de la eficiencia laboral y la salud de los ocupantes, ya que en muchos países las regulaciones de seguridad laboral se hacen cada vez más estrictas.

2.2.1 Climas predominantes en México

El tipo de clima se seleccionó considerando el mayor porcentaje de predominancia en la República mexicana y mayor consumo energético. El territorio mexicano se ubica geográficamente en dos áreas separadas por el trópico de cáncer, este paralelo separa climáticamente al país en una zona tropical y una templada. En general, el clima depende principalmente de la altitud, la latitud y la distribución existente de tierra y agua. Por su geografía, México cuenta con una gran diversidad de climas, los cuales, en general, se clasifican según su temperatura en: cálido, templado y frío; y de acuerdo con la humedad en: húmedo, subhúmedo y seco [62,63]. La **Tabla 5** presenta el tipo de clima con su respectivo porcentaje de ocupación en el territorio mexicano, los datos son tomados de Prieto (2015) [64]. El que presenta mayor cobertura en México es el clima cálido seco, abarcando el 28.3%. El clima cálido subhúmedo ocupa el 23.0%, cálido muy seco 20.8%, templado subhúmedo 20.5%, cálido húmedo 4.7% y el templado húmedo el 2.7%. Los climas cálidos ocupan la mayor parte del territorio mexicano con un 76.8%, mientras que los templados únicamente presentan el 23.2% [62].

Tabla 5. Tipo de clima y porcentaje que ocupa en el territorio mexicano.

Tipo de clima	Porcentaje que ocupa en el territorio mexicano (%)
Cálido seco	28.3
Cálido subhúmedo	23.0
Cálido muy seco	20.8
Templado subhúmedo	20.5
Cálido húmedo	4.7
Templado húmedo	2.7

Consumo energético por tipo de clima

La **Figura 2** presenta el consumo eléctrico actual por metro cuadrado en los distintos climas cálidos de la República Mexicana. Es de observar que, en el clima cálido seco extremoso se encuentra el más alto consumo energético debido a un alto gasto de recurso en la climatización. El mayor consumo energético por metro cuadrado en el clima cálido seco extremoso llega a ser de $121 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$, seguido del consumo en el clima seco con $95 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$, cálido húmedo $93 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$ y subhúmedo $84.0 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$. También, el clima cálido seco y muy seco representa la mayor parte del territorio mexicano con un 49.0% siendo que ahí el consumo energético es más alto por metro cuadrado con $121 \text{ kWh/m}^2\text{-año}$ [65]. Con lo anterior se observa que el clima cálido seco extremoso no solo presenta el mayor consumo energético por metro cuadrado en México, sino que también abarca gran parte del territorio nacional, lo que resalta la importancia de implementar estrategias de eficiencia energética en estas regiones.

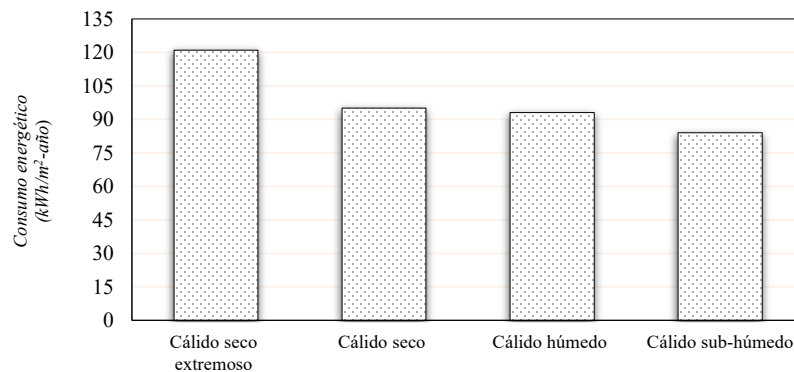


Figura 2. Tipo de clima y consumo eléctrico por metro cuadrado.

2.2.2 Edificios representativos

Hoy en día, los edificios educativos representan a la sociedad un espacio para una de las actividades sociales más importantes para el desarrollo humano [66]. La educación juega un papel importante en el desarrollo y en el crecimiento económico de un país [67], es por ello que, para este trabajo se considera en el estudio un edificio educativo de nivel universitario. Por ende, un clima confortable y saludable en edificios educativos es indispensable para el rendimiento y aprendizaje de los estudiantes [68]. En México, las edificaciones representan un gran porcentaje del consumo de energía eléctrica y tienen la mayor densidad de ocupación, siendo de $0.14 \text{ personas/m}^2$, considerando las escuelas, los centros de cultura y los centros de investigación [67]. Los edificios mayormente evaluados para estudios de confort térmico son los destinados a oficinas y universidades, esto se debe a la búsqueda de la eficiencia laboral y la salud de los ocupantes, ya que en muchos países las regulaciones de seguridad laboral se hacen cada vez más estrictas. La **Figura 3** presenta el porcentaje actual de estudios con el enfoque adaptativo en los diferentes tipos de edificios, a lo largo de todo el mundo. Los edificios de oficina representan el 27.0% del total, los universitarios, tomando en cuenta a los alumnos, al personal administrativo, los dormitorios, entre otros espacios con un 24.0%, los residenciales con un 21.0%, los de escolares para menores de 15 años con un 15.0% y los edificios con adultos mayores y otros edificios representan cada uno el 6.0%. Con lo anterior se observó que las edificaciones educativas son considerables en el consumo energético del país.

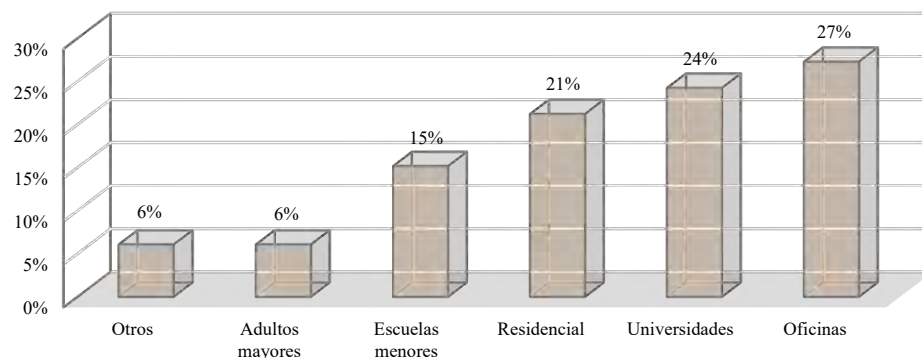


Figura 3. Porcentaje de edificios estudiados mediante el enfoque adaptativo.

2.2.3 Localidades representativas en México

La localidad de estudio se eligió de acuerdo a los GDE, el nivel de competitividad y el potencial de enfriamiento en los diferentes climas cálidos secos de México. Las regiones con climas se clasifican de acuerdo a Köppen [69], los *GDE* de acuerdo a la base de datos de la Conuee [70], el nivel de competitividad de acuerdo al IMCO [71] y el potencial de enfriamiento por zona térmica se consideró de acuerdo al INEGI [72]. El nivel de competitividad de acuerdo al IMCO considera el *PIB*, la población y la capacidad de atraer y retener inversión. Adicionalmente a lo anterior, también se consideraron las facilidades logísticas para la realización del estudio de campo. Las ciudades de estudio consideradas para el estudio son Torreón, Hermosillo, Mazatlán y Ensenada, por su alto consumo energético en la climatización y por su nivel de competitividad considerando la capacidad de inversión y el *PIB*.

La **Tabla 6** muestra las regiones con clima cálido seco y sus respectivos indicadores. Las ciudades con mayor GDE son: Mazatlán, los Mochis y Mexicali con 5,469; 5,270 y 5,003 GDE-año, con niveles de competitividad “adecuada”, “media baja” y “adecuada”, respectivamente. El nivel de competitividad más alto lo tienen Monterrey y CDMX. Para el potencial de enfriamiento, la mayoría de las ciudades seleccionadas se encuentran en la Zona 4 con 5.63 kWh-m^2 , excepto Querétaro estando en la Zona 2 con 4.22 kWh-m^2 y Aguascalientes y León considerándose en la Zona 1, con 4.68 kWh-m^2 . Adicionalmente a lo anterior, las facilidades logísticas también se consideraron para la realización del estudio de campo.

Tabla 6. Ciudades de México representativas para el estudio.

<i>Clima Árido</i>	<i>Köppen-Geiger</i>	<i>Regiones</i>	<i>Instituciones TecNM</i>	<i>GDE-cool</i>	<i>GDE-heat</i>	<i>Competitividad</i>	<i>Potencial de enfriamiento kWh-m²</i>
<i>Climas semiáridos cálidos</i>	<i>BSh</i>	<i>Aguascalientes</i>	<i>ITA</i>	2,776	1,446	<i>Media alta</i>	4.68
		<i>León</i>	<i>ITL</i>	3,365	1,259	<i>Media alta</i>	4.68
		<i>Monterrey</i>	<i>ITNL</i>	4,332	575	<i>Alta</i>	5.63
		<i>Monclova</i>	<i>ITSM</i>	3,797	967	<i>Media alta</i>	5.63
		<i>Querétaro</i>	<i>ITQ</i>	3,201	1,100	<i>Adecuada</i>	4.22
		<i>Chihuahua</i>	<i>ITCH</i>	3,134	1,319	<i>Media alta</i>	5.63
		<i>Mazatlán</i>	<i>ITMaz</i>	5,469	348	<i>Adecuada</i>	5.63
<i>Climas cálidos del desierto</i>	<i>BWh</i>	<i>Mexicali</i>	<i>ITM</i>	5,003	689	<i>Adecuada</i>	5.63
		<i>Hermosillo</i>	<i>ITH</i>	4,805	811	<i>Adecuada</i>	5.63
		<i>Torreón</i>	<i>ITT</i>	4,237	700	-	5.63
		<i>SLRC</i>	-	4,760	800	-	5.63
		<i>Los Mochis</i>	<i>ITLM</i>	5270	368	<i>Media baja</i>	5.63

Con lo anterior, el caso de estudio se centra en Torreón, una ciudad mexicana con un clima semidesértico, ubicada en el noreste a 25°61'25"N de latitud, 103°37'39"O de longitud y 1124 metros sobre el nivel del mar. Típicamente, Torreón experimenta veranos largos y calurosos e inviernos frescos y secos, comportándose como una de las ciudades mexicanas más secas y cálidas. El clima predominante es seco, cálido y muy seco, según INEGI [36], y cálido semidesértico BWh, según la clasificación de Köppen-Geiger [37]. La velocidad media del viento es de aproximadamente 2.3 m/s durante la primavera y el verano, mientras que desciende a 1.7 m/s en otoño e invierno. La temporada de lluvias abarca la primavera, el verano y el otoño, con una precipitación media anual de 100-400 mm [38]. Las principales características del clima seco son una temperatura media anual de 18.0 a 30.0 °C y precipitaciones anuales de 300 a 600 mm [39]. A partir de los datos meteorológicos, la **Figura 4** muestra las condiciones ambientales medias (temperatura y humedad relativa). La temperatura media del aire exterior es de 26.4 °C y la humedad relativa es del 51.6% en septiembre.

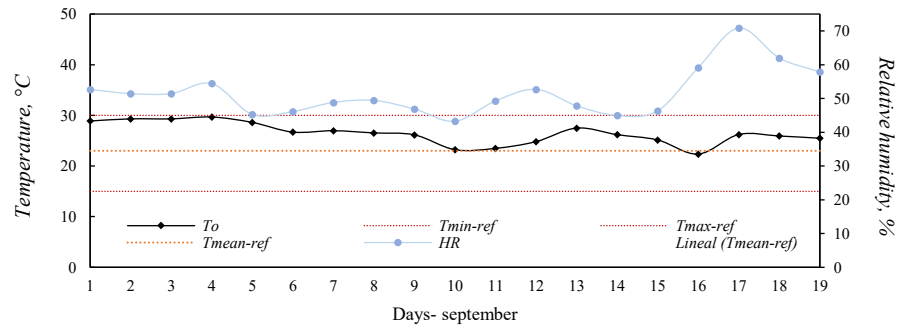


Figura 4. Condiciones ambientales de la ciudad de Torreón.

La **Figura 5** muestra las condiciones de la temperatura ambiental exterior de la ciudad de Torreón. La parte sombreada azul presenta la temporada de verano en Torreón la cual comienza el 20 de junio al 22 de septiembre, y la parte sombreada amarilla la temporada de aplicación de encuestas, del 3 al 22 de septiembre de 2023. Los puntos presentan la media de la temperatura exterior, es de observar que, la temporada de verano representa los puntos máximos, siendo constantes a lo largo de la temporada, para el estudio se considera el último mes de la temporada, la cual no presenta cambios significativos para considerar.

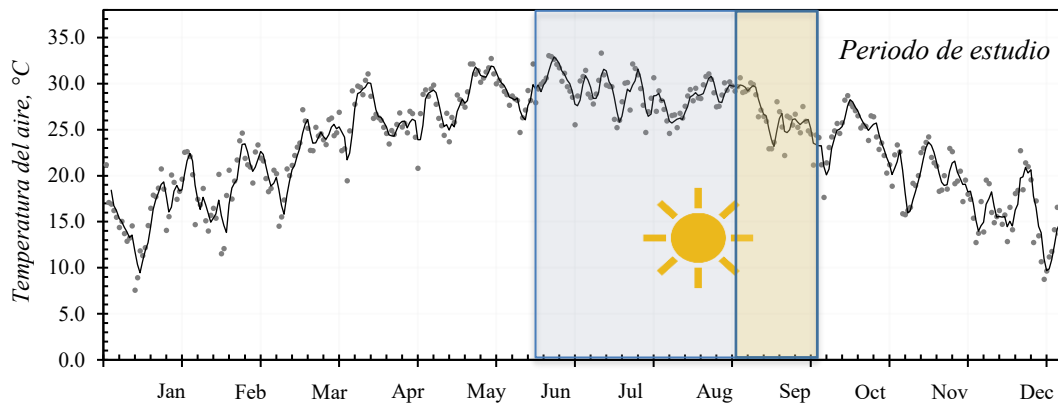


Figura 5. Temperatura anual de Torreón, Coahuila.

El caso de estudio abarca 17 edificios del Tecnológico Nacional de México-Torreón TecNM-ITT. La **Figura 6** muestra un mapa de ubicación e imágenes de la configuración arquitectónica. Los edificios incluyen aulas, cubículos, oficinas administrativas, laboratorios y bibliotecas.



Figura 6. Lugar y edificios de estudio, ITT, Torreón, Coahuila.

2.3 Recolección de datos en campo

La recolección de datos de campo implica el desarrollo de un cuestionario de confort y mediciones ambientales interiores alrededor de 17 edificios educativos. Considerando un muestreo transversal, durante la temporada de verano, la recolección de datos se llevó a cabo del 3 al 22 de septiembre de 2023, durante los días hábiles (8:00 *a. m* - 2:00 *p. m.*), mediante encuestas individuales aleatorias. La encuesta debe estar dentro del edificio durante 10 minutos sin cambiar de actividad, ser mayor de edad y no tener problemas de salud. La población tiene 700 encuestas, 584 estudiantes, 77 maestros y 39 personal administrativo. Las encuestas realizadas en auditorios no contemplan estrategias para evitar la influencia de tendencias grupales. Una evaluación de muestra representativa es por la **Ec. (2.5)**, considerando una distribución normal con un nivel de confianza del 95.0%, probabilidad de éxito de 0.5, probabilidad de fracaso de 0.5 y rango de error del 4.1%, siguiendo a [36].

$$n = \frac{Z^2 Npq}{E^2(N - 1) + Z^2 pq} \quad (2.5)$$

n es el tamaño de la muestra, N es el tamaño de la población, Z es el nivel de confianza, E es el error de cálculo, p es la probabilidad de éxito y q es la probabilidad de fracaso, la ecuación siguió los trabajos de López Pérez *et al.* [73,74]. La muestra representativa se determinó en 340 ocupantes según la ecuación, lo que representa aproximadamente el 48.0% de la población total. La encuesta es transversal y se basa en el método aleatorio simple con elementos sin reemplazo. En la **Figura 7** se presentan las seis etapas que se consideraron para el análisis de datos. La primera etapa es determinar la muestra representativa, la segunda etapa es la validación de los datos, seguido de la limpieza de datos y el pre-procesamiento, posterior se realiza el modelado térmico para al fin obtener la predicción del confort térmico.

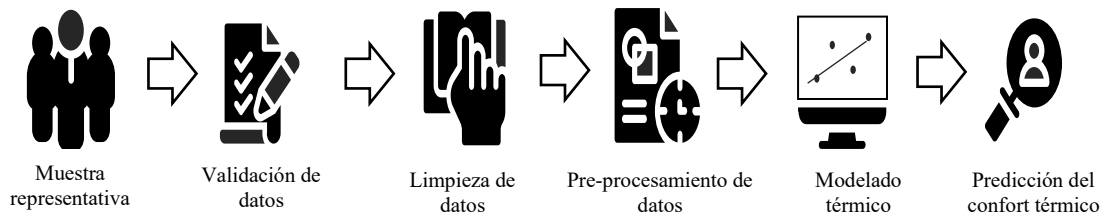


Figura 7. Etapas del análisis de datos para obtener el modelado térmico.

2.3.1 Cuestionario de confort térmico

El software Google Forms facilita la gestión del cuestionario térmico. El cuestionario considera el enfoque adaptativo, siguiendo [15,74,75]. El cuestionario incluyó parámetros demográficos, subjetivos y objetivos de los ocupantes, como se muestra en la **Figura 8**. Los parámetros demográficos son edad, sexo, peso y altura. Los parámetros subjetivos son Voto de Sensación de Humedad VSH, Preferencia de Humedad PH, Voto de Sensación de Velocidad del Aire VSV, Preferencia de Velocidad del Aire PV y Aceptación Térmica AT. Los parámetros objetivos son el aislamiento de la ropa I_{clo} y el nivel de actividad met , siguiendo las directrices descritas en ISO [38] y ASHRAE Standard-55 [39]. I_{clo} equivale a $0.155 \text{ m}^2 \text{ K/W}$, y el nivel de actividad se mide en met , que representa el coste energético de estar sentado tranquilamente, con un consumo de una $kcal/kg \text{ h}$.

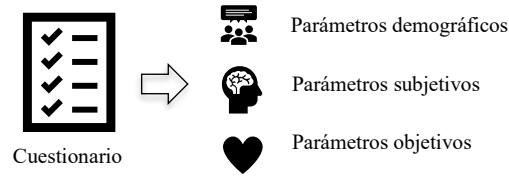


Figura 8. Parámetros del cuestionario de confort térmico.

La **Tabla 7** muestra las respuestas para el Voto de Sensación Térmica VST considerando la escala de siete puntos del estándar ASHRAE 55 [54], mientras que la Preferencia Térmica PT sigue la escala de cinco puntos [76]. Las respuestas para los parámetros subjetivos siguieron a Singh *et al.* [77] y López-Pérez *et al.* [74]. La TA se categorizó como aceptable o inaceptable. Otro factor abordado en el cuestionario fue la adaptación personal. Hacia el final de la encuesta, se preguntó a los ocupantes sobre los métodos que emplean para adaptarse a su entorno térmico, esta pregunta intencionalmente se dejó abierta.

