



Estudio comparativo de temperaturas superficiales de un recinto construido en Querétaro mediante termografía infrarroja y modelación numérica

Comparative study of interior surface temperatures in a built space in Querétaro via infrared thermography and CFD modeling

María José Ugalde Fonseca
Iván Fermín Arjona Catzim
Luis Francisco Pérez Moreno
Enrique Rico García*

Universidad Autónoma de Querétaro,
Querétaro, México.

*ricog@uaq.mx

02

¿CÓMO CITAR ESTE ARTÍCULO?

M. J. Ugalde Fonseca, I. F. Arjona Catzim, L. F. Pérez Moreno y E. Rico García, "Estudio comparativo de temperaturas superficiales de un recinto construido en Querétaro mediante termografía infrarroja y modelación numérica", *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, vol. 9, núm. 16, pp-23-41, 2026.



Resumen

Este estudio analiza el comportamiento térmico interior de un recinto construido en Huimilpan, Querétaro, por medio del cotejo de mediciones experimentales hechas con cámara termográfica infrarroja y simulaciones numéricas basadas en dinámica de fluidos computacional (CFD). El recinto, de 16.38 m², está conformado por muros de bloques de concreto, cubierta de lámina galvanizada y elementos estructurales de concreto colado. Las mediciones se realizaron el 7 de junio de 2025 a las 14:00 h, tomando temperaturas superficiales en los muros internos y condiciones ambientales externas. Después se construyó un dominio tridimensional discretizado con malla poly-hexcore y se aplicaron condiciones de frontera con base en registros *in situ*, incluyendo radiación solar y ventilación cruzada. Los re-

sultados muestran una elevada concordancia entre valores simulados y experimentales, con coeficientes de determinación superiores a 0.93 en los cuatro muros evaluados. Se identificó que la orientación influye directamente en la respuesta térmica, siendo mayor la variabilidad en muros expuestos a radiación solar intensa. El modelo CFD demostró capacidad para reproducir tendencias térmicas reales, validando su estatus como un instrumento de precisión para los análisis de comodidad térmica y la implementación de estrategias de diseño pasivo. Para concluir, la calibración de simulaciones con base en datos experimentales puede contribuir en la planeación arquitectónica y urbanística en contextos climáticos específicos.

Palabras clave: análisis térmico, calentamiento global, CFD, confort térmico, radiación solar, transferencia de calor.

Abstract

This study analyzes the indoor thermal behavior of a building constructed in Huimilpan, Querétaro, by comparing experimental measurements taken with an infrared thermal imaging camera versus numerical simulations based on computational fluid dynamics (CFD). The 16.38 m² building consists of concrete block walls, a galvanized sheet metal roof, as well as cast-in-place concrete structural elements. All measurements were taken on June 7, 2025, at 2:00 p.m., recording surface temperatures on interior walls and external environmental conditions. Sequentially, a three-dimensional virtual model was constructed by means of a poly-hexcore mesh, and boundary conditions based on *in situ* data were applied, including solar radiation

and cross-ventilation. The results show high consistency between simulated and experimental values, with determination coefficients greater than 0.93 on the four walls evaluated. It was found that orientation has direct influence on the thermal response, with greater variability observed in walls exposed to intense solar radiation. The CFD model demonstrated its ability to reproduce observed thermal trends, validating its reliability as a tool in thermal comfort analysis and in the implementation of passive design strategies. It is concluded that the integration of simulations calibrated with experimental data can support architectural and urban planning in specific climatic contexts.

Keywords: thermal analysis, global warming, CFD, thermal comfort, solar radiation, heat transfer.



Introducción

El Grupo Intergubernamental de Expertos Sobre el Cambio Climático afirma que la influencia humana ha provocado incrementos sostenidos en la temperatura media global de la atmósfera, la tierra y el océano, así como la intensificación de climas extremos, tanto en poder destructivo como frecuencia. Así, el calentamiento global, aunado al cambio de uso de suelo debido a la urbanización creciente, ha causado el aumento progresivo en las temperaturas máximas, en particular durante la temporada de primavera, en el estado de Querétaro [1], [2], [3]. Luego, las condiciones térmicas son cada vez más desfavorables al interior de las viviendas [4], especialmente en las construidas con materiales convencionales, pero sin estrategias de diseño pasivo para la atenuación térmica.

La radiación solar influye en el confort térmico de un edificio, especialmente en áreas cercanas a ventanas, al interactuar con parámetros como la orientación, la transmitancia y las proporciones entre vanos y muros [5]. Asimismo, la construcción y operación de los edificios representan el 23 % del consumo energético global y alrededor del 40 % de las emisiones de CO₂. Ante estos problemas la planeación de un edificio debe ponderar su contexto local (orientación, ventilación natural, radiación solar, etc.) [6]. No obstante, se ha evidenciado que la transferencia de calor por convección en superficies externas puede superar de tres a cuatro veces la transferencia por radiación [7], por lo que el confort al interior de una vivienda también depende de la constitución material del edificio en sí.

El presente estudio aplica la dinámica de fluidos computacional (CFD) [8] para evaluar el comportamiento térmico al interior de un edificio habitacional; posteriormente, efectúa una comparación entre las temperaturas superficiales reales medidas con cámara termográfica infrarroja y las obtenidas mediante simulaciones numéricas. El objetivo es evaluar la capacidad del modelo CFD para reproducir el comportamiento térmico observado en el recinto real. De esta manera, el trabajo aporta evidencia sobre la aplicabilidad de herramientas CFD en el análisis del comportamiento térmico de edificaciones en contextos climáticos específicos, contribuyendo también a su uso como herramienta de apoyo en la implementación de estrategias de diseño pasivo.

Fundamentos teóricos

El análisis térmico del recinto involucra fenómenos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación, los cuales actúan de manera conjunta.