Tabla 7. Escala de respuestas en el cuestionario subjetivo.

Scale	VST	PT	VSH	PH	VSV	PV
-3	Frío		Muy seco		Muy bajo	
-2	Fresco	Mucho más cálido	Seco	Mucho más seco	Bajo	Menos movimiento de aire
-1	Ligeramente fresco	Un poco más cálido	Ligeramente seco	Un poco más seco	Ligeramente bajo	Un poco menos de velocidad de aire
0	Neutro	Sin cambio	Ni húmedo ni seco	Sin cambio	Ni alto ni bajo	Sin cambio
1	Ligeramente cálido	Un poco más fresco	Ligeramente húmedo	Un poco más húmedo	Ligeramente alto	Un poco más de movimiento de aire
2	Cálido	Mucho más fresco	Húmedo	Mucho más húmedo	Alto	Mucho más movimiento de aire
3	Caluroso		Muy húmedo		Muy alto	

VST: Voto de Sensación Térmica, PT: Preferencia Térmica, VSH: Voto de Sensación de Humedad, PH: Preferencia de Humedad, VSA: Voto de Sensación de Aire, PV: Preferencia de Velocidad del Aire

En el cuestionario, la sensación térmica se evalúa con la escala de los siete puntos que se mencionan en la norma ISO 7730 [78], las cuales van de: muy frío, frío, fresco, neutral, ligeramente caluroso, caluroso y muy caluroso. La sensación térmica deseada se evalúa preguntando si el ocupante desea que la temperatura interior sea: más baja, mantenida o más alta. La sensación de humedad se evalúa con una escala que contempla los siguientes puntos: muy húmeda, húmeda, ligeramente húmeda, neutral, ligeramente seco, seco y muy seco. La sensación de humedad deseada se evalúa preguntando si el ocupante desea que la humedad sea: más baja, mantenida o más alta. La sensación de velocidad del aire se evalúa con la escala de: muy alto, alto, ligeramente alto, neutral, ligeramente bajo, bajo y muy bajo. La sensación de velocidad del aire deseada se evalúa preguntando si el ocupante desea que

el flujo de aire sea: más bajo, mantenido o más alto. La preferencia térmica se evalúa preguntando al ocupante como siente su nivel de comodidad térmica del ambiente interior actual tomando la escala de: muy cómodo, moderadamente cómodo, ligeramente cómodo, cómodo, ligeramente incómodo, incómodo o muy incómodo. Además, al ocupante se le cuestiona sobre la temperatura percibida en el momento en el que se realiza la encuesta y la temperatura que desea para estar cómodo térmicamente.

Mediciones térmicas en interiores y exteriores

Durante el estudio, se midieron las variables térmicas interiores temperatura ambiente T_a , temperatura del globo T_g , Humedad relativa HR , Velocidad del aire V_a mediante sensores digitales, siguiendo la norma ISO 7243 [79] en edificios en funcionamiento aire acondicionado AC y ventilación natural VN. T_a , T_g y HR se midieron con sensores SHT75 de Sensirion, con una precisión de $\pm 0.3^\circ\text{C}$ y $\pm 1.8\%$, respectivamente. Las mediciones de la velocidad del aire V_a se realizaron con un anemómetro de hilo caliente Testo 405i Wireless Smart Probe con una precisión de $\pm 0.1\text{ m/s}$. Las variables térmicas se tomaron a la altura de la cabeza (1.1 m sentado y 1.7 m de pie), a la altura de la cintura (0.6 m sentado y 1.1 m de pie) y a la altura del tobillo (0.1 m). Los sensores se colocaron a una distancia de 10-20 cm del sujeto para todas las mediciones. El tiempo de estabilización de la medición es de 10 min, y todas las mediciones se realizaron por triplicado para fines comparativos [74]. Las variables térmicas exteriores (T_m , HR , V_a) se obtuvieron de una base de datos de un año meteorológico típico [80]. Se recopilaron trescientos cuarenta conjuntos de datos, cada uno con mediciones térmicas objetivas interiores y exteriores. Para determinar los parámetros térmicos interiores se utilizan instrumentos de medición, los cuales se presentan en la **Tabla 8**, mencionando la variable medida, el instrumento utilizado y la precisión de acuerdo a la norma internacional ISO 7726. Las variables interiores son: la temperatura del aire (T_a), la humedad relativa (HR), la temperatura de globo (T_g), y la velocidad del aire (V_a). Los sensores para medir la T_a y T_g concuerdan con las especificaciones de la norma ISO 7243 (2017). La V_a se registra con un anemómetro con resolución de 0.01 m/s y precisión de ± 0.02

m/s . Las mediciones de T_a , T_g , HR y V_a se realizan en concordancia con la norma ISO 7243 (2017), como se muestra en la **Figura 9**. Las mediciones son a la altura de la cabeza, de la cintura y de los tobillos de los encuestados. La medición a la altura de la cabeza se realiza a $1.1\ m$ sentado y a $1.7\ m$ de pie; en la cintura a $0.6\ m$ de altura si está sentado, o a $1.1\ m$ de pie y en el tobillo es a $0.1\ m$ de altura. Las tres mediciones tomadas del tobillo, cintura y cabeza se promedian para obtener un dato con mayor exactitud. Los sensores se colocan a $10.0\text{-}20.0\ cm$ de distancia del encuestado. El tiempo de estabilización del equipo de medición es de $10\ min$.

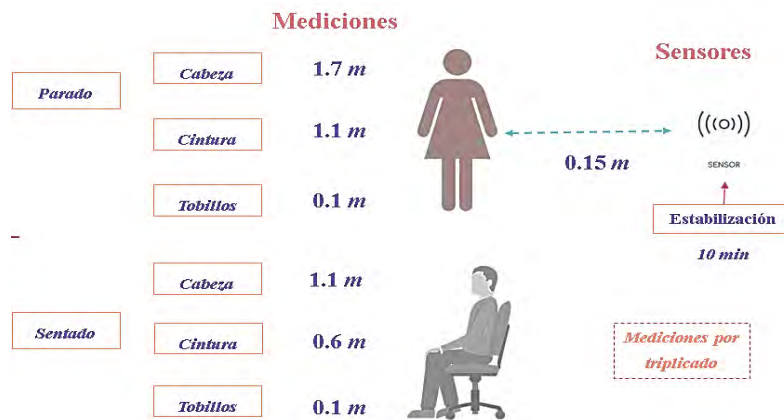


Figura 9. Estrategia de toma de datos en campo.

Al momento de aplicar las encuestas, los ocupantes deben mostrar un buen estado de salud general y haber permanecido al menos 10 minutos dentro del edificio, realizando el mismo nivel de actividad [1]. En este estudio, las personas enfermas se omiten, porque requieren una temperatura, humedad y velocidad del aire especiales para lograr el confort térmico.

Tabla 8. Instrumentación para el estudio de campo.

Variable	Nomenclatura	Instrumento	Precisión
Temperatura interior	T_{int}	Termómetro e higrómetro de mano	$0.2\ ^\circ C$
Humedad relativa	HR	Termómetro e higrómetro de mano	$\pm 0.5\ ^\circ C$
			$\pm 0.2\ ^\circ C$
Velocidad del viento	V_v	Anemómetro eléctrico de bombilla	$0.02\ m/s$
Temperatura del globo	T_g	-	-
Temperatura del bulbo negro	T_{bn}	-	-
Temperatura de operación	T_{op}	T_{op} se deriva de la T_{amb}	$0.2\ ^\circ C$

2.3.2 Construcción de la base de datos

En la **Figura 10** se presenta la estrategia utilizada para llegar a la integración de la base de datos, la cual, una vez integrada se manejó en formato Excel. En la estrategia, el primer paso es la colocación de equipos en el lugar de aplicación de la encuesta. El segundo paso es realizar la encuesta a cada ocupante, la encuesta contiene fecha, hora, lugar, características demográficas, vestimenta, actividad, modo de operación del edificio, sensación térmica, preferencia térmica, medidas de adaptación temperatura deseada y temperatura percibida; en total son 30 datos que se registran en cada encuesta. En el tercer paso, las mediciones se realizan considerando el estándar internacional ISO 7730 [78], en donde se toma la temperatura ambiente, la temperatura del globo, la humedad relativa y la velocidad del viento. El siguiente paso, la temperatura ambiente, la humedad relativa y la velocidad del viento se registran según el correspondiente año típico meteorológico, de acuerdo a la base de datos de Meteonorm V8 [80]. La temperatura radiante media, la temperatura de operación y la temperatura de corriente exterior se calculan para cada uno de los datos.

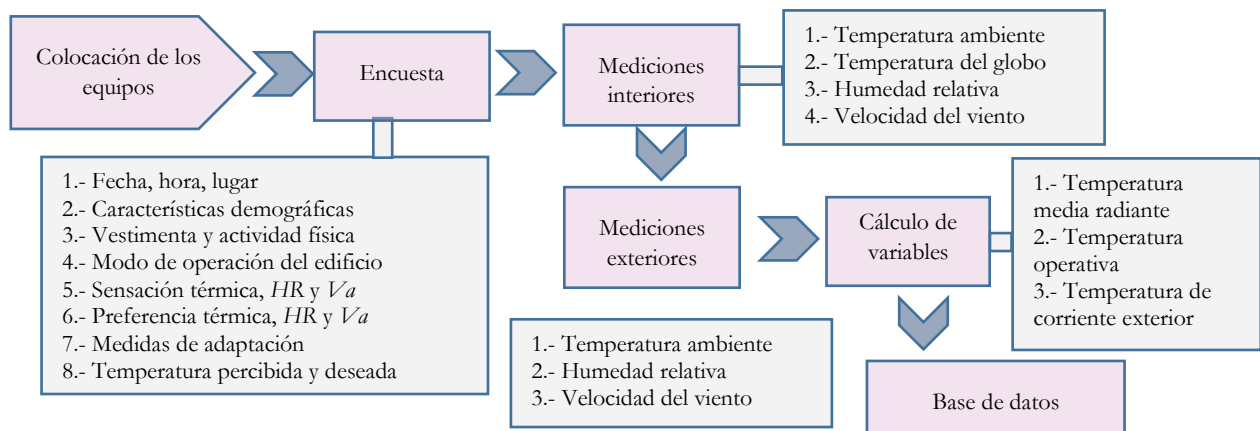


Figura 10. Estrategia para la construcción de la base de datos.

2.3.3 Procesamiento y pre-análisis de datos

Para el procesamiento de datos, la primera etapa consistió en la construcción de la base de datos, en donde se vaciaron los datos recolectados en campo a un libro de Excel. Los datos fueron fecha, hora, lugar, datos demográficos, datos subjetivos y objetivos, así como, los parámetros ambientales interiores recolectados en sitio; y los parámetros ambientales exteriores tomados de un año típico meteorológico y variables calculadas para el método de Griffiths. En el tratamiento de datos se rellenan los datos faltantes mediante técnicas estadísticas, se analizan y corrigen los datos fuera de intervalo y datos que no coinciden con los resultados. Cuando la base de datos se completa se calcula la temperatura de confort con el método de Griffiths. Posteriormente, la correlación entre la temperatura de confort y la temperatura radiante media exterior se determina como se muestra en la

Figura 11.

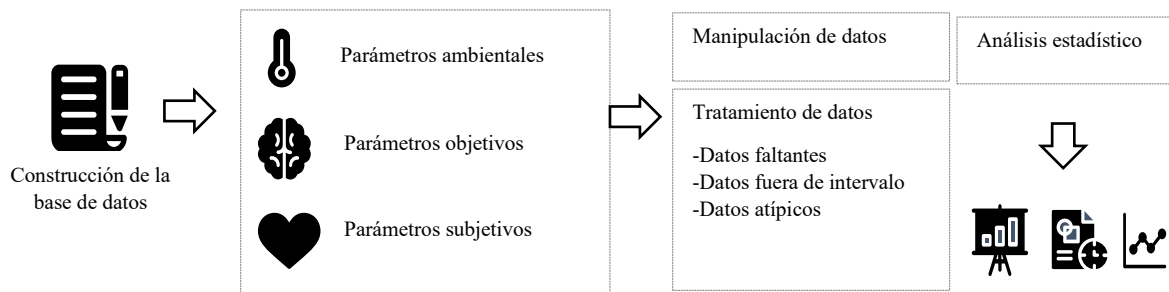


Figura 11. Pre-procesamiento de la base de datos.

El coeficiente de correlación de Pearson r se utilizó para evaluar la relación entre las variables que afectan la comodidad en ambos modos, **Ec. (2.6)**.

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (2.6)$$

x_i es la variable x en la muestra; $\bar{x}$ el valor medio de la variable x ; y_i es el valor de la variable y en la muestra; $\bar{y}$ el valor medio de la variable y , r varía ± 1.0 , donde las correlaciones con r mayor que ± 0.8 están altamente correlacionadas [76]. La evaluación de correlación se visualiza a través de un mapa de calor, esto para la selección de las variables predictoras para el modelado lineal y programación

genética, donde el segmento superior de la matriz denota VN, mientras que el segmento inferior representa AC. Las variables incluidas en el análisis son VST, T_{rm} , T_m , T_{op} , T_{mrt} , T_g , T_a , HR , Va , I_{clo} , met y T_c . La conducción del análisis de importancia implica resultados de evaluación de correlación enfocados en T_c , con porcentaje de 0-100% para una visualización más eficiente.

Suavizado

El método de Savitzky-Golay fue utilizado para suavizar los datos de temperatura de confort y temperatura radiante media exterior, con el objetivo de reducir el ruido y preservar las características principales de las series temporales. Este método ajusta un polinomio de segundo orden a una ventana móvil de datos, lo que permite mantener las tendencias subyacentes sin distorsionarlas. La ecuación general del método de Savitzky-Golay está dada por la Ec. (2.7):

$$\hat{y}_i = \sum_{j=-k}^k c_j y_{i+j} \quad (2.7)$$

$\hat{y}_i$ es el valor suavizado, y_i es el valor original, c_j son los coeficientes del polinomio ajustado y k es el número de puntos a cada lado del valor central. Para este estudio, se seleccionó una ventana de suavizado de tamaño adecuado y un polinomio de grado 2, priorizando la conservación de los picos y variaciones significativas. Posteriormente, los datos suavizados fueron utilizados en el ajuste de un modelo de regresión lineal, evaluando los coeficientes de determinación R^2 y la significancia estadística. Este enfoque resulta adecuado en estudios de confort térmico, donde la subjetividad de los ocupantes introduce variabilidad, y el suavizado permite una mejor interpretación de la relación entre T_c y T_{rm} .

2.4 Modelos de confort térmico adaptativo

Los modelos de confort térmico se han desarrollado para predecir las respuestas térmicas de las personas, estos modelos buscan establecer una relación entre la sensación de confort térmico de los

ocupantes y las variables ambientales. El modelado de la temperatura de confort permite comprender la relación de las condiciones ambientales con el efecto de la sensación térmica.

Existen diferentes técnicas para modelar la temperatura de confort, desde métodos simples como la regresión lineal, hasta enfoques más complejos como k vecinos más cercanos, redes neuronales y programación genética. Las diferentes técnicas pueden ofrecer diferentes perspectivas y predicciones más precisas.

2.4.1 Estimación de la T_c con método de Griffiths

Para determinar la T_c se considera el método de Griffiths, de acuerdo a la Ec. (2.8) [5].

$$T_c = T_{op} + \frac{(0 - VST)}{\alpha} \quad (2.8)$$

donde VST representa el voto de sensación térmica (tomado de la encuesta del estudio de campo, usando la escala de siete puntos del ASHRAE standard 55, de ± 3 [81], T_{op} es la temperatura operativa, “0” representa el voto de sensación térmica neutra adimensional, α es la tasa de cambio adimensional del voto de sensación térmica con la temperatura interior. La selección de α considera la variación entre 0.25 y 0.50 siguiendo a Humphreys *et al.* [82]. La T_{op} se determina con la Ec. (2.9).

$$T_{op} = \frac{h_c \times T_a + h_r \times T_{mrt}}{h_c + h_r} \quad (2.9)$$

donde T_a es la temperatura interior en grados Celsius, la T_{mrt} temperatura radiante media en grados Celsius; h_c es el coeficiente convectivo siguiendo ASHRAE 55 [81] y h_r toma el valor de $4.7 \text{ W/m}^2\text{°C}$, teniendo en cuenta un coeficiente de absorción de ropa de 0.95 [74] y cambios significativos de T_a . La T_{mrt} se determina con la Ec. (2.10), siguiendo Mishra and Ramgopal [83].

$$T_{mrt} = \left[(T_g + 273)^4 + \frac{1.1 \times 10^8 V_a^{0.6}}{\varepsilon D^{0.4}} \times (T_g - T_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273 \quad (2.10)$$

donde T_g representa la temperatura del globo en grados Celsius; T_a la temperatura del aire en grados Celsius; V_a la velocidad del aire en m/s ; ε la emisividad adimensional de la superficie del sensor de la temperatura del globo; D el diámetro del globo en m . En este trabajo, ε y D fueron de 0.95 y 0.125 m , respectivamente. La variable independiente, T_{rm} , sigue la Ec. (2.11), propuesta por [84].

$$T_{rm(today)} = (\alpha)T_{rm(yesterday)} + (1 - \alpha)T_{m(today)} \quad (2.11)$$

donde $T_{rm(today)}$ representa la temperatura media de corriente para hoy en grados Celsius; $T_{rm(yesterday)}$ la temperatura media de corriente de ayer en grados Celsius; $T_{m(today)}$ la temperatura media diaria exterior del día en grados Celsius; α_l representa la correlación adimensional entre T_c y T_{rm} , menos que 1.0. Este trabajo considera un α_l de 0.8, de acuerdo a Nicol y Humphreys [85,86]. El estudio de la relación entre la T_c , la HR y la V_a se realiza en función de la media medida de cada parámetro en cada valor de la escala del VST (± 3). La correlación entre variables se determina con la correlación de Pearson.

2.4.2 Modelo lineal

En el caso del modelo lineal, la T_c se determina con una regresión lineal, con el método de mínimos cuadrados. En la regresión lineal, la T_c es la variable dependiente y la T_{rm} como variable independiente siguiendo los trabajos de Aparicio-Ruiz *et al.* y Rawal *et al.* [87,88], como se expresa en la Ec. (2.12).

$$T_c = a \cdot T_{rm} + b \quad (2.12)$$

donde T_c es la temperatura de confort, a y b son la pendiente y la ordenada al origen y T_{rm} es la temperatura radiante media que se calcula con la Ec. (2.13).

$$T_{rm(hoy)} = (\alpha) \cdot T_{rm(ayer)} + (1 - \alpha)T_m \quad (2.13)$$

donde $T_{rm(hoy)}$ y $T_{rm(ayer)}$ representan la temperatura media de corriente libre para el día de hoy y ayer en grados Celsius, respectivamente, T_m es la temperatura media exterior del día, la cual se obtiene de la base de datos de Meteoronorm, α es una constante en el rango (0-1), donde el valor recomendado es

0.8 [73,74]. Con base en la pendiente de regresión $TSV-T_{op}$, las zonas de aceptabilidad térmica del 80.0% y 90.0% se derivaron de los percentiles P10-P90 y P05-P95, respectivamente, que representan el rango de temperatura operativa en el que se espera que el 80.0% y el 90.0% de los ocupantes se sientan cómodos, siguiendo a Rawal *et al.* [88].

2.4.2 Modelo con programación genética

La **Figura 12** esquematiza la programación genética, donde se toma un conjunto de expresiones para resolver una posible solución, tomando soluciones inicialmente al azar, llamándole a esto población inicial. La población inicial pasa por la evolución genética utilizando los principios de la teoría de Darwin y la biología en donde considera la selección natural, la reproducción y la mutación. Mediante un proceso iterativo, la población inicial es transformada en una nueva generación de programas luego de pasar por los principios de la evolución, con cada iteración se consigue una nueva generación de individuos más capaces de correlacionar con menor incertidumbre.

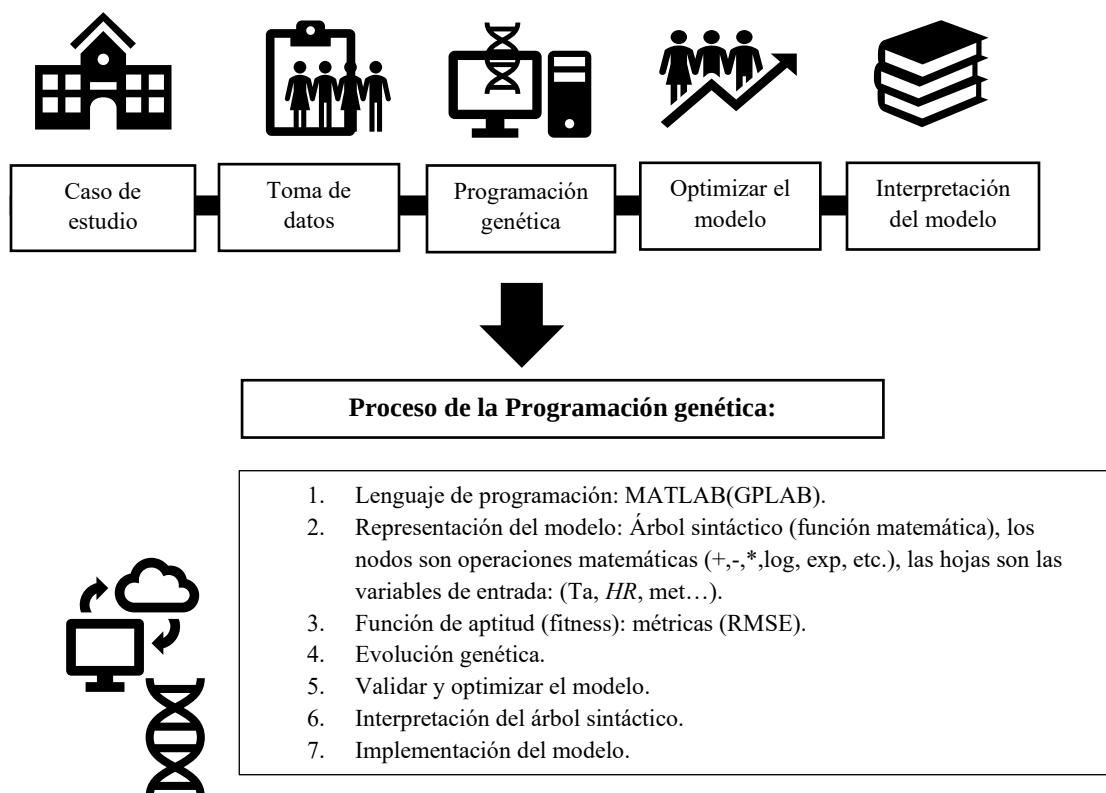


Figura 12. Proceso de Programación genética.

La función matemática se expresa mediante un árbol sintáctico que contiene nodos y hojas. Los nodos contienen operadores matemáticos como sumas, restas, multiplicación, entre otras. Las hojas contienen variables de entrada las cuales son T_a , HR , entre otras. La **Figura 13** ejemplifica un árbol sintáctico.

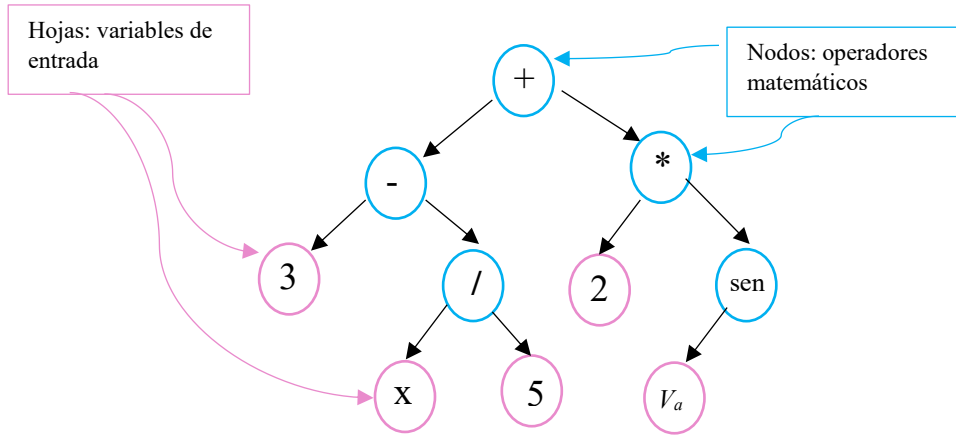


Figura 13. Ejemplo de la expresión matemática expresada mediante árbol sintáctico.

Función de Aptitud

La función de aptitud (fitness) indica el desempeño para predecir la T_c , el fitness es el error cuadrático medio (RMSE). El error cuadrático medio se puede interpretar como la diferencia promedio esperada entre un valor predicho y un valor real, es la desviación estándar de los residuos o la diferencia total entre los datos y la curva ajustada, **Ec. (2.14)**.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (2.14)$$

donde N es el número de observaciones, y_i es el valor predicho por el modelo, $\hat{y}_i$ es el valor real. Las unidades de T_c están en grados Celsius, donde el valor de RMSE cercano a cero indica mayor precisión del modelo.

Evolución Genética

La **Figura 14** muestra el proceso de tres pasos utilizado en la evaluación genética. En el primer paso, la población inicial se crea a partir de modelos aleatorios con árboles sintácticos, y se define el tamaño de la población (número de modelos en cada generación) y la profundidad máxima de los árboles. En el segundo paso, los operadores genéticos se desarrollan considerando un cruzamiento para combinar partes de dos modelos padres para producir un nuevo hijo. La mutación combina una parte del modelo para explorar nuevas posibilidades.

La selección escoge los mejores modelos basados en el fitness para reproducirse considerando una técnica de torneo o ruleta. Los criterios de paradas consideran cuando se alcanza el número máximo de generaciones, cuando el fitness es menor a un predeterminado y cuando ya no hay mejoras significativas después de varias generaciones.

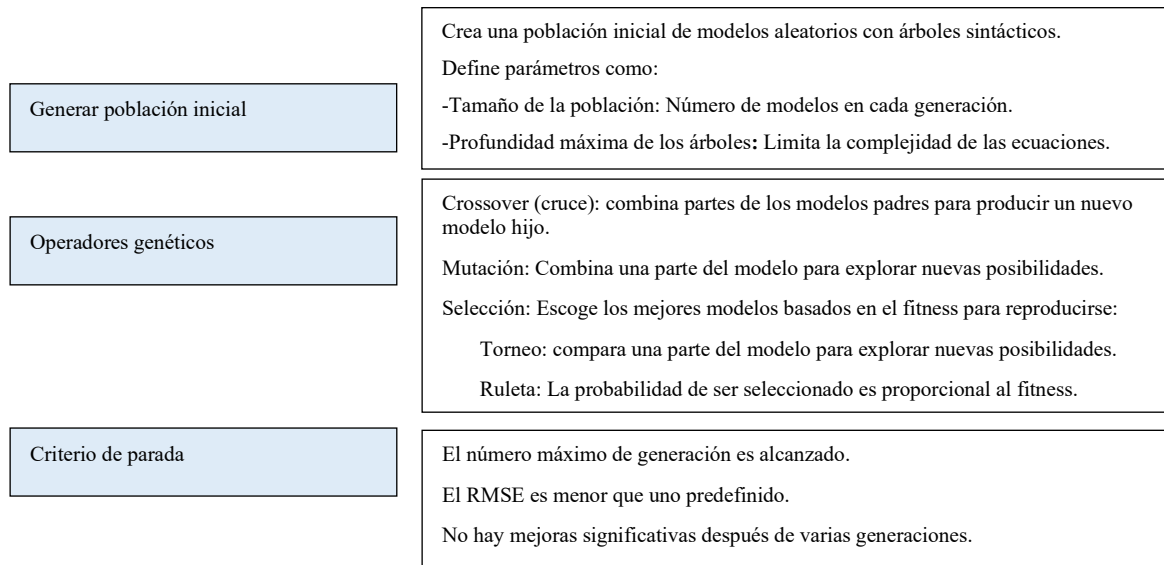


Figura 14. Proceso de programación genética.

2.5 Ahorro energético

La **Figura 15** esquematiza la metodología general del trabajo de tesis para determinar el ahorro energético utilizando modelos locales de confort térmico adaptativo. La metodología se divide en la

sección de establecer el caso de estudio, construcción de modelos locales y comparativos de ahorros.

En la selección de establecer el caso de estudio se propone la recolección de los datos de campo con las características de la edificación, características de los ocupantes y los parámetros ambientales interiores y exteriores de la edificación. Las características de la edificación consideran la normativa mexicana NOM-008-ENER-2001. Las características de los ocupantes se obtienen de estudios de campo, realizando mediciones y encuestas a los ocupantes de acuerdo a la norma ISO 7730. Los parámetros ambientales se monitorean en el interior de la edificación y los exteriores se consideran de acuerdo al año típico meteorológico siguiendo la norma ASHRAE 55. **En la sección de construcción de modelos**, el modelo de confort se determina con regresión lineal, la variable independiente es la T_{rm} y la variable dependiente es la T_c , donde esta última se determina con el método de Griffiths. **En la sección de comparativos de ahorros**, las temperaturas de confort se utilizan como temperatura de control para el equipo de aire acondicionado de la edificación para cada día del año. La carga térmica de enfriamiento del edificio se determina para AC, y los grados días de enfriamiento para VN. Los ahorros en la carga térmica y la reducción de los grados día de enfriamiento se determinan tomando como referencia la NOM-008-ENER-2001.

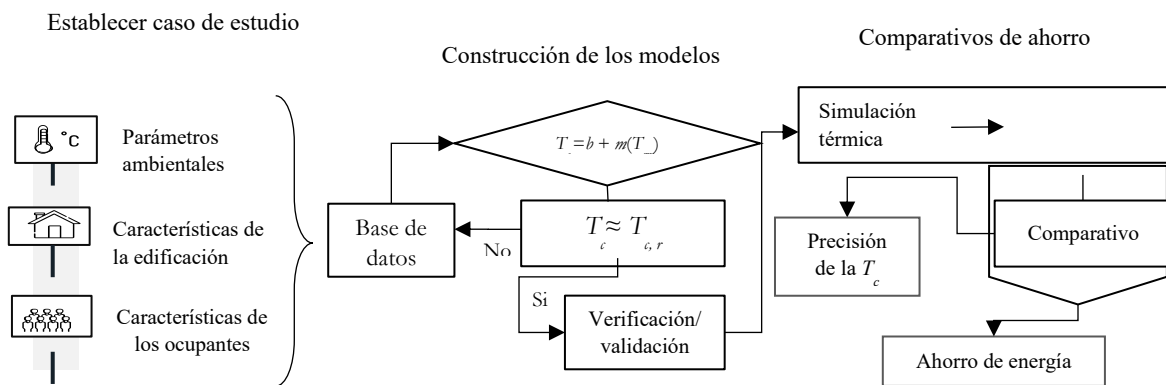


Figura 15. Metodología general del estudio.

Capítulo 3: Diseño experimental- Estrategia de ahorro de energía

Este capítulo presenta el diseño experimental en la optimización energética en un edificio universitario en un clima cálido seco, implementando modelos de confort térmico adaptativos locales propuestos.

3.1 Estrategia de ahorro de energía

La estrategia de ahorro de energía implementado modelos de confort térmico adaptativo en un edificio educativo se presentan en esta sección. La estrategia de ahorro de energía se presenta en la **Figura 16** para determinar el ahorro en las cargas térmicas de enfriamiento y la disminución de los Grados Días de Enfriamiento en un edificio no-residencial para un clima cálido seco de México, con el uso de modelos de confort térmico adaptativo propuestos.

Las variables de entradas son la temperatura radiante media (T_{rm}), la temperatura media (T_m), la humedad relativa (HR), y la velocidad del aire (V_a). El monitoreo de variables personales de confort considera; las características demográficas, las cuales son el factor de edad (F_{edad}), factor de peso (F_{peso}), factor de estatura ($F_{estatura}$) y el factor de género (F_{genero}); las características del ocupante son el factor de arropamiento (F_{clo}), el factor metabólico (F_{met}), factor de tiempo de residencia (F_{res}), sensación térmica (ST) sensación térmica deseada (ST_d), sensación de humedad (SH), sensación de humedad deseada SH_d , sensación de velocidad del viento (SV_v), sensación de velocidad del viento deseada (SV_{vd}), temperatura percibida (T_{per}) y la temperatura de confort térmica (T_c). Las características de la edificación consideran el factor de aspecto $\langle\langle x: y \rangle\rangle$, número de zonas térmicas (N_{zt}), el tiempo de operación t , el área A , la proporción ventana pared (WWR) y la temperatura de operación (T_{op}); las propiedades termo-físicas son el calor específico (C_p), la densidad ρ , la conductividad térmica (k) y el espesor (l). Los modelos se proponen mediante un análisis estadístico por medio de correlaciones, tomando en cuenta las encuestas subjetivas y las mediciones en campo. En el proceso se considera la construcción y verificación de un simulador térmico con base en la NOM-008-ENER-2001 para edificios no-residenciales. Por otro lado, la variable de salida es la T_c , la cual se introduce como variable de entrada al simulador para determinar la carga térmica y los Grados Días de Enfriamiento. La T_c determina el intervalo de temperatura óptimo para los ocupantes en edificios educativos para un clima cálido seco de México. Por último, el comparativo térmico se realiza con los resultados de la edificación simulada con la (T_{op_m}) propuesta y la T_{op} de referencia.

Los datos de salida son la reducción de energía en la climatización, la disminución de los *GDE*, los modelos de confort y la estrategia de reducción energética para edificios educativos en un clima cálido seco.

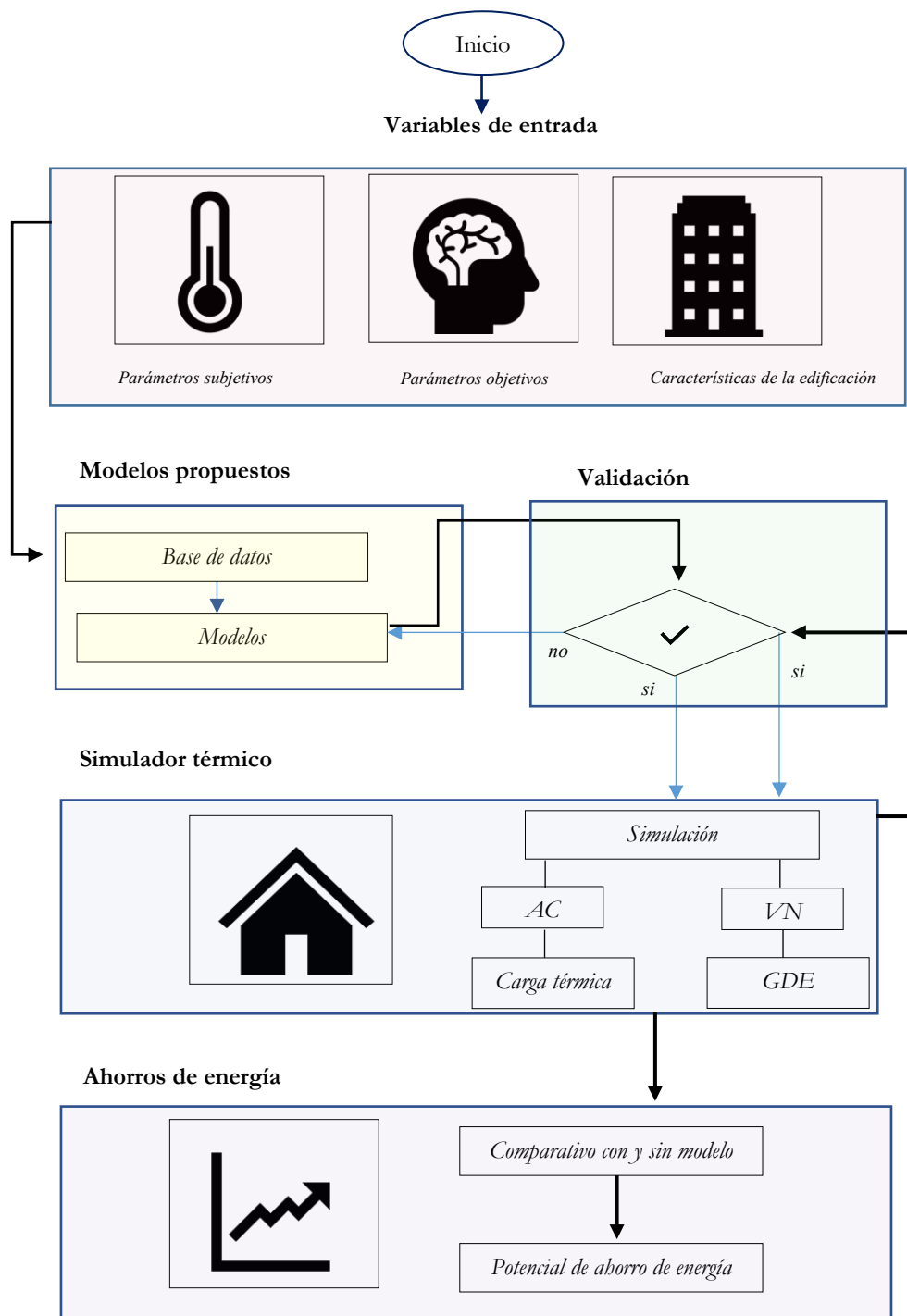


Figura 16. Diseño experimental.