Calor (Q)

El calor es una forma de energía en tránsito; por tanto, solo tiene sentido durante un proceso de intercambio energético entre dos sistemas o entre un sistema y su entorno. Los cuerpos no almacenan calor, sino energía interna. Siempre que dos o más cuerpos a diferente temperatura se encuentren, habrá una transferencia de dicha energía interna (energía térmica) del sistema más energizado al menos energizado: a esa transferencia se le denomina *calor*. Al respecto, existen tres mecanismos alternativos de transferencia: radiación, conducción y convección, y todos participan en mayor o menor grado en los procesos reales [9].

Calor específico (Cp)

El intercambio de calor sensible origina una variación de la temperatura del sistema. Sin embargo, si se suministra calor a dos cuerpos con la misma masa y temperatura inicial, la temperatura final puede ser distinta, según la naturaleza de cada cuerpo. Esta propiedad se conoce como *calor específico*, y se define como la cantidad de calor (kJ) que debe absorber 1 kilogramo de sustancia para aumentar su temperatura 1 kelvin. Sus unidades son kJ/kg·K.

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (1)$$

Donde:

C_p calor específico (kJ/kg·K)

Q calor transferido (kJ)

m masa de la sustancia

ΔT variación de temperatura (K)

$$\Delta T = T_{final} - T_{inicial} \quad (2)$$

La capacidad calorífica es un parámetro que indica la capacidad de una sustancia para experimentar cambios de temperatura al absorber o ceder calor. Se denota por C , sus unidades son kJ/K y se define como:

$$C = m \cdot C_p \quad (3)$$



Conducción

La conducción es la transferencia de energía térmica de las partículas más energéticas a las menos energéticas de una sustancia mediante las interacciones entre ellas, originadas por un gradiente de temperatura, sin que exista movimiento macroscópico de materia.

Convección

El modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos: el movimiento molecular aleatorio (difusión) y el movimiento global (o macroscópico) del fluido. La convección se asocia con el hecho de que, en presencia de un gradiente de temperatura, grandes agregados de moléculas se mueven de forma colectiva. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe a una superposición de transporte de energía por difusión y por el movimiento global del fluido. Se acostumbra a utilizar el término *convección* cuando se habla del transporte acumulado y el término *advección* cuando se habla del transporte debido al movimiento volumétrico a gran escala del fluido.

Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita, y puede provenir de sólidos, líquidos y gases. Sin importar el estado de la materia, la radiación se puede atribuir a variaciones en las configuraciones electrónicas de los átomos o las moléculas que la constituyen. La energía del campo de radiación es transmitida por las ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones); por lo tanto, mientras la transferencia de energía por conducción o convección requiere de la presencia de un medio material, la radiación puede darse en el vacío [10].

Dinámica de fluidos computacional

La CFD es una rama de la mecánica de fluidos que recurre a aplicaciones informáticas para analizar y resolver problemas que involucran el movimiento de fluidos, como los métodos de volúmenes finitos, diferencias finitas o elementos finitos. Simplifica las ecuaciones diferenciales que gobiernan el flujo y el transporte de energía y masa (como las de Navier-Stokes) en sistemas algebraicos que luego se resuelven usando algoritmos computacionales. Esto permite predecir



de forma detallada, precisa y confiable el comportamiento de fluidos en escenarios complejos, sin la necesidad de recurrir a experimentos físicos o soluciones analíticas [11], [12].

Elemento finito

El método numérico de los elementos finitos (MEF) se emplea principalmente para resolver problemas de física e ingeniería; no es un método universal, pero posee una gran versatilidad que ha permitido su aplicación en una amplia gama de disciplinas, como la mecánica de sólidos, la transferencia de calor, la dinámica de fluidos y el electromagnetismo, entre otras [13]. El MEF divide un dominio complejo (que puede ser un cuerpo o estructura) en segmentos llamados elementos finitos, conectados en puntos específicos (nodos). A este procedimiento se le conoce como discretización, y en análisis por elementos finitos (FEA, en inglés) permite reducir la necesidad de ensayos físicos de validación al solucionar problemas complejos [14].

Diseño solar pasivo

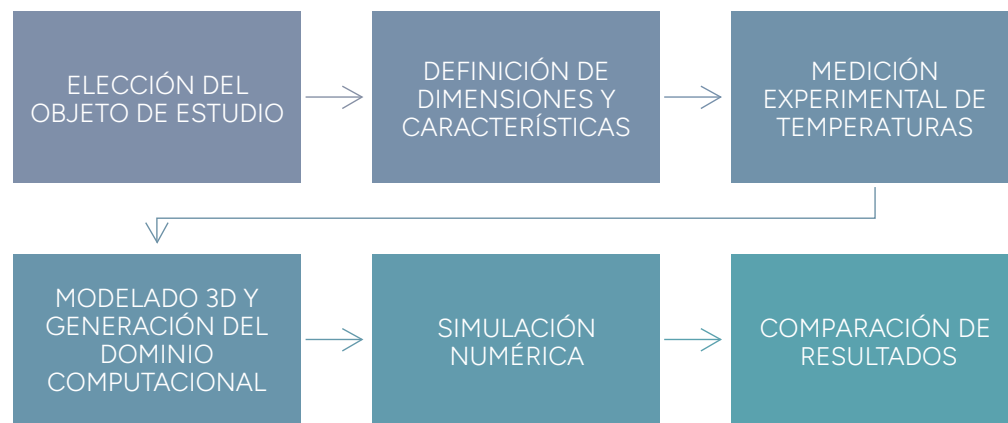
El diseño ecológico se concibe como una estrategia integral que, además de priorizar la reducción del consumo energético, implementa alternativas para reducir el impacto ambiental asociado a la producción de residuos y el consumo de recursos naturales [15]. Dentro de este enfoque, el diseño solar pasivo refiere a la implementación de sistemas constructivos, materiales y soluciones arquitectónicas orientados a mejorar el rendimiento energético del edificio en aspectos como calefacción, refrigeración e iluminación a partir del aprovechamiento de la energía solar sin la implementación de equipamiento adicional a la construcción. La importancia relativa de este ahorro energético varía según la situación y la función del edificio.