3.1.1 Modelos de confort térmico adaptativo

En esta sección se presentan los modelos de confort térmico adaptativo como estrategias de confort térmico adaptativo desarrollados en este estudio, con el objetivo de determinar el ahorro energético en edificaciones. El confort térmico es el resultado de múltiples interacciones entre el ambiente y la percepción del usuario. Para capturar esta complejidad, se requiere la construcción de modelos que permitan predecir y optimizar el ahorro energético en función de las condiciones térmicas. En este trabajo se proponen nuevos modelos adaptativos ajustados a las condiciones climáticas y características de los ocupantes. Estas estrategias buscan minimizar la carga térmica anual, optimizando las temperaturas de operación y mejorando la eficiencia energética, como se muestra en la Ec. (3.1).

$$Q_{anual-min}=f(T_c) \quad (3.1)$$

La optimización energética con los modelos de confort térmico adaptativo se realiza determinando el valor mínimo de la carga térmica anual. En la Ec. (3.2) se presenta que, la carga térmica anual mínima está en función de la temperatura de confort térmica utilizada. Con lo mencionado anteriormente, los modelos de confort térmico adaptativo se utilizan para obtener un rango de temperatura que no afecte el confort térmico del ocupante y genere ahorros de energía considerable. Presentar una temperatura de diseño para utilizar estrategias de mitigación energética y reducir los grados días de enfriamiento del edificio de estudio.

$$Q_{tanual-min} = f(T_c) \quad (3.2)$$

El modelo lineal $T_{c,lin}$ está en función de la temperatura radiante media exterior como se presenta en la Ec. (3.3). Con los datos recopilados en el estudio de campo se desarrolla un análisis estadístico para establecer la relación entre las sensaciones subjetivas de confort de los ocupantes y las variables ambientales.

$$T_{c,lin} = f(T_{rm}) \quad (3.3)$$

El ahorro de energía con el modelo lineal se determina utilizando la temperatura de confort que arroja el modelo como temperatura de operación en el aire acondicionado. La temperatura de confort del modelo se optimiza con la temperatura de confort qué más se acerque a la temperatura de confort real de los ocupantes. La programación genética permitió generar expresiones matemáticas para correlacionar información de conjuntos de datos, **Ec. (3.4)**.

$$T_{c,PG} = f(T_{rm}) \quad (3.4)$$

3.2 Ahorro energético

Los modelos T_c propuestos se comparan con los de Indraganti y Boussaa [89] en términos del aumento de las temperaturas de confort, el índice de Fanger y el modelo mexicano [90] en cuanto al ahorro energético, para edificios educativos en términos de ahorro de energía y grados día de enfriamiento GDE, utilizando las **Ecs. (3.5-3.9)**.

$$AC: T_{c-Indraganti} = 0.049 \cdot T_{rm} + 22.5 \quad (3.5)$$

$$AC: T_{c-NOM-008-ENER-2001-AC} = 25.0^\circ C \quad (3.6)$$

$$AC: T_{op-Fanger} = f(T_a, T_{rm}, V_a, HR, Met, Clo) \quad (3.7)$$

$$VN: T_{c-NOM-008-ENER-2001-NV} = 25.0^\circ C \quad (3.8)$$

$$VN: T_{INIFED} = 0.2 \cdot T_o + 18.0 \quad (3.9)$$

T_c es la temperatura de confort, T_i es la temperatura interior, T_o es la temperatura exterior y T_{rm} es la temperatura media de funcionamiento exterior.

3.2.1 Cálculo de las cargas térmicas y grados día de enfriamiento

La evaluación de la eficiencia energética con los modelos de confort térmico adaptativo considera un simulador térmico para determinar cargas térmicas de enfriamiento y los grados día de enfriamiento (GDE) del edificio de estudio. Este análisis permite comparar el desempeño térmico del edificio bajo distintos escenarios operativos, cuantificando el impacto de la implementación de modelos de confort

térmico adaptativo en la reducción del consumo energético. En esta sección se presenta la simulación térmica y la verificación de la plataforma de simulación.

3.2.2 Simulación térmica

La construcción de la plataforma de simulación de cargas térmicas y grados día de enfriamiento se desarrolla mediante un modelo transitorio basado en balances de energía, considerando el programa TRNSYS, como lo muestra la **Figura 17**.

El programa se construye considerando el método de análisis por componentes, utilizando subrutinas que permiten integrar cada parte de la edificación. La subrutina TRNBuild que permite simular térmicamente la edificación de estudio. La plataforma calcula las cargas térmicas de enfriamiento utilizando la información climática del lugar. El edificio educativo "Edificio R" del TecNM-ITT Campus Tuxtla Gutiérrez, es un modelo CAPFCE del Instituto Nacional de Infraestructura Física Educativa de México, representativo de los edificios educativos no residenciales en el país por cumplir la NOM-008-ENER-2001 [91] [92]. La validación de la plataforma de simulación se realizó con los datos publicados por López-Pérez y Flores-Prieto 2023, [93].

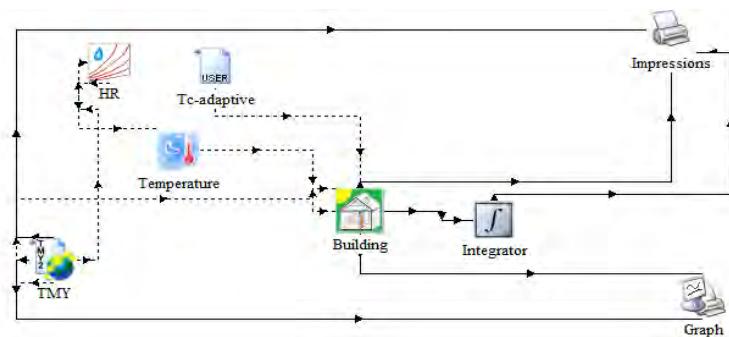


Figura 17. Plataforma de simulación para el cálculo de las cargas térmicas.

La **Figura 18** muestra el edificio de referencia, considerado para la simulación, el edificio toma en cuenta la configuración reportada por López-Pérez *et al.* (2023), [93] y a su vez la configuración de NOM-008-ENER-2001[91]. La NOM-008-ENER-2001 fue elaborada considerando los diseños de prototipos de edificaciones de referencias mexicanas.

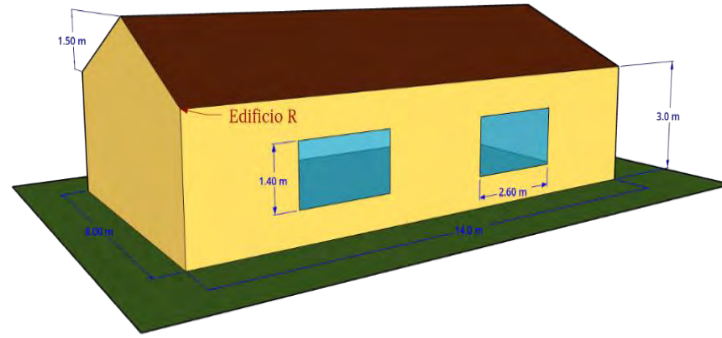


Figura 18. Edificio de referencia.

3.2.3 Verificación de la plataforma de simulación

Álvarez- García *et al.* (2014) [92], reportaron la configuración, los materiales de construcción, las propiedades térmicas, propiedades ópticas y las zonas consideradas para la simulación del edificio del estándar mexicano. En este estudio, se replicó dicha configuración en la plataforma de simulación utilizada para estimar la carga térmica de enfriamiento con el objetivo de validar la plataforma López- Pérez *et al.* (2023) [93] La **Figura 19** muestra el comparativo variando la reluctancia solar de 0.2- 0.9, con incrementos de 0.1, para el caso de Hermosillo, el cual presenta un clima seco. El comparativo presenta un coeficiente de determinación de $R^2=0.99$.

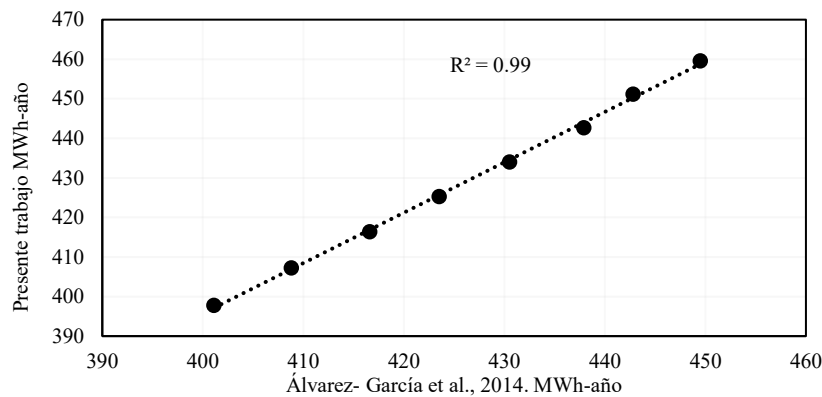


Figura 19. Comparativo de cargas térmicas.

La **Tabla 9** muestra un comparativo de temperaturas del presente trabajo y lo reportado por López- Pérez y Flores-Prieto 2023 [93], para verificar la plataforma de simulación. Las diferencias de la temperatura media resultaron de $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ con una incertidumbre del 2.0%. Considerando la temperatura mínima, la diferencia respecto a [93] fue de $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$; y considerando la temperatura máxima de $3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,

las incertidumbres fueron menores al 8.0%. Los resultados muestran que las diferencias de las temperaturas mínimas, máximas y medias no sobrepasan el 8.0%.

Tabla 9. Verificación de la plataforma de simulación del edificio de referencia "R".

	Presente trabajo	López-Pérez y Flores-Prieto, 2023	Diferencia	
T_m				
	°C	°C	°C	%
Media	26.1	26.7	0.6	2.0
Min	14.2	13.5	0.7	5.0
Max	37.2	40.6	3.4	8.0

3.3 Potencial de ahorros energéticos

La comparación del ahorro energético se basa en la diferencia de temperatura de confort de los modelos propuestos para aire acondicionado y los grados-día de refrigeración de los casos de referencia para aire acondicionado. Para el aire acondicionado, el ahorro en el consumo energético es función de la diferencia de temperatura de confort, según la **Ec. (3.10)**, donde cada grado Celsius superior a la temperatura de confort calculada representa un 10.0% de ahorro energético, según [94].

$$Q_{t-min} = f(T_{c,i}); \quad i = T_{c-proposed}, T_{c-NOM-008} \quad (3.10)$$

Para VN, el ahorro potencial en el consumo de energía depende de los días de grado de refrigeración GDE, ya que el consumo de energía es directamente proporcional a ellos [38]. El análisis comparativo incluye datos del 3 al 22 de septiembre de 2023 y un año de datos para VN. El modelo propuesto de GDE son los días de grado de refrigeración calculados e integrados durante un año utilizando el modelo de confort térmico propuesto, y el GDE de referencia son los días de grado de refrigeración calculados e integrados durante un año en relación con el modelo de confort térmico. Los días de grado de refrigeración GDE, en cada caso, se calculan según la **Ec. (3.11)**.

$$GDE = \text{Max}[\bar{T}_{out-day} - T_c] \quad (3.11)$$

Capítulo 4: Resultados y análisis

Este capítulo presenta los resultados y análisis térmico y energético del edificio educativo, a partir de la implementación de modelos de confort térmico adaptativo locales en un clima cálido seco.

4.1 Recolección de datos en campo

El conjunto de datos tuvo tratamiento previo, el cual se realizó en COLAB código Python. En la **Figura 20** se muestran los datos atípicos por variable. La **Figura 20(a)** presenta los datos de edad, peso y estatura con secuencia en 1, 2 y 3, respectivamente. Para AC, la edad presenta una media de 24.9 años con una desviación estándar de 11.8 años, con una máxima de 66 y mínima de 17 años, los puntos negros presentan valores atípicos, los cuales concuerdan con la muestra, ya que, en la población se considera alumnos, profesores y personal administrativo. El peso presenta una media de 73 kg y una desviación estándar de 15 kg, con un peso máximo de 117 kg y mínimo de 44 kg, con valores atípicos mínimos. La estatura media presenta una media de 1.69 m con una desviación estándar de 10 cm, un máximo de 1.94 m y un mínimo de 1.43 m. La **Figura 20(b)** presenta los datos de temperatura ambiente, temperatura media y temperatura operativa con secuencia en 1, 2 y 3, respectivamente. La temperatura ambiente presenta una media de 25.8 °C y una desviación estándar de 2.3 °C, el punto máximo es de 33.9 °C y mínimo de 17.9 °C. La temperatura operativa presenta una media de 25.8 °C con una desviación estándar de 2.2 °C, máximas de 32.0 °C y mínimas de 20.5 °C.

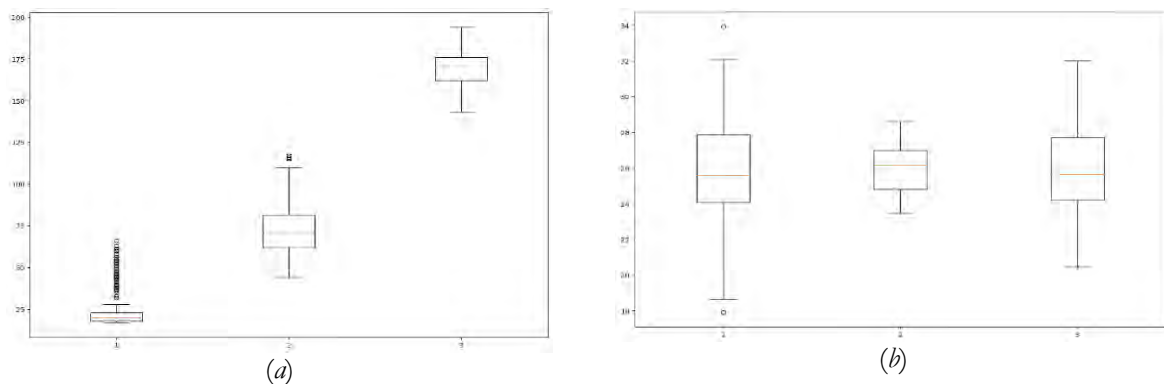


Figura 20. Valores atípicos por variable, (a) edad, peso, estatura y (b) temperatura ambiente, temperatura media y temperatura operativa.

4.1.1 Variables objetivas de confort térmico

El cuestionario térmico considera 340 ocupantes, 184 hombres y 156 mujeres. El intervalo de edad fue de 18 a 67 años, con una edad promedio de 26.3 años para las mujeres y 23.2 años para los hombres. En ambos modos, el peso osciló entre 43 y 120 *kg*, con un promedio de 67.6 *kg* para las mujeres y 76.8 *kg* para los hombres. La altura osciló entre 1.43 y 1.97 *m*, con un promedio de 1.61 *m* para las mujeres y 1.74 *m* para los hombres. La temperatura exterior media durante el período estudiado fue de 25.9 °C, con un rango de 23.5 a 28.6 °C. En el modo AC, la T_a promedio fue de 25.8 ±2.3 °C. En modo VN, la T_a promedio fue de 28.8 ±2.4 °C.

El aislamiento más común para la ropa fue el uso de pantalones y camisas de manga corta (61.7%), seguido de pantalones y camisas de manga larga (24.2%), pantalones deportivos y sudaderas de manga larga (12.5%) y camisas de manga corta (1.2%). Los ocupantes informaron usar camisetas de manga larga para protegerse de la luz solar externa. La tasa metabólica corresponde a las actividades comunes en los edificios educativos. La tasa metabólica más común se registró en la actividad sedentaria, la lectura y la escritura (49.2%), seguida del trabajo sedentario de pie (41.4%). La mayoría de las aulas del TecNM-ITT funcionan en modo AC, y los ocupantes pasan la mayor parte del tiempo en aulas con aire acondicionado. Los espacios en modo VN suelen estar ubicados en pasillos o aulas con el sistema de control de climatización apagado. En los modos AC y VN, el aislamiento de la ropa y los factores de actividad física fueron similares. Los ocupantes se centran principalmente en el aislamiento de la ropa cuando están en aulas con aire acondicionado. La **Figura 21** ilustra las principales actividades del aula y la vestimenta más típica en el TecNM-ITT. La *HR* mostró una diferencia mínima del 2.2% en ambos modos. En el modo VN, las temperaturas fueron hasta 3.2 °C más altas que en el modo AC. En AC, el VST promedio fue de -0.5, lo que muestra una sensación más cercana a la sensación neutra. En VN, el VST promedio fue de 1.1, lo que muestra una sensación más cercana a la sensación cálida.



Figura 21. Aplicación de encuestas y salón de clases.

La **Tabla 10** muestra las variables y condiciones interiores y exteriores.

Tabla 10. Variables demográficas y condiciones interiores y exteriores.

Categoría	Parámetro	Unidad	AC media $\pm$ DE	VN media $\pm$ DE
Demográficas	Muestra (n)	—	256	84
	Edad	años	24.9 ± 11.8	23.8 ± 9.9
	Género	—	143 hombres / 113 mujeres	41 hombres / 43 mujeres
	Peso	kg	72.9 ± 15.0	71.6 ± 14.3
	Altura	cm	168.0 ± 9.8	168.0 ± 9.5
Condiciones de los ocupantes	Factor de arropamiento (I_{clo})	clo	0.64 ± 0.13	0.64 ± 0.11
	Tasa metabólica (Actividad)	met	1.13 ± 0.26	1.26 ± 0.20
Parámetros interiores	Velocidad del aire (V_a)	m/s	0.06 ± 0.06	0.05 ± 0.06
	Humedad relativa (RH)	%	42.1 ± 6.0	39.9 ± 8.0
	Temperatura del aire (T_a)	°C	25.8 ± 2.3	28.8 ± 2.4
	Temperatura del globo (T_g)	°C	25.8 ± 2.3	29.1 ± 2.7
	Temperatura media radiante (T_{mrt})	°C	25.5 ± 2.3	29.1 ± 2.8
	Temperatura operativa (T_{op})	°C	25.8 ± 2.2	29.0 ± 2.5
Parámetros exteriores	Temperatura media exterior (T_m)	°C	25.9 ± 1.5	25.8 ± 1.3
	Temperatura de corriente exterior (T_{rm})	°C	25.9 ± 1.4	25.9 ± 1.2
Sensación y preferencias térmicas	Voto de sensación térmica (VST)	escala -3 a +3	-0.5 ± 1.5	1.1 ± 1.5
	Preferencia térmica (PT)	escala -3 a +3	0.5 ± 0.8	0.5 ± 0.5

4.1.2 Variables subjetivas de confort térmico

Sensación térmica de los ocupantes por la temperatura

En la **Figura 22** se presenta la frecuencia del voto de sensación térmica y preferencia térmica de los ocupantes del TecNM-ITT en clima cálido seco. En AC, el voto más frecuente fue para -2 (fresco) con un 30.5%, lo que indica que hay un ligero sobre-enfriamiento. Sin embargo, la preferencia térmica más frecuente fue 1.0 ligeramente más fresco con un 49.0%, lo que indica que, los ocupantes prefieren temperaturas más altas a pesar de una sensación térmica fresca.

En AC, más del 50.0% de los ocupantes votaron por sensaciones entre ligeramente frío y frío, y la mayoría se concentró en frío, lo que podría indicar un ligero sobre-enfriamiento en los edificios. Sin embargo, la preferencia térmica se inclinó hacia un ambiente ligeramente más frío y sin cambios, lo que indica que, los ocupantes prefieren ambientes más fríos que cálidos. En el modo VN, el 65.5% de los ocupantes votaron por sensaciones de ligeramente cálido o caluroso, concentrándose la mayoría en calor, y más del 70.0% de los encuestados prefieren un ambiente térmico más fresco.

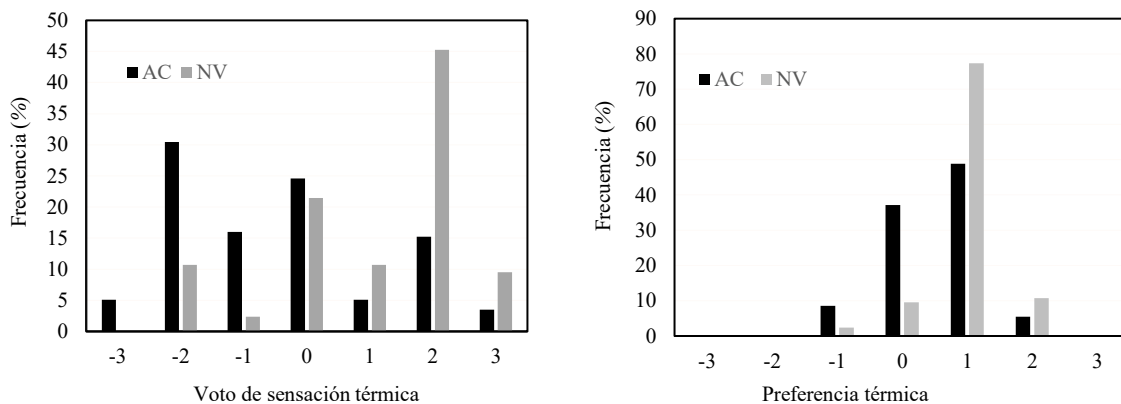


Figura 22. Voto de sensación térmica y preferencia térmica.

Sensación y preferencia por la humedad relativa

La **Figura 23 (a)** muestra la sensación de humedad según la escala de Voto de Sensación de Humedad, en AC y VN. En AC, el 40.6% de los encuestados no se sintió ni húmedo ni seco con una HR de $41.9 \pm 5.6\%$, el 18.4% se sintió ligeramente húmedo con una HR de $43.0 \pm 6.6\%$ y el 17.2%

menciona sentir el ambiente seco con una HR de $40.6 \pm 5.9\%$. En las zonas de ventilación natural, el 26.2% se sintió ligeramente húmedo con una HR de $43.4 \pm 9.5\%$ y el 20.2% sintieron el ambiente seco con una HR de $37.0 \pm 5.3\%$. En AC, los ocupantes muestran una mayor tolerancia neutra a la humedad, hasta un 23.0%, en comparación con los de las zonas de ventilación natural. Durante la encuesta, la HR medida mostró diferencias de 8.3% en AC y hasta 17.1% en VN, lo que indica que en VN, estas variaciones tuvieron un impacto más significativo en los votos de sensación húmeda. En AC, la HR promedio con más del 40.0% de la sensación de confort del ocupante es $41.9 \pm 5.6\%$. En VN, donde el 17.9% se siente cómodo, la HR es $40.6 \pm 4.5\%$. En AC, los ocupantes sienten el clima seco en $40.6\% \pm 5.9\%$, mientras que en VN, comienza en $37.0 \pm 5.3\%$. En AC, los ocupantes perciben el clima como húmedo en $44.0 \pm 5.7\%$; en VN, comienza en $43.4 \pm 9.5\%$. La **Figura 23 (b)** muestra la preferencia de humedad en ambos modos. En modo AC, el 53.9 % prefiere sin cambios en HR $42.5\% \pm 6.0\%$, el 31.6% elige ligeramente más húmedo en HR de $40.5 \pm 5.4\%$, y el 11.7% prefiere ligeramente más seco en HR por encima de $44.9 \pm 6.4\%$. En modo VN, el 42.9% de los encuestados prefiere algo más húmedo en HR menor de $39.6 \pm 8.4\%$, el 34.5 % elige sin cambios en HR de $39.9 \pm 7.7\%$ y el 21.4% prefiere ligeramente más seco en HR por encima de $41.0 \pm 7.8\%$. En AC, la humedad estaba más controlada, mejorando la comodidad de los ocupantes en su entorno. Por otro lado, en VN, los ocupantes perciben variaciones más significativas en la humedad, lo que lleva a una experiencia menos cómoda.

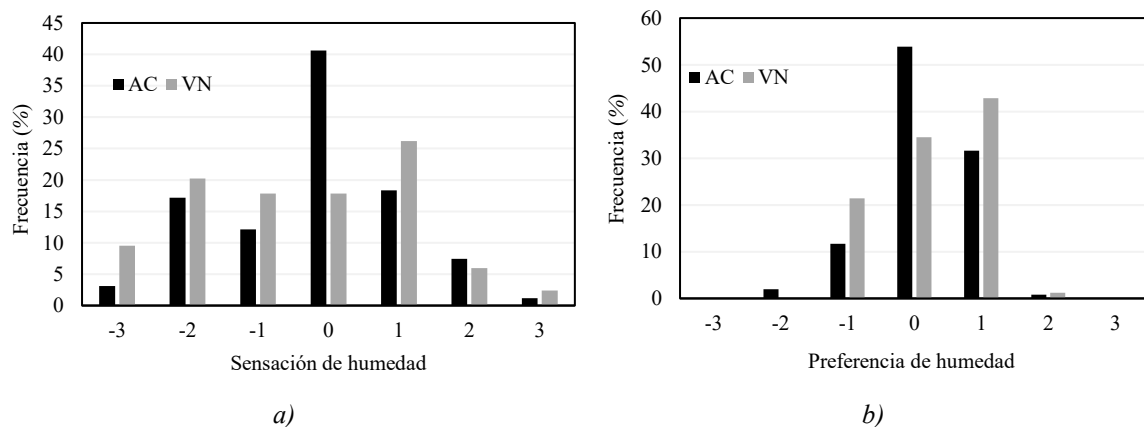


Figura 23. Voto de sensación de humedad y preferencia de humedad.

Sensación y preferencia por el movimiento del aire

La **Figura 24 (a)** muestra la sensación de movimiento del aire con respecto a la escala de voto de sensación de velocidad de Aire. En modo AC, el 39.5% de los encuestados no se sintió ni alto ni bajo con una V_a de 0.06 ± 0.05 m/s, mientras que en modo VN, el 31.0% no se sintió ni alto ni bajo con una V_a de 0.07 ± 0.08 m/s. El VSA muestra una tendencia a un movimiento del aire algo suave en ambos modos, lo que significa que más del 50.0 % de los ocupantes se sienten incómodos con un movimiento de aire suave. La **Figura 24 (a)** muestra la preferencia de movimiento del aire. En AC, el 45.7% de los encuestados prefirió un poco más de movimiento de aire a V_a 0.06 ± 0.05 m/s, y el 43.3% no eligió ningún cambio a V_a . En modo VN, el 63.1% de los encuestados prefirió un poco más de movimiento de aire a V_a menor de 0.04 ± 0.02 m/s, y el 23.8% no eligió ningún cambio a V_a de 0.06 ± 0.07 m/s.

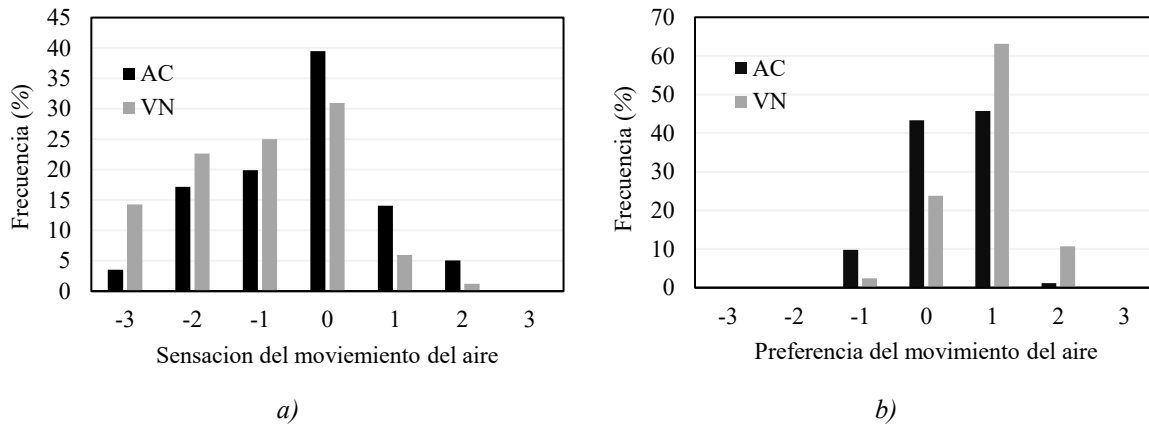


Figura 24. Sensación de movimiento del aire, voto y preferencia.

4.1.3 Análisis de correlación

La **Figura 25** muestra una matriz de correlación considerando las variables recolectadas del estudio de campo y T_c . Los datos de AC se encuentran por debajo de la línea de unos, mientras que los de VN se encuentran por encima. En AC y VN, la correlación más alta con T_c es VST -0.75 y -0.60, mostrando una correlación negativa, donde T_c disminuye a medida que VST aumenta, o viceversa. En AC, T_c presenta una correlación más significativa con HR (-0.28) que con T_a , T_g , T_{mrt} y T_{op} (0.24,

0.24, 0.24 y 0.25, respectivamente). Sin embargo, VN , T_a , T_g , T_{mrt} y T_{op} influyen sustancialmente en T_c (0.39, 0.40, 0.0 y 0.38, respectivamente) en comparación con HR (-0.26). En AC, el VST muestra correlaciones más altas que en VN, hasta 0.15 más altas, posiblemente porque los ocupantes en climas con ambientes controlados tienen una sensación térmica más estable. Para ambos modos, el VST muestra fuertes correlaciones positivas con T_a , T_g , T_{mrt} y T_{op} , con valores de 0.45, 0.45, 0.44 y 0.46 para AC y 0.39, 0.49, 0.49 y 0.50 para VN, respectivamente. En VN, HR muestra una correlación negativa robusta con VST (-0.40), mientras que en AC, HR muestra una correlación muy débil (-0.06). Los resultados en términos de humedad relativa pueden verse afectados por el período de la encuesta, por ser la temporada de lluvias. Se observa que para los ocupantes de AC, HR no es una variable que influya en su sensación térmica debido a su control sobre el uso de equipos mecánicos.

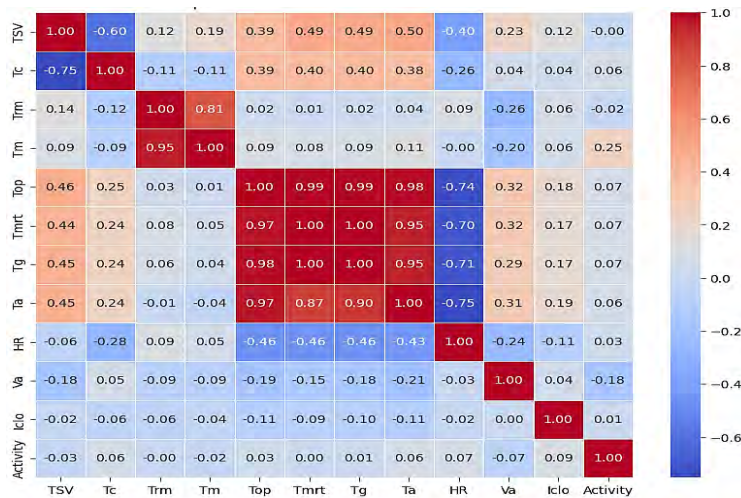


Figura 25. Matriz de correlación de los parámetros de confort térmico.

Para los modos AC y VN, la **Figura 26** muestra la importancia del análisis de T_c . VST muestra una fuerte correlación negativa con T_c en ambos modos de operación, con una diferencia de -0.2 siendo más significativa para AC que para VN. Para VN, T_{rm} presenta una correlación positiva con T_c , mientras que la correlación es débil y negativa. Además, VN, T_{op} , T_{mrt} , T_g y T_a muestran una fuerte correlación positiva con T_c , lo que indica un aumento simultáneo en AC. Sin embargo, en AC, esta correlación es 0.2 más débil. AC muestra una correlación negativa moderada (-0.3) para ambos

modos, lo que subraya su importancia para determinar T_c . Por el contrario, V_a , I_{clo} y la actividad exhiben correlaciones débiles con T_c en ambos modos.

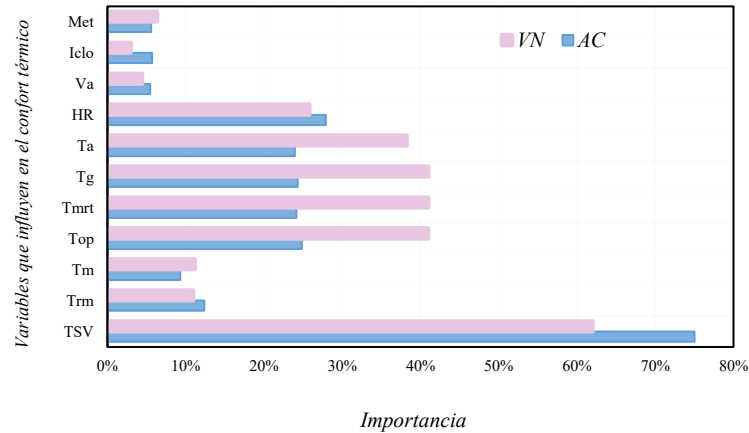


Figura 26. Análisis de importancia en T_c .

4.1.4 Evaluación de la sensación de confort térmico adaptativo

La **Figura 27** muestra la VST frente a la temperatura máxima T_{op} para los modos AC y VN. En AC, para una VST de 0, la temperatura máxima media fue de 26.6 °C; en VN, la temperatura máxima fue de 28.5 °C, con una diferencia de 1.9 °C. En AC, con valores de VST de 1 a 3, la temperatura máxima media fue de 27.4 °C $\pm$ 0.4 °C, y para valores de VST de -1 a -3, la temperatura máxima media fue de 24.5 °C $\pm$ 0.5 °C. En VN, con valores de VST de 1 a 3, la temperatura máxima media fue de 29.7 °C $\pm$ 1.1 °C, y para valores de VST de -1 a -3, la temperatura máxima media fue de 25.9 $\pm$ 0.2 °C. Para una VST de 0, la temperatura media de la superficie T_{op} en edificios con AC fue significativamente menor que en espacios con ventilación natural, con una diferencia de 1.9 °C. En edificios con AC, con una VST de 1 a 3 y de -1 a -3, la T_{op} se mantuvo estable, lo que sugiere posibles variaciones en la sensación térmica individual. En modo AC, los ocupantes toleraron una T_{op} más alta que en modo ventilación natural, y se mantuvieron cómodos incluso a temperaturas hasta 1.9 °C superiores.

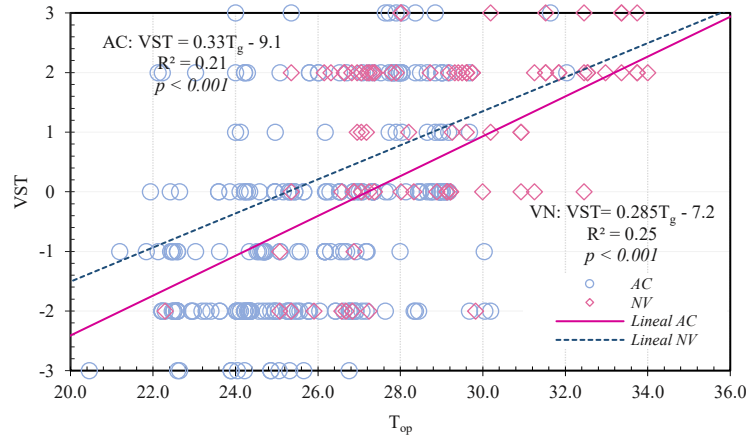


Figura 27. VST vs T_{op} para modo AC y VN.

La **Tabla 11** muestra una comparación de la escala de VST para cada porcentaje de votantes, según la temperatura máxima T_{op} para AC y VN. Para una sensación de frío a muy frío (-2 a -3), la T_{op} es de 24.8 °C con un 36.0% en AC y de 26.2 °C con un 14.0% en VN, con diferencias de 1.4 °C y un 22.0% más altas en VN que en AC. En AC, para una sensación neutra (-1 a 1), la T_{op} y la HR son de 26.1 °C y un 46.0%; en VN son de 28.5 °C y un 37.0 %. Hubo una diferencia de 2.4 °C más en VN, pero el porcentaje de votantes fue menor 9.0%. Para una sensación de cálido a caliente (2 a 3), T_{op} es 27.2 °C con 19.0% en AC y 29.8 °C con 52.0% en VN, con una diferencia de 2.7 °C y 33.0% más alta en VN que AC. En AC, el 46.0% de los encuestados se sienten cómodos con T_{op} de 26.1 °C, mientras que en VN, el 37.0% se siente cómodo con T_{op} de 28.8 °C. En VN, el 37.0% de los encuestados se adapta a T_{op} hasta 2.7 °C más alto que en AC. En AC, el 36.0% de los encuestados experimentó sensaciones de frío con un T_{op} promedio de 24.8 °C, mientras que en VN, el 14.0% a 26.2 °C. En VN, el 52.0% experimentó sensaciones térmicas de calor con un T_{op} de 29.8 °C, mientras que en AC, el 19.0% a 27.2 °C. La temperatura máxima de confort para los ocupantes se sitúa en torno a los 26.1 °C $\pm$ 2.1 °C para el 46.0% en climatización y en los 28.5 °C $\pm$ 1.8 °C para el 37.0% en climatización. En TecNM-ITT, los edificios con climatización experimentan un ligero sobre-enfriamiento, lo que provoca incomodidad térmica por frío en el 36.0% de los ocupantes, con una temperatura máxima de 24.8 °C $\pm$ 1.9 °C. Por otro lado, los edificios con climatización experimentan

temperaturas incómodas, con un 52.0% experimentando incomodidad por calor, con temperaturas de $29.8\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla 11. Comparación de la sensación térmica en función de la temperatura operativa en los modos AC y VN.

Modo	AC		VN	
<i>Escala VST</i>	%	$^{\circ}\text{C}$	%	$^{\circ}\text{C}$
Frío a fresco -2 a -3	36.0	24.8	14.0	26.2
Neutral -1 a 1	46.0	26.1	37.0	28.5
Cálido a muy cálido 2 a 3	19.0	27.2	52.0	29.8

La **Figura 28** muestra la aceptación térmica en AC y VN. El 85.9% y el 77.4% de los encuestados votaron por un ambiente térmico confortable para AC y ventilación natural, respectivamente. La ventilación natural tiene un 8.5% menos de ambientes aceptables que el AC. Los ocupantes mostraron una alta aceptación de su ambiente térmico; esto podría deberse a la adaptabilidad de las personas a su clima, considerando su tiempo de residencia, cultura y medidas de adaptación. Según el 65.0% de las encuestas, mudarse a habitaciones aclimatadas es la principal estrategia para aumentar el confort.

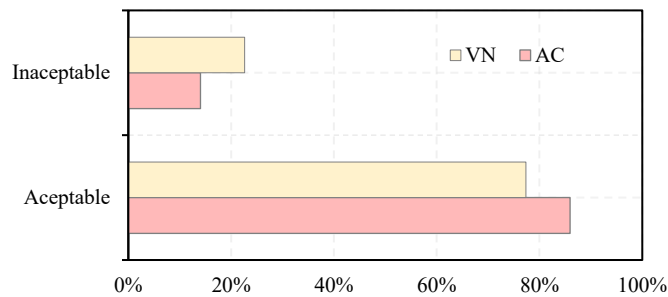


Figura 28. Aceptación térmica para modo AC y VN.