Materiales y métodos

Se definió de manera esquemática el procedimiento general seguido en este trabajo, desde la descripción del objeto de estudio hasta la comparación de los resultados experimentales y los obtenidos mediante simulación numérica. El diagrama de la Figura 1 muestra las fases que se siguieron para llevar a cabo el estudio.



FIGURA 1.
Diagrama de la metodología aplicada.
Fuente: elaboración propia.



Objeto de estudio

Se evaluó el comportamiento térmico interior de un recinto ubicado en el municipio de Huimilpan, Querétaro (20.374119, -100.281267). Este espacio cuenta con un área de construcción de 16.38 m² y está constituido como se indica a continuación: los muros están conformados de bloques de concreto macizo; los castillos, dalas y firme, de concreto colado, y la cubierta es de lámina galvanizada. Presenta su eje longitudinal inclinado a 20° al norte respecto del eje oriente-poniente, como se muestra en la Figura 2.

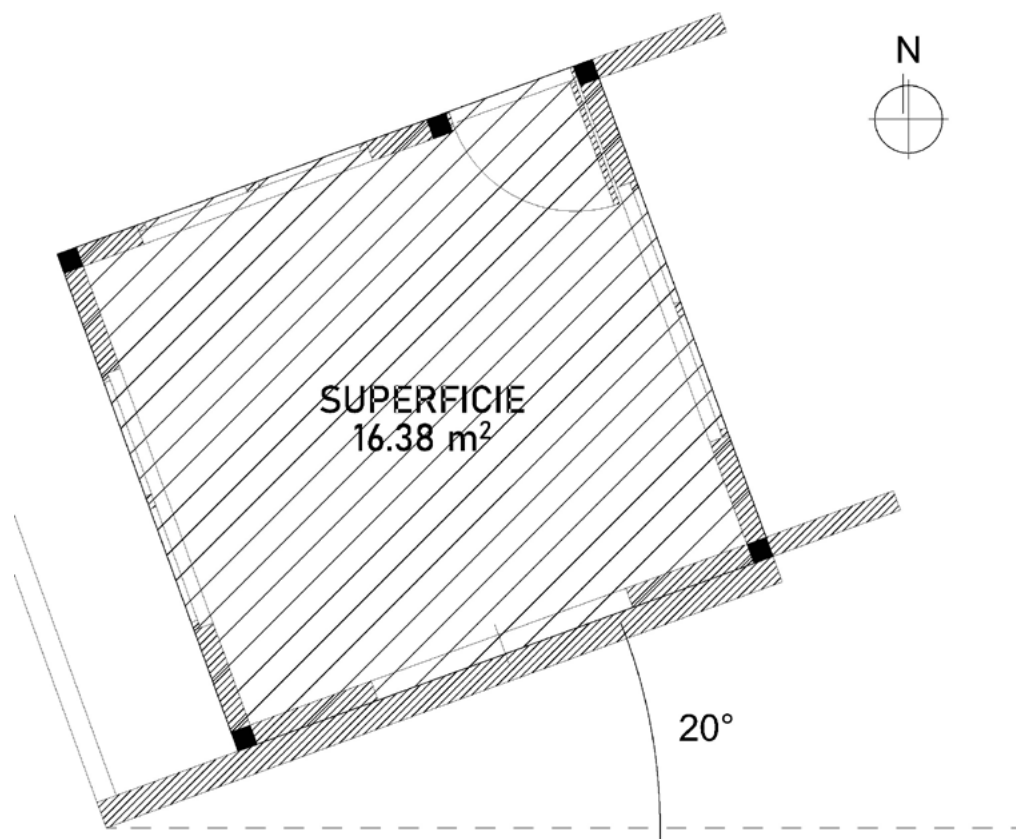


FIGURA 2.
Orientación.
Fuente: elaboración propia.



Definición de dimensiones y características del objeto de estudio

Se realizó un levantamiento arquitectónico del recinto para registrar sus dimensiones exactas, identificar características geométricas relevantes, y trasladarlas a un modelo tridimensional sobre el cual efectuar el análisis CFD. A partir de este levantamiento, se obtuvieron los parámetros exhibidos en las Figuras 3 y 4.

FIGURA 3.

Planta arquitectónica.
Fuente: elaboración propia.