4.2 Modelos adaptativos propuestos de T_c

Esta sección incluye los resultados y análisis de modelos de confort térmico adaptativos propuestos como estrategia energética.

4.2.1 Estimación de la T_c con método de Griffiths

Selección del α de Griffiths

La **Figura 29** compara la T_c media considerando α de 0.25, 0.33 y 0.50 $^{\circ}\text{C}^{-1}$, en relación con la sensación térmica para AC y ventilación natural, siguiendo a Humphreys *et al.* [38]. En ambos modos, las temperaturas de confort con α de 0.50 $^{\circ}\text{C}^{-1}$ muestran desviaciones estándar menores que con α de 0.25 y 0.33 $^{\circ}\text{C}^{-1}$. Por lo que se optó por $\alpha = 0.50$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$.

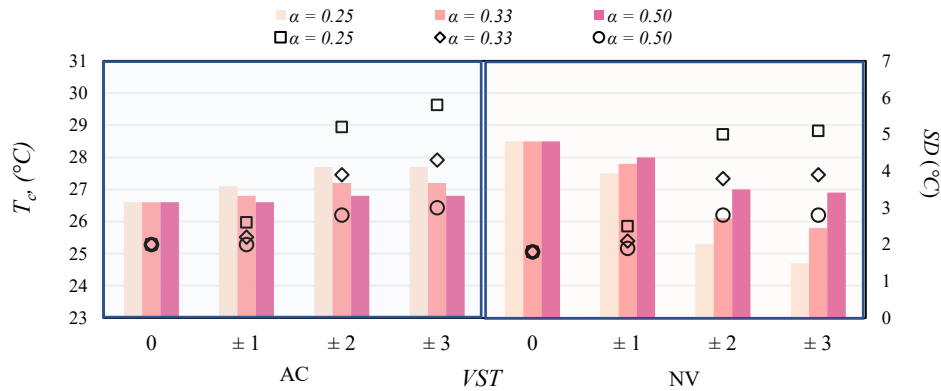


Figura 29. Temperatura de confort con el método de Griffiths con un α de 0.25 a 0.50 $^{\circ}\text{C}^{-1}$, en AC y VN.

T_g vs. T_{op}

La **Figuras 30 (a-b)** y **Tabla 12** muestran los puntos de correlación y dispersión para AC y VN, respectivamente, $T_a:T_g$ y $T_a:T_{op}$, comparando la correlación de Pearson y el coeficiente de determinación entre $T_a:T_{op}$ y $T_a:T_g$. El coeficiente de determinación de $T_a:T_{op}$ fue de 0.94 en AC y de 0.97 en VN, mientras que el coeficiente de correlación de Pearson fue de 0.97 en AC y de 0.98 en VN. En ambos modos, $T_a:T_{op}$ y $T_a:T_g$ muestran relaciones considerables de R^2 y r , T_g , sin embargo para este trabajo se consideró $T_a:T_{op}$ para los cálculos de T_c [38].

Tabla 12. Coeficiente de correlación de $T_a:T_{op}$ y $T_a:T_g$.

Modo de operación	Elementos	$T_a:T_{op}$	$T_a:T_g$
AC $n = 256$	-	$T_{op} = 0.93 \cdot T_a + 1.94$	$T_g = 0.87 \cdot T_a + 3.30$
	R^2	0.94	0.81
	p	< 0.001	
	r	0.97	0.90
VN $n = 84$	-	$T_{op} = 1.05 \cdot T_a - 1.22$	$T_g = 1.08 \cdot T_a - 1.91$
	R^2	0.97	0.91
	p	< 0.001	
	r	0.98	0.95

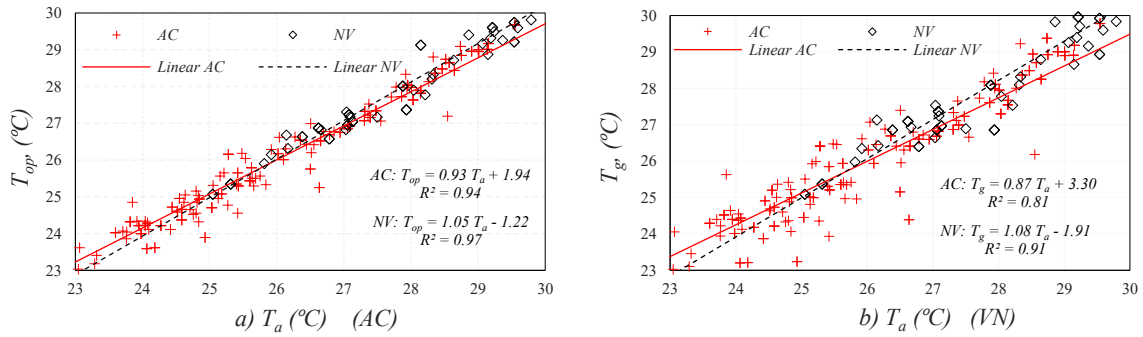


Figura 30. Regresión lineal entre $T_a:T_{op}$ y $T_a:T_g$.

Las Figuras 31 (a-b) comparan los rangos de T_c según la escala TSV, en AC (Figura 31 (a)) y NV (Figura 31 (b)). El rango de T_c es más amplio en AC (21.7 a 30.2 °C) que en NV (25.3 a 30.2 °C), lo que indica una mayor variabilidad térmica en AC. Los ocupantes en NV toleran e incluso prefieren una T_c más alta que en AC. La mayor diferencia de T_c entre ambos modos se produce con una TSV = 3. En AC, la T_c es de 21.7 °C, en comparación con los 25.3 °C en NV, una diferencia de 3.6 °C. En el modo AC, se observó sobreenfriamiento, con una temperatura máxima 0.7 °C inferior a la T_c (26.6 °C) cuando la TSV = 0.

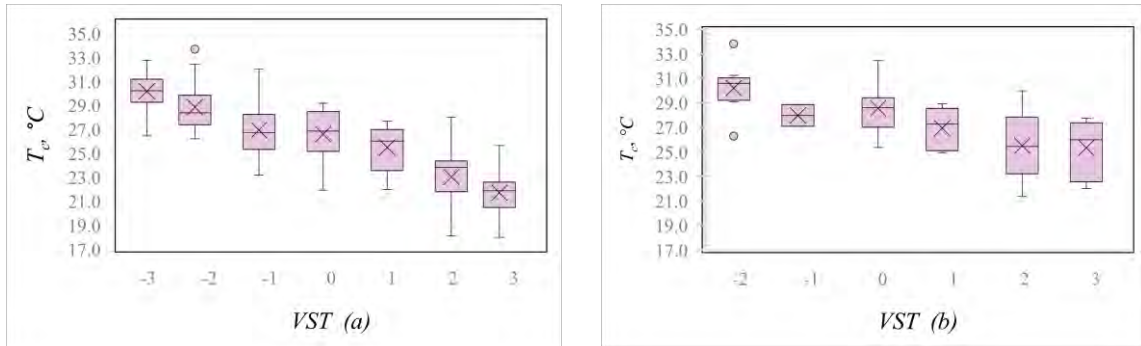


Figura 31. T_c con el método de Griffiths para la escala de VST para AC (a) y VN (b).

4.2.2 Modelos adaptativos con regresión lineal simple

La **Figura 32** muestra la relación entre la T_c y la T_{rm} en los modos AC y VN. El modelo lineal describe la T_c en la zona neutral, la cual fue requerida por los ocupantes del lugar de estudio a pesar de un valor R^2 bajo. Las **Ec. (4.1) y (4.2)** representan la regresión lineal de la T_c para ambos modos.

$$T_{c-AC} = -0.23T_{rm} + 32.6 \quad (n=256, R^2= 0.012) \quad (4.1)$$

$$T_{c-VN} = -0.25T_{rm} + 33.3 \quad (n=84, R^2= 0.012) \quad (4.2)$$

n es el número de muestras y R^2 es el coeficiente de determinación.

En ambos modos, las líneas de tendencia son similares, mostrando una correlación negativa débil, lo que indica que a medida que aumenta la T_{rm} exterior, disminuye la T_c . El R^2 fue de 0.012 y 0.012 para AC y VN. El valor de R^2 es relativamente bajo; sin embargo, esto coincide con los hallazgos de estudios realizados en otros tipos de clima [74], ya que las respuestas subjetivas de los individuos pueden verse influenciadas por diversos factores. Para ambos modos, los valores de la pendiente de la función son negativos. Sin embargo, los valores de la pendiente a y la intersección con el eje y b son diferentes en cada estudio, considerando que esto podría deberse a diferencias en la cultura, el clima y diversos factores que afectan el confort térmico [95]. La pendiente negativa en edificios con AC y VN indica una relación estadísticamente inversa donde, a medida que aumenta la T_{rm} , disminuyen las preferencias de T_c . Esto sugiere que los ocupantes emplean estrategias adaptativas, como el consumo de bebidas frías o ajustes de ropa, para mantener el confort térmico [96,97]. Aunque atípico en los modelos adaptativos, este comportamiento sugiere que el confort térmico no está determinado únicamente por factores fisiológicos, sino que se ve significativamente influenciado por factores contextuales e históricos [98,99]. Esta relación subraya la importancia del diseño basado en el contexto y las limitaciones de los estándares de confort que se aplican de forma generalizada [100].

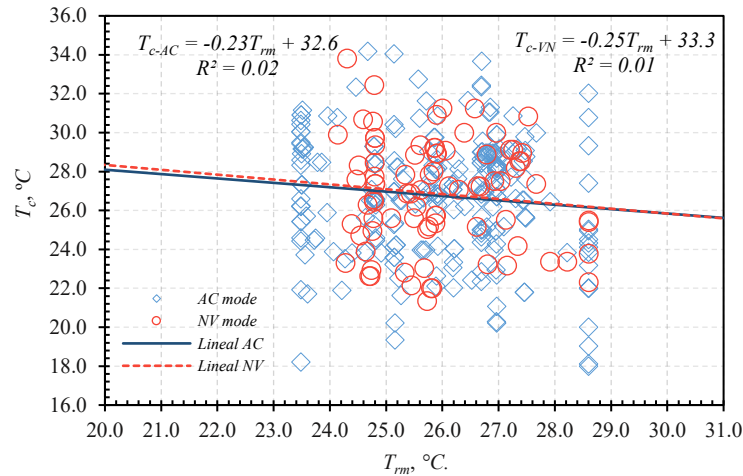


Figura 32. Modelos de confort térmico adaptativo con regresión lineal simple.

Comparativo de modelo lineal AC y VN

La Figura 33 muestra la relación lineal entre la T_c y la T_{rm} para aire acondicionado Figura 33 (a) y ventilación natural Figura 33 (b), incluyendo las zonas de aceptabilidad de los ocupantes al 80.0% y al 90.0%. En AC, estas zonas se centran en la T_{c-AC} (100.0%) y con anchos de ± 3.7 °C para el 80.0% y ± 3.0 °C para el 90.0%. En modo ventilación natural presenta zonas más amplias y cálidas, que alcanzan hasta ± 4.4 °C para el 80.0 % y ± 3.9 °C para el 90.0%, lo que indica una mayor adaptabilidad térmica. Los ocupantes de ventilación natural toleran rangos de temperatura más amplios y más altos que los de aire acondicionado.

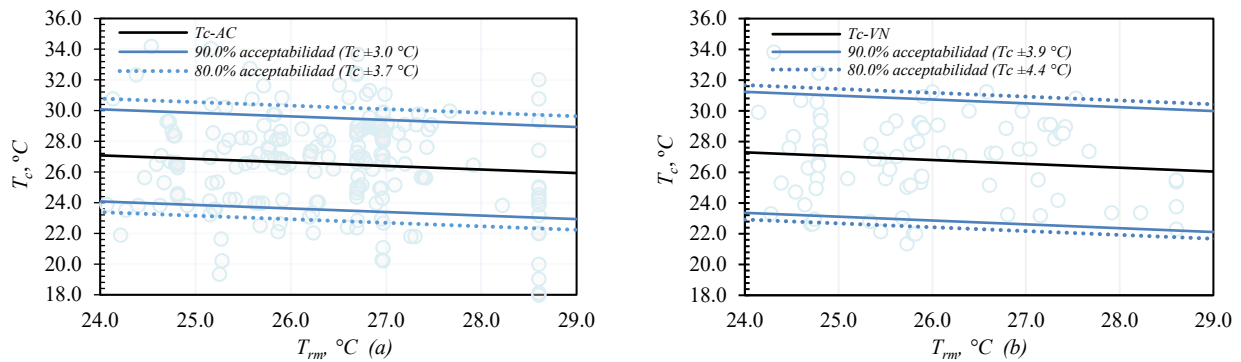


Figura 33. Zonas de T_c para AC y VN.

4.2.3 Modelos adaptativos con programación genética

La **Tabla 13** muestra los parámetros del algoritmo evolutivo. El tamaño de la población y el número máximo de generaciones se seleccionaron con pruebas, comenzando con un tamaño de población y número de generación de 50 y 100, respectivamente, con incrementos de 50, esto durante 30 corridas, para visualizar el mejor comportamiento, encontrando el tamaño de la población y número de generaciones óptimo de 200 y 300, respectivamente. El método de inicialización es 50 y 50, el método de selección es lexicitor, la probabilidad de cruzamiento del 80.0% y la probabilidad de mutación del 20.0%. El primer ejercicio consideró como variable dependiente la temperatura de confort T_c obtenida por el método de Griffiths y como variable independiente la temperatura radiante media exterior T_{rm} .

Tabla 13. Parámetros del algoritmo evolutivo.

Parámetro	Valor
Tamaño de la población	200
Número máximo de generaciones	300
Método de inicialización	Mitad y mitad
Selección del método	'lexictour'
Probabilidad de cruzamiento	80.0%
Probabilidad de mutación	20.0%

La **Tabla 14** muestra las expresiones matemáticas obtenidas por medio de la programación genética PG para AC , considerando el primer modelo el modelo con correlación lineal. El modelo 2-3 considera como variable independiente la T_{rm} y como variable dependiente la T_c , alcanzando un RMSE de 2.84 y 2.85 °C. Debido a la dispersión de los datos, los modelos presentan un error medio cuadrático disperso. Para incrementar la precisión de los modelos, se agregaron variables independientes seleccionadas mediante una evaluación de correlación, considerando la T_{rm} , T_a , HR , V_a , Met , VST como variables independientes. El modelo 5 y 6 presentan RMSE de 0.62 y 0.58, considerando la programación genética.

Tabla 14. Expresiones matemáticas para determinar la temperatura de confort, con programación genética.

Modelo	Variables independientes	Representación	RMSE
T_c -1 lineal	T_{rm}	$T_c = -0.2088T_{rm} + 32.19$	2.95
T_c -2 PG	T_{rm}	$T_c = 27.30 + \operatorname{acsch}(\tan(\sec(\tan(\operatorname{asinh}(x * \operatorname{acsch}(x)))) + 2.8814))$	2.84
T_c -3 PG	T_{rm}	$T_c = \operatorname{real}(26.908 + (3 * \operatorname{atan}(\operatorname{acoth}(\operatorname{acoth}(\cot(\cosh(T_{rm}) + 0.0371))))))$	2.85
T_c -4 PG	T_{rm}	$T_c = \operatorname{norm}(\operatorname{acos}(\sec(\cos(T_{rm})) + T_{rm} + \cos(2 * T_{rm})) + T_{rm}) + 2 * (\cos(\sec(T_{rm} + \sec(\cos(3 * T_{rm} + T_{rm}))))$	2.84
T_c -5 PG	T_{rm} , Ta, HR, Va, Met, VST	$T_c = Ta - 2 * (VST)$	0.62
T_c -6 PG	T_{rm} , Ta, HR, Va, Met, VST	$T_c = \sec(\cos(T_{rm})) + T_{rm}$	0.58

La **Tabla 15** muestra la temperatura mínima, máxima y promedio con los modelos locales propuestos con programación genética utilizando el conjunto de datos del caso de estudio con clima cálido seco obtenidos en el mes de septiembre. El modelo propuesto T_c -1 lineal presenta temperaturas máximas de 27.3 °C, mínimas de 26.2 °C y promedio de 26.8 °C, sin embargo, el RMSE del modelo es de 2.95 °C. El modelo T_c -2-4 presenta un RMSE de 2.84 a 2.85 °C, y la temperatura son de 27.5, 29.5 y 27.3 °C. Los modelos que mejor se comportaron fueron los modelos de T_c -5 y T_c -6, los que utilizaron seis variables independientes para determinar la T_c con programación genética. T_c -5 y T_c -6 presentan temperaturas mínimas de 18.0 y 24.2 °C, máximas de 37.9 y 30.4 °C, con promedio de 26.7 °C y 27.2 °C. Analizando las temperaturas propuestas por los modelos, los modelos que presentan temperaturas más coherentes de acuerdo al comportamiento y las necesidades humanas son T_c -3, T_c -4 y T_c -6.

Tabla 15. Temperatura mínima, máxima y promedio de los modelos locales propuestos.

	T_c -1	T_c -2	T_c -3	T_c -4	T_c -5	T_c -6
Min	26.2 °C	27.5 °C	22.6 °C	23.3 °C	18.0 °C	24.2 °C
Max	27.3 °C	27.5 °C	31.3 °C	29.9 °C	37.9 °C	30.4 °C
Promedio	26.8 °C	27.5 °C	29.5 °C	27.3 °C	26.7 °C	27.2 °C

La predicción de los modelos se determina con el cálculo de las temperaturas de confort de los modelos propuestos anteriormente. Las temperaturas de confort se representan en gráficas de cajas como se muestra en la **Figura 34**. Los resultados se agrupan en tres ejercicios distintos, cada uno

representado por un conjunto de tres modelos. El análisis fue para conocer la consistencia, estabilidad y precisión de las predicciones realizadas con los modelos en diferentes escenarios. En el primer ejercicio, los modelos tienen distribuciones compactas e intervalos intercuartílicos reducidos. La mayoría de las predicciones están concentradas entre 24.0 y 28.0 °C, con mínimos valores atípicos, mostrando estabilidad en las predicciones. Sin embargo, los modelos muestran mayor variabilidad en las predicciones de la temperatura de confort, indicando que las fórmulas generadas pueden ser sensibles a los datos de entrada. En el segundo ejercicio, la distribución es más estable, con menor variación y menos valores atípicos en comparación con el anterior. Las medianas de los tres modelos se alinean, lo que coincide con el hecho de que los modelos tienen fitness similares (0.62). Esto indica que las fórmulas generadas por la PG son equivalentes en su capacidad de predicción. Sin embargo, las cajas más grandes indican mayor dispersión en los valores centrales y las predicciones no se agrupan tan cerca de la mediana. Los valores atípicos alcanzan hasta 38.0 °C, este intervalo amplio puede sugerir que los modelos del ejercicio dos (cajas verdes) son menos confiables. En el tercer ejercicio, los modelos presentaron una distribución más compacta, con predicciones muy cercanas entre sí y valores extremos mínimos, lo que indica mayor consistencia en las predicciones. No obstante, la gráfica muestra algunos valores atípicos, son menos significativos que los verdes. La mediana está mejor centrada y las predicciones están más controladas dentro de un intervalo razonable. Con estos ejercicios se observa que, los modelos de confort presentan temperaturas coherentes, para los casos 1 y 3, mientras que en el caso 2 presenta valores atípicos que pueden rebasar la credibilidad y confiabilidad del modelo. Los resultados muestran una mejora de hasta cinco veces

más, en relación con el modelo de regresión lineal simple y valores de temperatura coherentes con los observados en campo.