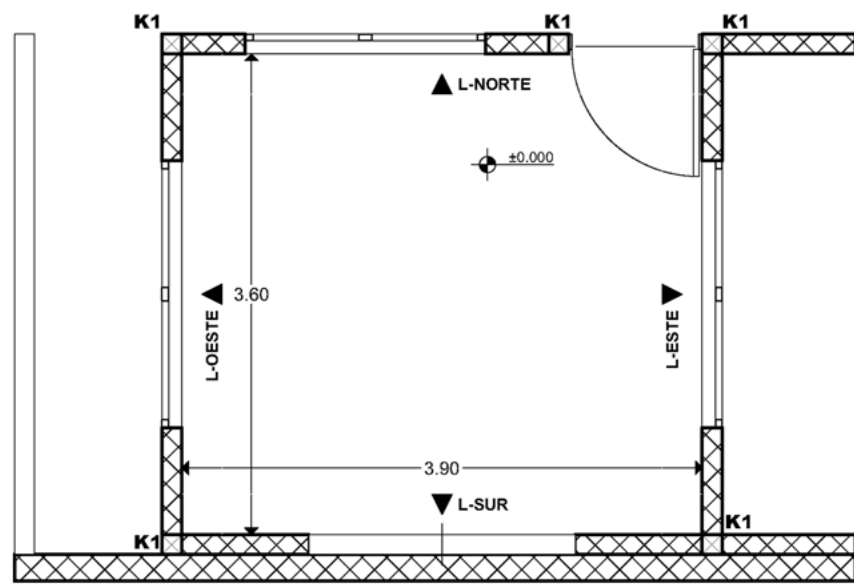
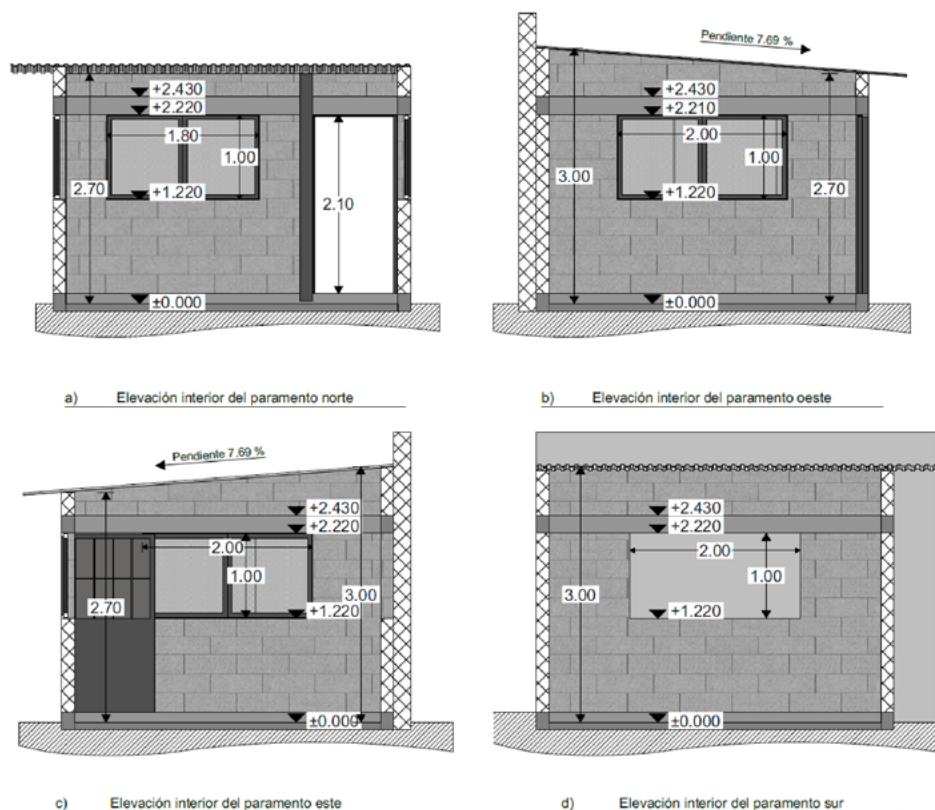


FIGURA 4.

Elevaciones interiores.
Fuente: elaboración propia.





Medición experimental de temperaturas

Los datos se recopilaron en el sitio el 7 de junio de 2025 a las 14:00 horas, horario en que la radiación global mensual puede superar los 200 kWh/m^2 [16] en el estado de Querétaro. En primer lugar, se midió la velocidad y temperatura del viento mediante un anemómetro multiparámetro Testo 445 [17]; después, con una cámara termográfica FLIR i5 [18], se tomaron las temperaturas superficiales en dos puntos de los muros al interior del recinto: el primero a 30 cm de altura desde el nivel de piso terminado y el segundo a 20 cm por debajo del antepecho de cada ventana. Estas alturas se ubican dentro de la zona vertical de ocupación establecida por la ASHRAE, la cual se define entre 0.10 m y 1.10 m para usuarios sentados y hasta 1.70 m para usuarios de pie [19]. Al mismo tiempo, se localizan dentro de la franja de influencia térmica que presenta mayor probabilidad de provocar incomodidad térmica por radiación solar (a menos de 2 m de las ventanas) [5]. La ubicación de los puntos de medición y su relación con la zona de ocupación se presentan en la Figura 5.

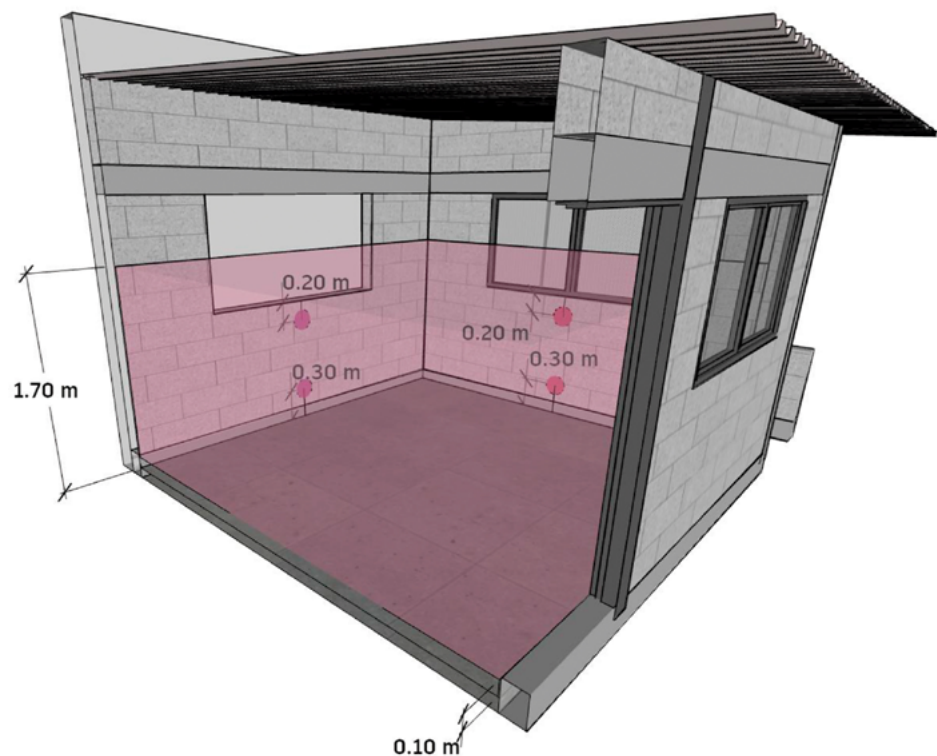


FIGURA 5.
Área de ocupación
en el recinto.
Fuente: elaboración
propia.

Los puntos de medición fueron previamente definidos y localizados sobre la superficie interior de cada muro para facilitar su identificación durante el trabajo de campo y asegurar su correspondencia con el modelo tridimensional. Asimismo, se generó una distribución de valores intermedios a partir de las

temperaturas medidas en campo, mediante una interpolación lineal entre los puntos extremos registrados en cada muro a fin de establecer un conjunto de datos comparables con los resultados del modelo numérico. Las temperaturas tomadas *in situ* se presentan en la Tabla 1.

TABLA 1.
Temperaturas superficiales promedio de los muros interiores. Fuente: elaboración propia.

MURO	ALTURA DEL PUNTO (CM)	TEMPERATURA SUPERFICIAL (°C)
Norte	30	26.43 ± 0.12
	102	23.97 ± 0.23
Oeste	30	25.67 ± 0.21
	102	23.47 ± 0.06
Sur	30	25.10 ± 0.00
	102	21.90 ± 0.17
Este	30	27.20 ± 0.10
	102	24.40 ± 0.10

Se capturó una temperatura promedio de 29.6 °C fuera del recinto, en un espacio libre de construcciones. Las direcciones y velocidades del viento sondeadas a una altura de 1.50 m sobre el nivel del terreno se muestran en la Figura 6.

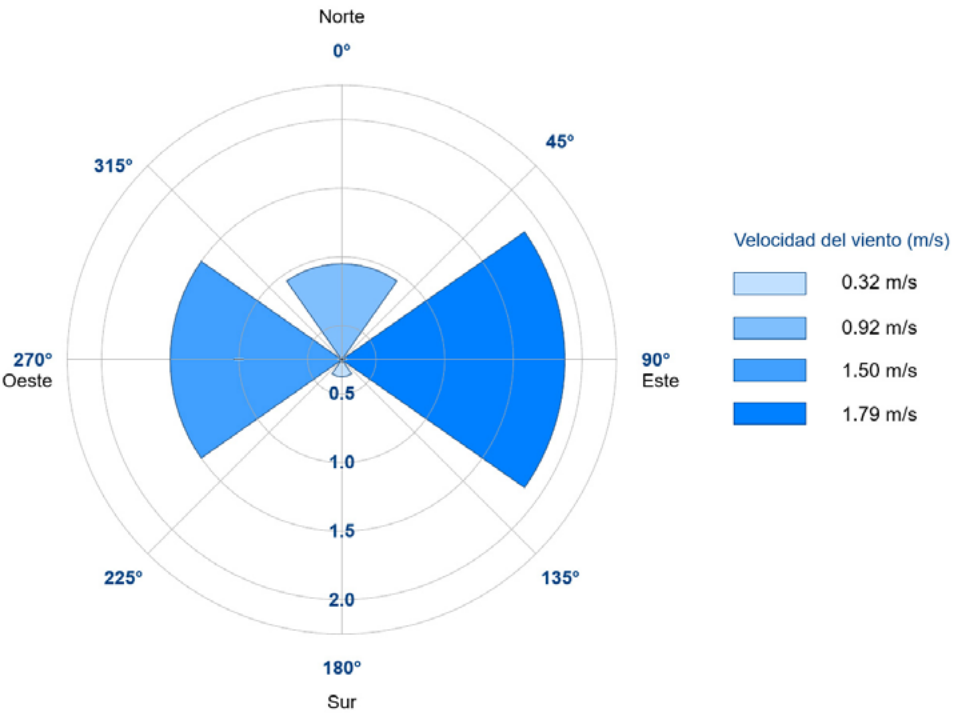
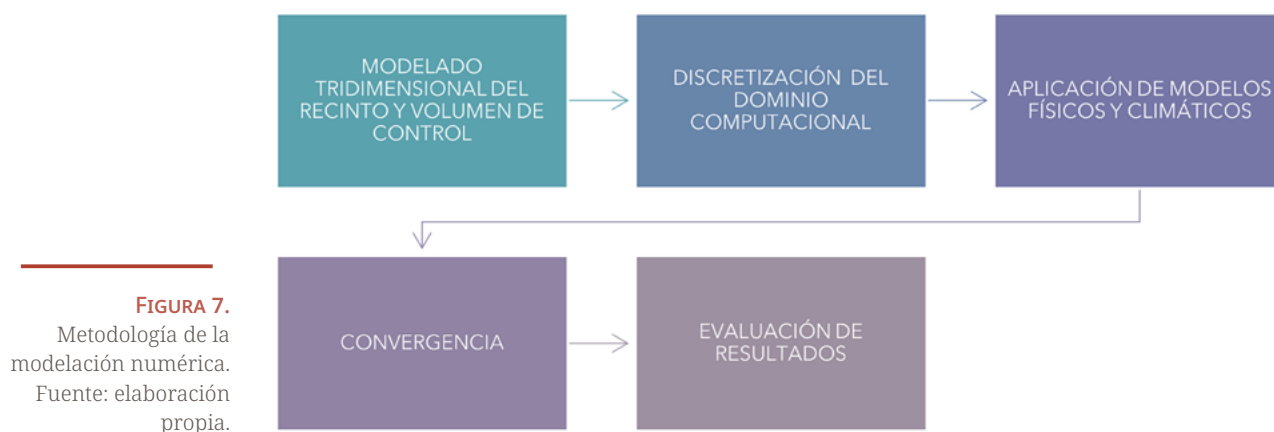


FIGURA 6.
Velocidades del viento
tomadas *in situ*.
Fuente: elaboración
propia.