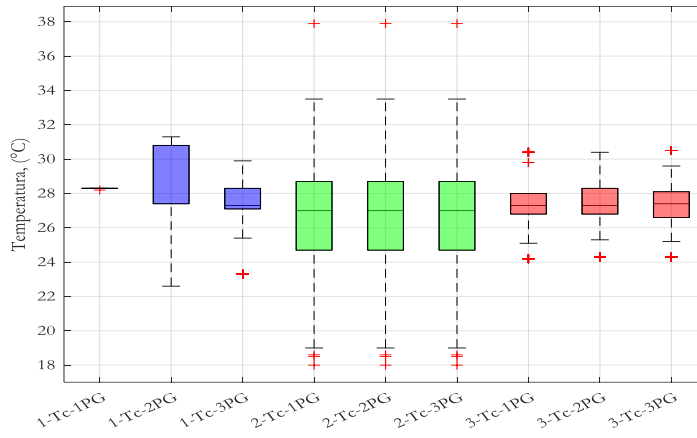


Figura 34. Box plot de la T_c utilizando modelos adaptativos propuestos con PG.

La búsqueda de la expresión matemática con programación genética se realizó con diversos ejercicios, utilizando datos de entrada y salida diferentes, generando aproximadamente 30000 representaciones matemáticas, de las cuales se seleccionaron las mejores de cada ejercicio, evaluadas en términos de su precisión utilizando el RMSE y el R^2 . La **Tabla 16** muestra tres modelos de tres diferentes ejercicios. El primer ejercicio consideró como datos de entrada la temperatura de corriente exterior T_{rm} y como variable de salida la temperatura de confort T_c , con el fin de encontrar el mejor ajuste. En el segundo ejercicio, se mantuvieron los mismos parámetros para modelar la relación entre múltiples variables independientes T_{rm} , T_a , HR , V_a , Met , VST y la variable dependiente T_c definida de acuerdo con el índice de Griffiths ($T_c - Griffiths$). El tercer ejercicio se realizó considerando variables independientes T_{rm} , T_a , HR , V_a , Met y VST y ($T_c - PG$) como variable dependiente a partir de un modelo con programación genética del ejercicio anterior. Los diferentes ejercicios resaltan la flexibilidad de la programación genética para generar modelos precisos y diversos, donde las relaciones no lineales entre T_{rm} y las variables ambientales son determinantes para predecir la T_c . Los resultados del fitness en los ejercicios 2 y 3 son relativamente bajos (0.58-0.62) lo que podría indicar un buen ajuste a los datos de entrenamiento.

Tabla 16. Representaciones matemáticas obtenidas con programación genética.

	Modelo	Representación	RMSE
Ejercicio 1	1- T_c -1 PG	$T_c = 27.30 + \operatorname{acsch}(\tan(\sec(\tan(\operatorname{asinh}(T_a * \operatorname{acsch}(T_{rm})))))) + 2.8814)$	2.84
	1- T_c -2 PG	$T_c = \operatorname{real}(26.908 + 3 * \operatorname{atan}(\operatorname{acoth}(\operatorname{acoth}(\cot(\cosh(T_{rm}) + 0.0371))))))$	2.85
	1- T_c -3 PG	$T_c = \operatorname{norm}(\operatorname{acos}(\sec(\cos(T_{rm})) + T_{rm} + \cos(2 * T_{rm})) + T_{rm} + 2 * \cos(\sec(T_{rm} + \sec(\cos(3 * T_{rm} + T_{rm}))))))$	2.84
Ejercicio 2	2- T_c -1 PG	$T_c = T_a - 2 * VST$	0.62
	2- T_c -2 PG	$T_c = \operatorname{abs}(T_a - VST) - VST$	0.62
	2- T_c -3 PG	$T_c = T_a - 2 * VST$	0.62
Ejercicio 3	3- T_c -1 PG	$T_c = \sec(\cos(T_{rm})) + T_{rm}$	0.58
	3- T_c -2 PG	$T_c = T_{rm} + \sqrt{\operatorname{acoth}(\cos(T_{rm}))}$	0.60
	3- T_c -3 PG	$T_c = T_{rm} + \operatorname{coth}(\operatorname{coth}(T_{rm}))$	0.60

El ejercicio 1 permite determinar expresiones complejas o difíciles de interpretar físicamente, por lo que se evalúa su complejidad y factibilidad de cada modelo propuesto. El ejercicio 1 muestra una mejora relativamente baja en comparación con el modelo de regresión lineal simple (2.95), sin embargo, la precisión mejoró solo hasta 2.84, lo que podría indicar que fue el mayor ajuste logrado. En el ejercicio 2, los tres modelos tienen exactamente el mismo fitness 0.62, esto podría indicar que la PG convergió a soluciones muy similares. En general, los modelos del Ejercicio 1 ofrecen una complejidad matemática más elevada, pero con errores (fitness cercanos a 2.84) que pueden limitar su precisión. Los modelos del Ejercicio 2 son los más simples y presentan una buena precisión fitness=0.62, pudiendo ser buenos para aplicaciones prácticas. Los modelos del Ejercicio 3 presentan el mejor desempeño fitness=0.58–0.60, equilibrando su precisión y complejidad, lo que puede hacerlos adecuados para aplicación. Algunos modelos, especialmente los del Ejercicio 1, podrían estar demasiado ajustados a los datos de entrenamiento, lo que significa que tal vez no funcionen bien con datos nuevos.

4.3 Ahorro energético

Una vez desarrollados y validados los modelos locales de temperatura de confort adaptativos, se procede a evaluar su impacto energético en un edificio educativo representativo, mediante simulaciones dinámicas, lo cual se presenta en la siguiente sección.

4.3.1 Ahorros estimado con modelo adaptativo lineal simple

El desempeño energético se evaluó con modelos de confort térmico para la temporada de verano (20 de junio a 20 de septiembre) en Torreón, México, utilizando datos climáticos de un año meteorológico típico. Las secciones siguientes presentan la demanda de energía para refrigeración y el potencial de ahorro energético en dos escenarios operativos: aire acondicionado AC y ventilación natural VN.

Modo AC- Carga térmica de enfriamiento

La demanda de energía para refrigeración se evaluó con cada modelo de confort térmico en verano, en condiciones de AC. La **Tabla 17** muestra que el modelo propuesto aumenta las temperaturas promedio de confort hasta 26.6 °C, 1.6 °C en comparación con el modelo estático NOM-008 (25.0 °C) y el modelo Indraganti (23.9 °C), lo que reduce los requerimientos de energía. La temperatura de confort con el modelo Fanger PMV fue de 25.7 °C, 0.7 °C mayor que la NOM-008, debido a su dependencia de un conjunto más amplio de variables ambientales y fisiológicas.

Tabla 17. Promedio, mínimo y máximo de valores de modelos de T_c comparados en AC, temporada de verano.

°C	T_m	T_{rm}	T_c Indraganti	T_c Nom-008	T_c Fanger	T_c Modelo propuesto-AC
Promedio	28.3	28.6	23.9	25	25.7	26.6
Min	19.4	24.5	23.7	-	-	25.7
Max	33.3	32.7	24.1	-	-	27.5

La **Figura 35** muestra que el modelo adaptativo propuesto logró el menor consumo de energía para refrigeración, con 70.4 kWh/m², lo que representa una reducción del 24.2% con respecto a la NOM-008 (92.9 kWh/m²). El modelo Fanger PMV también mostró un ahorro moderado de 82.1 kWh/m², lo que representa un ahorro energético del 11.5%. En contraste, el modelo Indraganti aumentó 109.8

kWh/m^2 , superando la referencia estática en un 18.3%. Por lo tanto, el modelo adaptativo propuesto permite temperaturas de confort más altas, reduciendo la necesidad de refrigeración activa. Estos resultados resaltan la importancia de ajustar los modelos de confort a las condiciones climáticas locales y a la adaptación del usuario. Se realizó un ANOVA de una vía para comparar las temperaturas de confort térmico previstas entre los cuatro modelos. Las diferencias estadísticamente significativas ($F=3419.61$; $p<0,00001$) confirman que las temperaturas de confort previstas no son estadísticamente equivalentes entre los modelos.

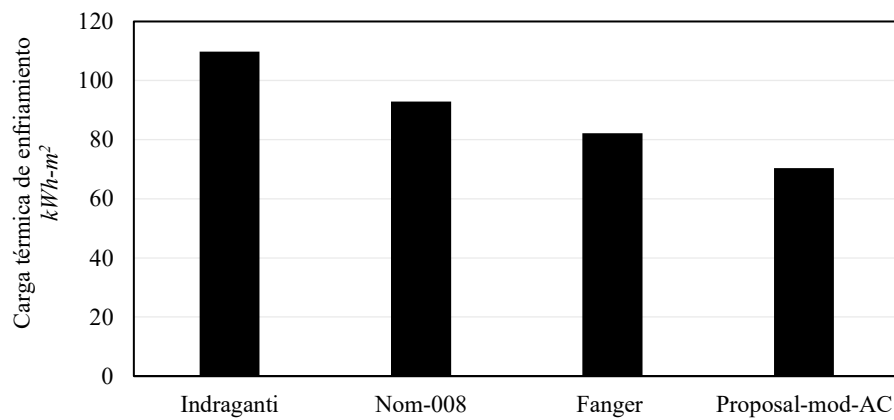


Figura 35. Comparativo de las cargas térmicas con los modelos propuestos.

Modo VN - Grados día de enfriamiento GDE

La **Tabla 18** muestra una comparación de la T_c calculada con los diferentes modelos. El modelo adaptativo propuesto arrojó una T_c promedio de 26.2 °C; el modelo adaptativo estándar mexicano predijo un promedio menor de 23.7 °C, y el modelo estático NOM-008 se mantiene fijo en 25.0 °C. Esta diferencia de hasta 2.5 °C destaca la mayor flexibilidad que ofrece el modelo propuesto, que considera la retroalimentación real de los ocupantes y la adaptación a las condiciones climáticas.

Tabla 18. Comparativo de la T_c con diferentes modelos.

°C	T_m	T_{rm}	T_c Mex-model	T_c Nom-008	T_c modelo propuesto
Promedio	28.3	28.6	23.7	25.0	26.2
Min	19.4	24.5	21.9	-	25.2
Max	33.3	32.7	24.7	-	27.2

La **Figura 36** muestra el comparativo de grados día de enfriamiento. El modelo adaptativo propuesto mostró la demanda de enfriamiento más baja con 247.4 GDE, seguido de 338.4 GDE con el modelo estático NOM-008 y 455.8 GDE en el modelo adaptativo estándar mexicano. Este último significa un ahorro potencial de energía de 26.9% en comparación con la línea base NOM-008. En contraste, el modelo de INIFED predijo requisitos de enfriamiento significativamente mayores, 45.7% más que el modelo VN propuesto, lo que sugiere que puede subestimar la adaptación real del usuario en climas semiáridos cálidos como el de Torreón. Estos hallazgos respaldan el uso del modelo propuesto para reducir las cargas de enfriamiento en espacios con ventilación natural, especialmente en edificios educativos con acceso limitado a sistemas activos. Un ANOVA de una vía mostró diferencias significativas en las predicciones de temperatura de confort entre los tres modelos ($F = 578.776$, $p < 0.00001$).

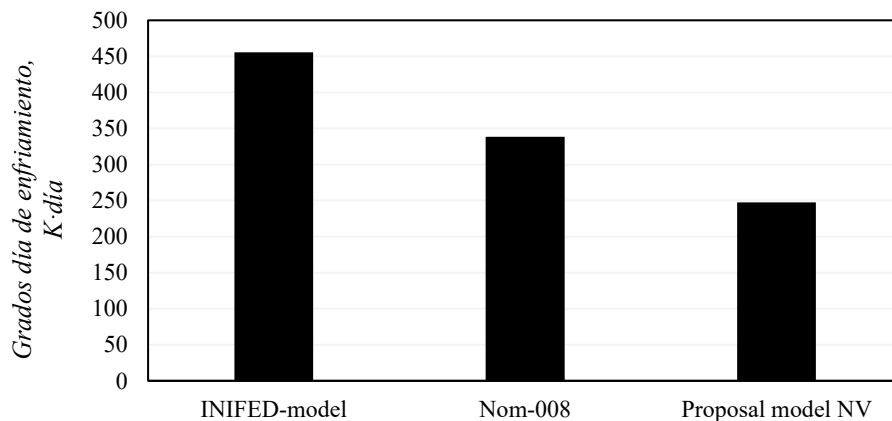


Figura 36. Comparativo de grados día de enfriamiento con diferentes modelos de confort adaptativo.

4.3.2 Ahorros estimado con modelos adaptativos utilizando programación genética

El desempeño energético se evaluó con modelos de confort térmico adaptivo con programación genética a lo largo de todo un año en Torreón, México, utilizando datos climáticos de un año meteorológico típico. En la **Tabla 19** se presentan resultados con los modelos de confort térmico de referencia y los propuestos con programación genética. La temperatura de referencia considerando la

NOM-008-ENER-2001 que se utilizó en la simulación presenta una carga térmica anual de 27.7 *MWh*, con el modelo lineal propuesto de 20.5 *MWh-año*, mientras que, con los modelos se pudieron observar cargas térmicas de hasta 12.4 *MWh- año* con ahorros significativos de hasta 55.0% para el modelo 1-*Tc-1*, mientras que para el modelo 3-*Tc-1 PG*, con fitness=0.58, se encontraron ahorros en la carga térmica anual de hasta el 35.0%. Así se puede observar que, la programación genética puede mejorar la precisión del modelado de confort térmico y generar ahorros de energía.

Tabla 19. Comparativo de ahorros en la carga térmica anual (*MWh*).

<i>MWh</i>	<i>T_c - 25</i>	Lineal simple	1- <i>T_c 1</i>	1- <i>T_c 2</i>	1- <i>T_c 3</i>	2- <i>T_c 4</i>	2- <i>T_c 5</i>	2- <i>T_c 6</i>
Carga térmica	27.7	20.5	12.4	18.9	22.6	18.3	18.0	18.6
Diferencia		7.19	15.24	8.73	5.07	9.32	9.65	9.00
Ahorro		26.0%	55.0%	32.0%	18.0%	34.0%	35.0%	33.0%

La **Figura 38** muestra la carga térmica anual utilizando los modelos propuestos considerando la referencia con la NOM-008-ENER-2001 y el modelo de regresión lineal simple. Para este primer ejercicio se obtuvieron cargas térmicas anuales menores a 3.0 *MWh-mes* con el modelo de programación, mientras que con la referencia la carga térmica fue de hasta 4.8 *MWh-mes*.

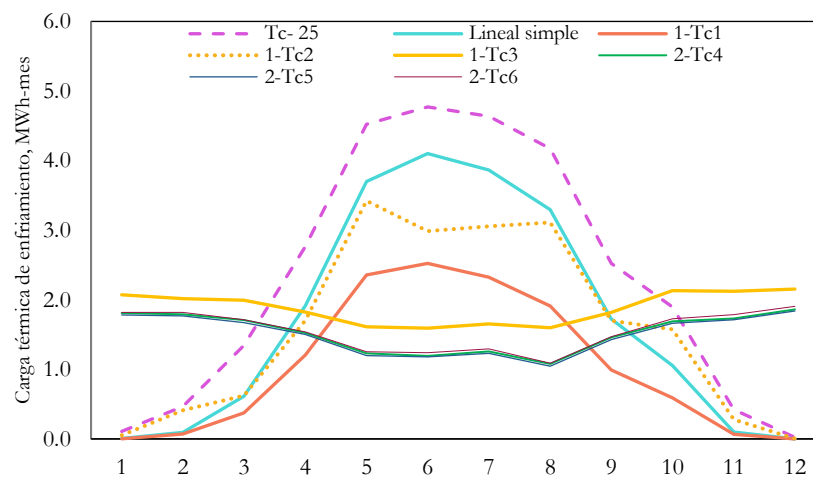


Figura 37. Carga térmica anual utilizando los modelos propuestos con regresión simple y programación genética.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

Este capítulo presenta las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros de ahorro de energía en edificios educativos en clima cálido seco implementando modelos de confort térmico adaptativo.

5.1 Conclusiones

Este estudio busca el ahorro energético implementando modelos de confort térmico adaptativo propuestos en un clima cálido semidesértico en edificios educativos con aire acondicionado y ventilación natural en Torreón, México.

Este estudio revela que, en edificios climatizados con aire acondicionado, el modelo de confort propuesto puede lograr un ahorro energético para la temporada de verano de hasta un 24.2% en comparación con la NOM-008-ENER-2001 al pasar de 92.9 a 70.4 kWh/m^2 . En ventilación natural, el modelo propuesto ajusta la temperatura de confort T_c a las condiciones del lugar de estudio, hasta 3.7 °C por encima de los modelos convencionales utilizados en México. En ventilación natural, el modelo propuesto muestra un potencial de ahorro del 45.7% en comparación con un modelo mexicano propuesto por INIFED basado en la reducción de la GDE.

Los resultados usando programación genética, mejoró hasta cinco veces más la exactitud del cálculo de la temperatura de confort (fitness=0.58 °C) y posibles ahorros anuales de hasta el 55.0% y mensuales de hasta el 75.0% respecto a la NOM-008-ENER-2001.

Las temperaturas interiores en ventilación natural fueron hasta 3.0 °C más altas que en modo aire acondicionado, y la variación de la humedad relativa fue de tan solo un 2.2%. En aire acondicionado, para una VST de cero, la T_c media fue significativamente menor que en los espacios con ventilación natural, con una diferencia de 1.9 °C. En aire acondicionado, el 46.0% de los encuestados se siente cómodo con una temperatura máxima de 26.1 °C, mientras que en modo de ventilación natural, el 37.0% se siente cómodo con una temperatura máxima de 28.8 °C. En aire acondicionado, se experimenta un ligero sobreenfriamiento, lo que provoca incomodidad térmica por frío en el 36.0 % de los ocupantes. En modo de ventilación natural, el 52.0% de los ocupantes experimenta temperaturas incómodas debido a la incomodidad del calor.

En aire acondicionado, el 53.9% prefiere una humedad relativa del $42.5\% \pm 6.0\%$; en modo de ventilación natural, el 34.5% elige una humedad relativa del $39.9\% \pm 7.7\%$. En modo de ventilación natural, los ocupantes perciben variaciones más significativas de humedad, lo que resulta en una experiencia menos confortable. En modo de ventilación natural, el 45.7% de los encuestados prefiere un poco más de movimiento de aire en modo de ventilación natural, y en modo de ventilación natural, el 63.1%. El 85.9% y el 77.4% de los encuestados votaron por un ambiente térmico confortable para aire acondicionado y modo de ventilación natural, respectivamente.