Modelado 3D y generación del dominio computacional

El estudio aborda el proceso de transferencia de calor, que involucra fenómenos como conducción, convección y radiación. Por tanto, se busca simular el comportamiento térmico al interior del recinto a través del método de CFD. Para llevar a término esta simulación, se siguieron las etapas dispuestas en la Figura 7.



Se generó un modelo virtual 3D con base en las dimensiones reales del espacio construido. La edificación, en estado de obra gris, presenta condiciones ideales para considerar exclusivamente las propiedades térmicas de los materiales principales (sin la influencia de recubrimientos ni acabados superficiales), para los que se consideraron los valores térmicos reportados en la literatura [9], [20], [21] (Tabla 2). Además, la simulación asume que tanto la puerta como las ventanas permanecen completamente abiertas. Las ventanas cuentan con una malla de amplia apertura que permite el paso del viento sin obstrucciones significativas, mientras que la puerta se representó totalmente abierta para facilitar la entrada y salida del aire; en conjunto, esta configuración propicia una ventilación cruzada.

TABLA 2.

Propiedades térmicas de los materiales considerados en el modelo. Fuente: elaboración propia.

MATERIAL	DENSIDAD (kg/m ³)	CALOR ESPECÍFICO (J/(kg·K))	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA (W/(m·K))
Concreto colado	2300	880	1.40
Bloque de concreto macizo	1800	840	1.815
Lámina galvanizada	7850	475	45



Para evitar interferencias en el flujo y garantizar la precisión de los resultados, estudios previos señalan que las dimensiones del dominio deben definirse como múltiplos de la altura de la cumbrera (H) [22]. En este sentido, para el análisis de transferencia de calor por convección de edificios en entornos urbanos, se han propuesto medidas de hasta $23H \times 15H \times 6H$ [7]. Para el caso de estudio, la altura del dominio se fijó en cinco veces la altura máxima del techo ($5H$); en los laterales se definió como cinco veces el ancho del recinto ($5W$); en la parte posterior, correspondiente a la entrada (*inlet*), se fijó a tres veces la longitud del recinto ($3L$); y en la salida (*outlet*) se estableció en quince longitudes ($15L$), como se muestra en la Figura 8.

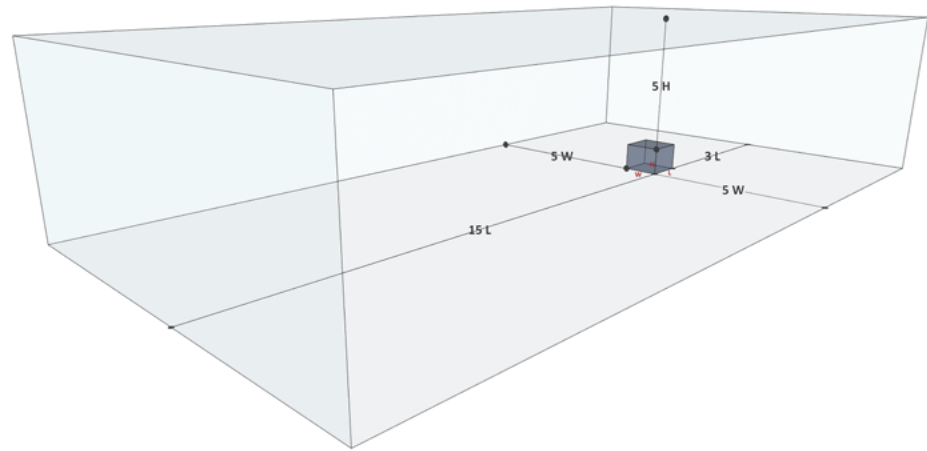


FIGURA 8.
Dimensiones del
dominio computacional.
Fuente: elaboración
propia.

A fin de representar condiciones de contorno abiertas y reducir la influencia de las fronteras artificiales sobre el flujo interno, las condiciones de frontera se definieron según las pautas de la guía ANSYS Fluent: el *inlet* se modeló como *velocity inlet*; el *outlet*, como *pressure outlet*; el resto de los límites del dominio computacional, como *symmetry* [23].

Las técnicas de generación de mallas no estructuradas, las cuales pueden constar de celdas tetraédricas, hexaédricas, poliédricas, prismáticas o piramidales, combinan bloques geométricos básicos con amplios datos geométricos para automatizar el proceso [24]. En este caso, se optó por una malla no estructurada debido a la inclinación que presenta la cubierta; sin embargo, incluso en mallas superficiales de alta calidad, es posible que aparezcan celdas asimétricas a causa de una distribución desigual del tamaño de celda o de limitaciones impuestas por las fronteras del modelo.

El modelo tridimensional del recinto fue discretizado a través de un mallado tipo *poly-hexcore*, compuesto por un total de 5 670 517 celdas y 654 316 caras. Las mallas *hexcore* pueden combinar la flexibilidad de las mallas tetraédricas,



hexaédricas y prismáticas con una cantidad reducida de celdas y una mayor relación *hex a tet* [25]. De acuerdo con los diagnósticos de calidad generados, el mallado presentó una calidad ortogonal mínima de 0.4001, valor considerado adecuado para simulaciones de flujo de aire [22]. El índice de *skewness* máximo fue de 0.3995, lo cual indica una buena calidad general del mallado, sin celdas críticas. El *aspect ratio* máximo fue de 14.48 para celdas volumétricas y de 26.34 para caras superficiales, sin presencia de celdas aisladas o intersecciones geométricas. El resultado gráfico del acomodo de celdas y refinamiento se presenta en las Figuras 9 y 10.

FIGURA 9.
Mallado en el dominio.
Fuente: elaboración propia.

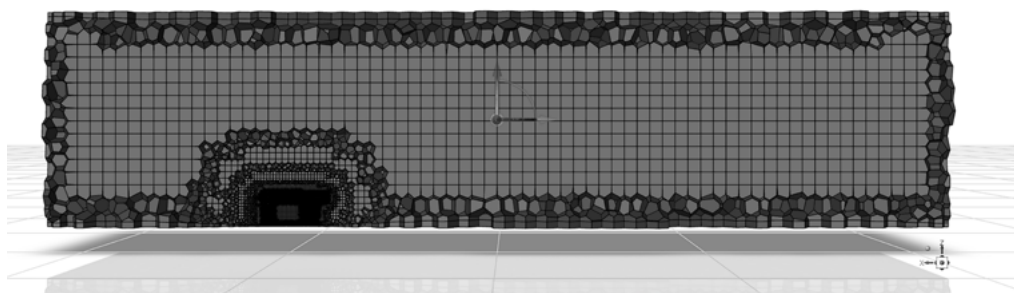
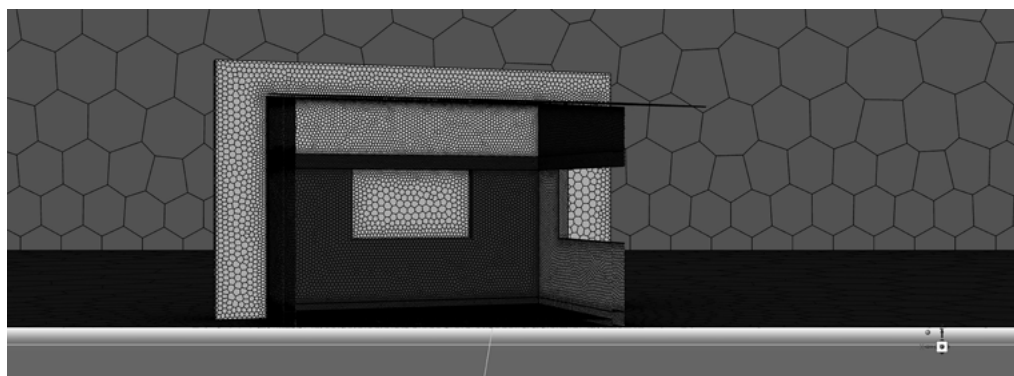


FIGURA 10.
Mallado en el recinto.
Fuente: elaboración propia.



Para modelar la turbulencia, se seleccionó el modelo SST (*shear stress transport*), reconocido por su fidelidad al predecir el flujo tanto en regiones cercanas a la pared como en zonas con separación del flujo. Este modelo combina las ventajas del modelo de turbulencia *kappa-omega* en la capa límite, mejorando la resolución para los gradientes de velocidad y temperatura, con las del modelo *kappa-epsilon* en el flujo libre, por lo que es idóneo para simulaciones de transferencia de calor y análisis aerodinámicos en geometrías completas [7]. El aire fue modelado como un gas ideal para representar el efecto de variaciones térmicas sobre la densidad y otras propiedades del fluido. A su vez, los materiales que componen el recinto (muros, cubierta y piso) fueron definidos de acuerdo con sus valores específicos reales de conductividad térmica, capacidad calorífica y densidad.



Para representar el comportamiento térmico interior bajo contextos climáticos reales, se aplicaron condiciones de frontera definidas a partir de las mediciones realizadas *in situ* de temperatura y velocidad del aire, 29.6 °C y 1.5 m/s, respectivamente, con una dirección este-oeste. Se aplicó una presión atmosférica de 80 320 Pa, calculada a partir de la altitud promedio del sitio (2300 msnm) a temperatura ambiente. Se implementó un régimen estacionario para facilitar la comparación directa con las temperaturas superficiales medidas mediante termografía infrarroja.

Las condiciones de radiación solar se definieron bajo un escenario de cielo despejado (*fair weather conditions*), considerando la orientación solar correspondiente a la fecha de simulación, el 7 de junio del 2025. Se trazó un vector solar con componentes $X = -0.3362$, $Y = -0.0375$, $Z = 0.9410$, equivalente al ángulo de incidencia que se esperaría sobre la ubicación a las 14:00 horas.

Se empleó el modelo de radiación *discrete ordinates* (DO), con una irradiancia solar directa y difusa, y una discretización angular de 3×3 divisiones (*theta/phi*), con intervalos de actualización a cada 10 iteraciones. El factor de radiación solar directa fue de 0.70, lo que se considera alto. La irradiancia solar directa normal sobre la superficie terrestre se estableció en 641.05 W/m², mientras que la irradiancia difusa alcanzó los 73.77 W/m² sobre las superficies verticales y 100.55 W/m² sobre superficies horizontales. Además, se fijó una irradiancia solar reflejada desde el suelo de 96.23 W/m² sobre las superficies verticales del recinto.