5.2 Recomendaciones para trabajos futuros

- a) Implementación de modelos de confort térmico en un sistema experimental en edificio piloto (validación de los datos simulados).
- b) Evaluación de la adaptación en tiempo real y desarrollo de algoritmos para ajustar la temperatura de confort según condiciones externas e internas.
- c) Aplicación de la metodología en climas distintos al cálido seco, como climas templados o tropicales y evaluación de su aplicabilidad en distintos tipos edificios.
- d) Integración de energías renovables, analizando la implementación de modelos adaptativos en conjunto con estrategias de generación de energía renovable en edificios educativos.

Referencias

- [1] López-Pérez LA, Flores-Prieto JJ, Ríos-Rojas C. Comfort temperature prediction according to an adaptive approach for educational buildings in tropical climate using artificial neural networks. *Energy Build* 2021;251:111328. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111328>.
- [2] Karyono K, Abdullah BM, Cotgrave AJ, Bras A. The adaptive thermal comfort review from the 1920s, the present, and the future. *Developments in the Built Environment* 2020;4:100032. <https://doi.org/10.1016/j.dibe.2020.100032>.
- [3] Pérez-Fargallo A, Pulido-Arcas JA, Rubio-Bellido C, Trebilcock M, Piderit B, Attia S. Development of a new adaptive comfort model for low income housing in the central-south of Chile. *Energy Build* 2018;178:94–106. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.08.030>.
- [4] Attia S, Carlucci S. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy Build* 2015;102:117–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.017>.
- [5] Wu Z, Li N, Wargocki P, Peng J, Li J, Cui H. Adaptive thermal comfort in naturally ventilated dormitory buildings in Changsha, China. *Energy Build* 2019;186. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.01.029>.
- [6] Semahi S, Zemmouri N, Singh MK, Attia S. Comparative bioclimatic approach for comfort and passive heating and cooling strategies in Algeria. *Build Environ* 2019;161. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106271>.
- [7] Ezratty V, Ormandy D. Thermal discomfort and health: Protect the susceptible (part 2). *Environnement, Risques et Sante* 2015;14. <https://doi.org/10.1684/ers.2015.0785>.
- [8] Sattayakorn S, Ichinose M, Sasaki R. Clarifying thermal comfort of healthcare occupants in tropical region: A case of indoor environment in Thai hospitals. *Energy Build* 2017;149. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.05.025>.
- [9] López-Pérez LA, Flores-Prieto JJ, Ríos-Rojas C. Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. *Build Environ* 2019;150:181–94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011>.
- [10] Oropeza-Perez I, Petzold-Rodriguez AH, Bonilla-Lopez C. Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy Build* 2017;145:251–8. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.031>.
- [11] Yang D, Xiong J, Liu W. Adjustments of the adaptive thermal comfort model based on the running mean outdoor temperature for Chinese people: A case study in Changsha China. *Build Environ* 2017;114:357–65. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.12.038>.
- [12] Thapa S, Bansal AK, Panda GK. Thermal comfort in naturally ventilated office buildings in cold and cloudy climate of Darjeeling, India – An adaptive approach. *Energy Build* 2018;160:44–60. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2017.12.026>.
- [13] Al-Atrash F, Hellwig RT, Wagner A. The degree of adaptive thermal comfort in office workers in a hot-summer Mediterranean climate. *Energy Build* 2020;223. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110147>.

- [14] Fu C, zheng Z, Mak CM, Fang Z, Oladokun MO, Zhang Y, et al. Thermal comfort study in prefab construction site office in subtropical China. *Energy Build* 2020;217. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109958>.
- [15] Sánchez-Montes JG, Flores-Prieto JJ, López-Pérez LA, Ríos-Rojas C. Adaptive thermal comfort models comparison in dry and rainy seasons: A tropical climate case. *Energy Build* 2025;331:115382. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115382>.
- [16] Zheng Z, Zhang Y, Mao Y, Yang Y, Fu C, Fang Z. Analysis of SET* and PMV to evaluate thermal comfort in prefab construction site offices : Case study in South China. *Case Studies in Thermal Engineering* 2021;26:101137. <https://doi.org/10.1016/J.CSITE.2021.101137>.
- [17] Hsieh CM, Li JJ, Zhang L, Schwegler B. Effects of tree shading and transpiration on building cooling energy use. *Energy Build* 2018;159:382–97. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.045>.
- [18] Ricciardi P, Buratti C. Thermal comfort in open plan offices in northern Italy: An adaptive approach. *Build Environ* 2012;56:314–20. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2012.03.019>.
- [19] Ruiz-Ortega FJ, Clemente E, Martínez-Rebollar A, Flores-Prieto JJ. An evolutionary parsimonious approach to estimate daily reference evapotranspiration. *Sci Rep* 2024;14:6736. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-56770-3>.
- [20] Karyono K, Abdullah BM, Cotgrave A, Bras A, Cullen J. Field studies of the Artificial Intelligence model for defining indoor thermal comfort to acknowledge the adaptive aspect. *Eng Appl Artif Intell* 2024;133:108381. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.108381>.
- [21] Deng Z, Chen Q. Artificial neural network models using thermal sensations and occupants' behavior for predicting thermal comfort. *Energy Build* 2018;174:587–602. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.06.060>.
- [22] May Tzuc O, Livas-García A, Jiménez Torres M, Cruz May E, López-Manrique LM, Bassam A. Artificial Intelligence Techniques for Modeling Indoor Building Temperature under Tropical Climate Using Outdoor Environmental Monitoring. *Journal of Energy Engineering* 2020;146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000649](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000649).
- [23] Xiong L, Yao Y. Study on an adaptive thermal comfort model with K-nearest-neighbors (KNN) algorithm. *Build Environ* 2021;202. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108026>.
- [24] Xu C, Li S, Zhang X, Shao S. Thermal comfort and thermal adaptive behaviours in traditional dwellings: A case study in Nanjing, China. *Build Environ* 2018;142. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.06.006>.
- [25] Rijal HB, Humphreys MA, Nicol JF. Adaptive model and the adaptive mechanisms for thermal comfort in Japanese dwellings. *Energy Build* 2019;202:109371. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109371>.
- [26] Huang Z, Cheng B, Gou Z, Zhang F. Outdoor thermal comfort and adaptive behaviors in a university campus in China's hot summer-cold winter climate region. *Build Environ* 2019;165. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.106414>.

- [27] Jiao Y, Yu H, Yu Y, Wang Z, Wei Q. Adaptive thermal comfort models for homes for older people in Shanghai, China. *Energy Build* 2020;215:109918. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109918>.
- [28] Nicol JF, Humphreys MA. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy Build*, vol. 34, 2002, p. 563–72. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3).
- [29] Bouden C, Ghrab N. An adaptive thermal comfort model for the Tunisian context: A field study results. *Energy Build* 2005;37:952–63. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.003>.
- [30] Marincic I, Ochoa JM, Alpuche MG, Gómez-Azpeitia G. Adaptive Thermal Comfort for Occupants of Low-Cost Dwellings in a Hot Dry Climate. vol. 6. 2012.
- [31] van Hoof J, Hensen JLM. Quantifying the relevance of adaptive thermal comfort models in moderate thermal climate zones. *Build Environ* 2007;42:156–70. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.08.023>.
- [32] Attia S, Carlucci S. Impact of different thermal comfort models on zero energy residential buildings in hot climate. *Energy Build* 2015;102:117–28. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.017>.
- [33] Hoyt T, Arens E, Zhang H. Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Build Environ* 2015;88:89–96. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2014.09.010>.
- [34] Wu T, Cao B, Zhu Y. A field study on thermal comfort and air-conditioning energy use in an office building in Guangzhou. *Energy Build* 2018;168:428–37. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.03.030>.
- [35] Wu Z, Li N, Wargocki P, Peng J, Li J, Cui H. Field study on thermal comfort and energy saving potential in 11 split air-conditioned office buildings in Changsha, China. *Energy* 2019;182:471–82. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.05.204>.
- [36] Du C, Li B, Yu W, Liu H, Yao R. Energy flexibility for heating and cooling based on seasonal occupant thermal adaptation in mixed-mode residential buildings. *Energy* 2019;189:116339. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.116339>.
- [37] Ming R, Yu W, Zhao X, Liu Y, Li B, Essah E, et al. Assessing energy saving potentials of office buildings based on adaptive thermal comfort using a tracking-based method. *Energy Build* 2020;208:109611. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2019.109611>.
- [38] Xu C, Li S, Zhang X. Energy flexibility for heating and cooling in traditional Chinese dwellings based on adaptive thermal comfort: A case study in Nanjing. *Build Environ* 2020;179:106952. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.106952>.
- [39] de Dear R. Thermal comfort in practice. *Indoor Air* 2004;14:32–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2004.00270.x>.
- [40] ANSY/ASHRAE. Estándar ANSI / ASHRAE 55 - Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) , Atlanta, GA, EE. UU. 2004.

- [41] de Dear R, Xiong J, Kim J, Cao B. A review of adaptive thermal comfort research since 1998. *Energy Build* 2020;214:109893. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109893>.
- [42] Rupp RF, Parkinson T, Kim J, Toftum J, de Dear R. The impact of occupant's thermal sensitivity on adaptive thermal comfort model. *Build Environ* 2022;207:108517. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2021.108517>.
- [43] Zhao Q, Lian Z, Lai D. Thermal comfort models and their developments: A review. *Energy and Built Environment* 2021;2:21–33. <https://doi.org/10.1016/J.ENBENV.2020.05.007>.
- [44] Shrestha M, Rijal HB, Kayo G, Shukuya M. A field investigation on adaptive thermal comfort in school buildings in the temperate climatic region of Nepal. *Build Environ* 2021;190. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107523>.
- [45] Giamalaki M, Kolokotsa D. Understanding the thermal experience of elderly people in their residences: Study on thermal comfort and adaptive behaviors of senior citizens in Crete, Greece. *Energy Build* 2019;185. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.025>.
- [46] Korsavi SS, Montazami A. Children's thermal comfort and adaptive behaviours; UK primary schools during non-heating and heating seasons. *Energy Build* 2020;214. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109857>.
- [47] Ozarisoy B, Altan H. Regression forecasting of 'neutral' adaptive thermal comfort: A field study investigation in the south-eastern Mediterranean climate of Cyprus. *Build Environ* 2021;202:108013. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108013>.
- [48] Aparicio-Ruiz P, Barbadilla-Martín E, Martín JG, Sanz JM. A field study on adaptive thermal comfort in Spanish primary classrooms during summer season. *Build Environ* 2021;108089. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108089>.
- [49] Williamson T, Daniel L. A new adaptive thermal comfort model for homes in temperate climates of Australia. *Energy Build* 2020;210:109728. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109728>.
- [50] Parkinson T, de Dear R, Brager G. Nudging the adaptive thermal comfort model. *Energy Build* 2020;206. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109559>.
- [51] Jendritzky G, de Dear R, Havenith G. UTCI—Why another thermal index? *Int J Biometeorol* 2012;56:421–8. <https://doi.org/10.1007/s00484-011-0513-7>.
- [52] Humphreys MA, Fergus Nicol J. Principles of Adaptive Thermal Comfort. In: Kubota T, Rijal HB, Takaguchi H, editors. *Sustainable Houses and Living in the Hot-Humid Climates of Asia*, Singapore: Springer Singapore; 2018, p. 103–13. https://doi.org/10.1007/978-981-10-8465-2_10.
- [53] Rijal HB, Humphreys MA, Nicol JF. Towards an adaptive model for thermal comfort in Japanese offices. *Building Research & Information* 2017;45:717–29. <https://doi.org/10.1080/09613218.2017.1288450>.
- [54] ANSY/ASHRAE. Estándar ANSI / ASHRAE 55 - Condiciones ambientales térmicas para la ocupación humana Sociedad Estadounidense de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE) , Atlanta, GA, EE. UU. 2004.

- [55] Auliciems A, Szokolay S. Thermal comfort- Notes of passive and low energy architecture international. PLEA, University of Queensland. 1997.
- [56] ISO. International Standard International Standard - ISO 7730. Iso 2005;2005.
- [57] de Dear RJ, Brager GS. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy Build* 2002;34:549–61.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1).
- [58] Sánchez-Montes JG, Flores-Prieto JJ. Diseño de una habitación climatizada con cero energías convencionales, considerando el enfoque adaptativo. Maestría. Tesis de Maestría, CENIDET TecNM, 2021.
- [59] Indraganti M, Ooka R, Rijal HB. Thermal comfort in offices in India: Behavioral adaptation and the effect of age and gender. *Energy Build* 2015;103:284–95.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.05.042>.
- [60] Rijal HB, Yoshida K, Humphreys MA, Nicol JF. Development of an adaptive thermal comfort model for energy-saving building design in Japan. *Archit Sci Rev* 2021;64:109–22.
<https://doi.org/10.1080/00038628.2020.1747045>.
- [61] Rijal HB, Humphreys MA, Nicol JF. Adaptive model and the adaptive mechanisms for thermal comfort in Japanese dwellings. *Energy Build* 2019;202:109371.
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109371>.
- [62] Garcia E. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana. OFFSET Larios 1988;4ed.
- [63] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. SEMARNAT. 2010.
- [64] Prieto G. El clima de México a través de los mapas. 2015.
- [65] Calixto-Aguirre VI, Huelsz-Lesbros G. Consumo de energía en edificios en México. *Legado de Arquitectura y Diseño* 2018;13:40–7.
- [66] Tocora-Lozano SP, García-González CI. The importance of the school, the professor and the educational work in the attention to school desertio. Varona 2018.
- [67] Navarro Chávez JCL, Gómez Monge R, Torres Hernández Z, Navarro Chávez JCL, Gómez Monge R, Torres Hernández Z. Universities in Mexico: a measure of its efficiency through data envelopment analysis with bootstrap. *Acta Univ* 2017;26:60–9.
<https://doi.org/10.15174/au.2016.911>.
- [68] Damiani SA, Zaki SA, Rijal HB, Wonorahardjo S. Field study on adaptive thermal comfort in office buildings in Malaysia, Indonesia, Singapore, and Japan during hot and humid season. *Build Environ* 2016;109. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.024>.
- [69] University Department of Geography, Dr. Shyama Prasad Mukherjee University Ranchi. CLIMATIC CLASSIFICATION OF KOPPEN. n.d.
- [70] Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. Conuee. 2021.
- [71] (IMCO) IM para la C. Índice de Competitividad Urbana. 2021.
- [72] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. 2021.

- [73] López-Pérez LA, Flores-Prieto JJ, Ríos-Rojas C. Comfort temperature prediction according to an adaptive approach for educational buildings in tropical climate using artificial neural networks. *Energy Build* 2021;251:111328. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111328>.
- [74] López-Pérez LA, Flores-Prieto JJ, Ríos-Rojas C. Adaptive thermal comfort model for educational buildings in a hot-humid climate. *Build Environ* 2019;150:181–94. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.011>.
- [75] Wu T, Cao B, Zhu Y. A field study on thermal comfort and air-conditioning energy use in an office building in Guangzhou. *Energy Build* 2018;168:428–37. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2018.03.030>.
- [76] Nicol F, Humphreys M. Derivation of the adaptive equations for thermal comfort in free-running buildings in European standard EN15251. *Build Environ* 2010;45:11–7. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.013>.
- [77] Singh MK, Mahapatra S, Atreya SK. Adaptive thermal comfort model for different climatic zones of North-East India. *Appl Energy* 2011;88:2420–8. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.019>.
- [78] ISO. International Standard International Standard - ISO 7730. Iso 2005;2005.
- [79] ISO 7243. Ergonomics of the thermal environment—assessment of heat stress using the WBGT (wet bulb globe temperature) index. 2017.
- [80] Bern C. Handbook part I: software global meteorological database version 8 software and data for engineers, planners and education. Planers and Education 2022.
- [81] Mishra AK, Ramgopal M. Thermal comfort in undergraduate laboratories - A field study in Kharagpur, India. *Build Environ* 2014;71:223–32. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.006>.
- [82] Humphreys M, Nicol F. Outdoor Temperature and Indoor Thermal Comfort: Raising the Precision of the Relationship for the 1998 Ashrae Database of Field Studies. 2000.
- [83] Mishra AK, Ramgopal M. An adaptive thermal comfort model for the tropical climatic regions of India (Köppen climate type A). *Build Environ* 2015;85:134–43. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.006>.
- [84] CEN E. 15251, Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium 2007.
- [85] Nicol F, Humphreys M, Roaf S. Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice. Routledge; 2012. <https://doi.org/10.4324/9780203123010>.
- [86] Nicol JF, Humphreys MA. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy Build*, vol. 34, 2002, p. 563–72. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3).
- [87] Aparicio-Ruiz P, Barbadilla-Martín E, Martín JG, Sanz JM. A field study on adaptive thermal comfort in Spanish primary classrooms during summer season. *Build Environ* 2021:108089. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108089>.

- [88] Rawal R, Shukla Y, Vardhan V, Asrani S, Schweiker M, de Dear R, et al. Adaptive thermal comfort model based on field studies in five climate zones across India. *Build Environ* 2022;219:109187. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109187>.
- [89] Indraganti M, Boussaa D. An adaptive relationship of thermal comfort for the Gulf Cooperation Council (GCC) Countries: The case of offices in Qatar. *Energy Build* 2018;159:201–12. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.087>.
- [90] INIFED, SEP. NORMAS Y ESPECIFICACIONES PARA ESTUDIOS, PROYECTOS, CONSTRUCCIÓN E INSTALACIONES. 2022.
- [91] Secretaría de Energía (SENER). Norma Oficial Mexicana NOM-008-ENER-2001, Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios no residenciales. Ciudad de México: 2001.
- [92] G. Álvarez-García. B. Shah, F. Rubin, H. Gilbert, G. Domínguez KS. Assessing energy savings from “Cool Roofs” on residential and non-residential buildings in Mexico. 2014. <https://doi.org/https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1930.9041>.
- [93] López-Pérez LA, Flores-Prieto JJ. Adaptive thermal comfort approach to save energy in tropical climate educational building by artificial intelligence. *Energy* 2023;263:125706. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125706>.
- [94] International Energy Agency IEA. Playing my part. París: 2022.
- [95] Carlucci S, Bai L, de Dear R, Yang L. Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Build Environ* 2018;137:73–89. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>.
- [96] Bienvenido-Huertas D, Rubio-Bellido C. Adaptive Thermal Comfort of Indoor Environment for Residential Buildings. Singapore: Springer Singapore; 2021. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-0906-0>.
- [97] Samsuddin S, Durrani F, Eftekhari M. Adaptive Comfort Model Incorporating Temperature Gradient for a UK Residential Building. *Journal of Architectural Engineering Technology* 2019.
- [98] de Dear RJ, Brager GS. Developing an Adaptive Model of Thermal Comfort and Preference. UC Berkeley: Center for the Built Environment 1998;104:145–67.
- [99] de Dear R, Schiller Brager G. The adaptive model of thermal comfort and energy conservation in the built environment. *Int J Biometeorol* 2001;45:100–8. <https://doi.org/10.1007/s004840100093>.
- [100] Zhang S, Lin Z. Adaptive-rational thermal comfort model: Adaptive predicted mean vote with variable adaptive coefficient. *Indoor Air* 2020;30:1052–62. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/ina.12665>.