Con la finalidad de asegurar la convergencia, se realizaron 1500 iteraciones, durante las que se puso cuidado en que los parámetros *energy* y *DO-intensity* permanecieran estables en $1e^{-7}$ y $1e^{-8}$. Asimismo, que las velocidades *velocity-x*, *velocity-y* y *velocity-z* convergieran a valores del orden de $1e^{-5}$, y que *continuity* y turbulencia (κ/ω) se mantuvieran en meseta estable. Por último, además del criterio numérico basado en los residuales, se aplicó como criterio físico el balance de masa: se calculó una diferencia entre los flujos de entrada y salida de $-1.57 e^{-5}$ kg/s, es decir, un desbalance despreciable, con un error relativo del orden de $1e^{-9}$.

Resultados y discusión

Una vez que transcurrieron las mil quinientas iteraciones de la simulación, se registraron los resultados para llevar a cabo la comparación entre los valores reales y simulados. A continuación, se presentan las gráficas de los resultados



de las temperaturas superficiales por cada muro obtenidas mediante la simulación numérica.

En el muro este, la regresión lineal entre los datos medidos y los simulados mostró un coeficiente de determinación R^2 de 0.9357, lo que indica una correlación fuerte entre ambas mediciones. La pendiente de 4.19 refleja la relación entre los valores simulados y medidos, evidenciando una tendencia consistente entre ambos conjuntos de datos, como se muestra en la Figura 11. Esta relación puede estar influenciada por la orientación del muro y su mayor exposición a la radiación solar incidente durante el periodo analizado.

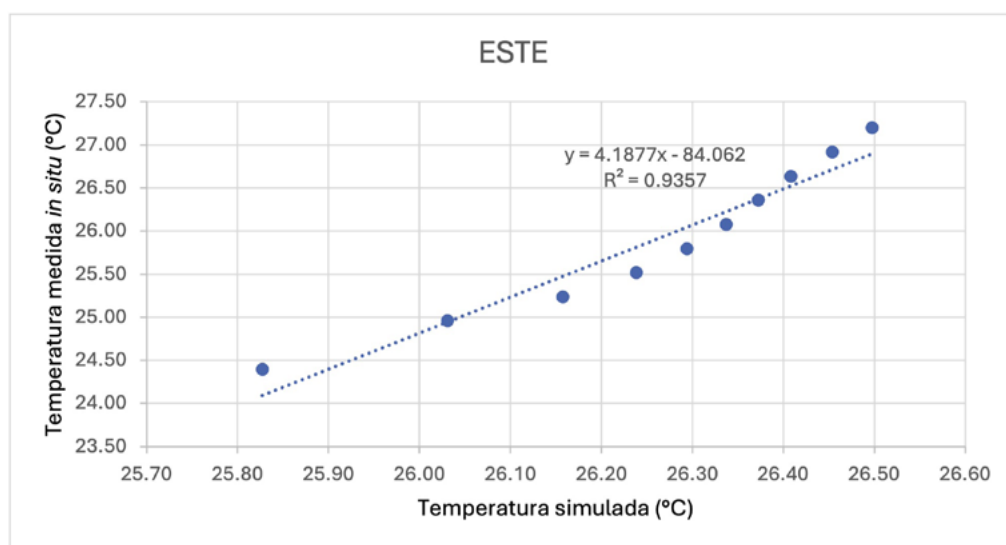


FIGURA 11.

Correlación de temperaturas interiores: medición y simulación (muro este).
Fuente: elaboración propia.

En el muro norte se observó una pendiente de 2.49 y el valor más alto de ajuste lineal entre los cuatro muros, con un R^2 de 0.9919. Esto sugiere que, si bien las variaciones térmicas son menores en esta orientación, el comportamiento simulado refleja con gran precisión las condiciones medidas, como se muestra en la Figura 12.

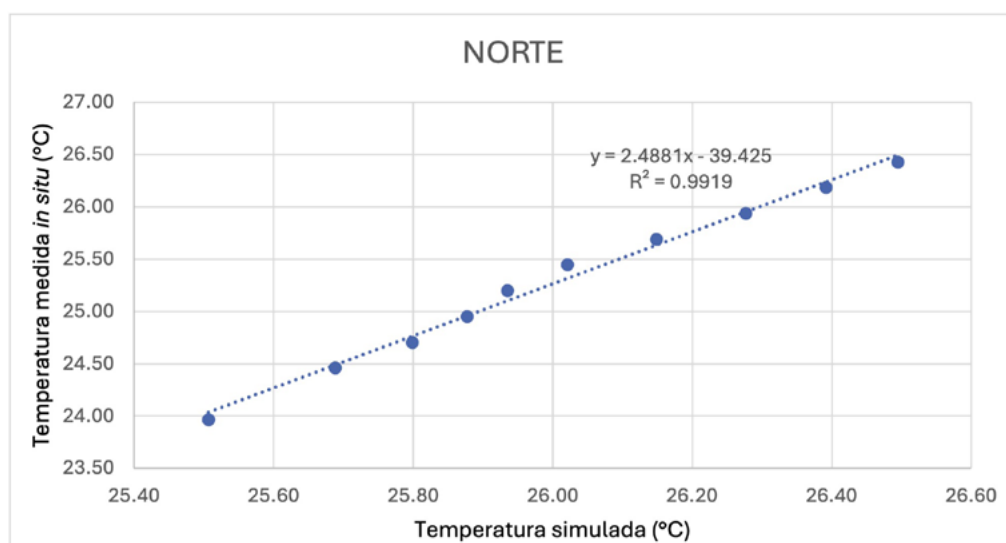


FIGURA 12.

Correlación de temperaturas interiores: medición y simulación (muro norte).
Fuente: elaboración propia.



En el muro oeste se observó una pendiente de 3.50 y un $R^2 = 0.9642$. Este muro mostró una correlación sólida, indicando una buena representación numérica del comportamiento térmico a las 14:00 h. Esta orientación se ubica en el lado opuesto al flujo de entrada, lo que refuerza el efecto acumulado de la radiación en horas de mayor carga térmica. La relación se puede observar en la Figura 13.

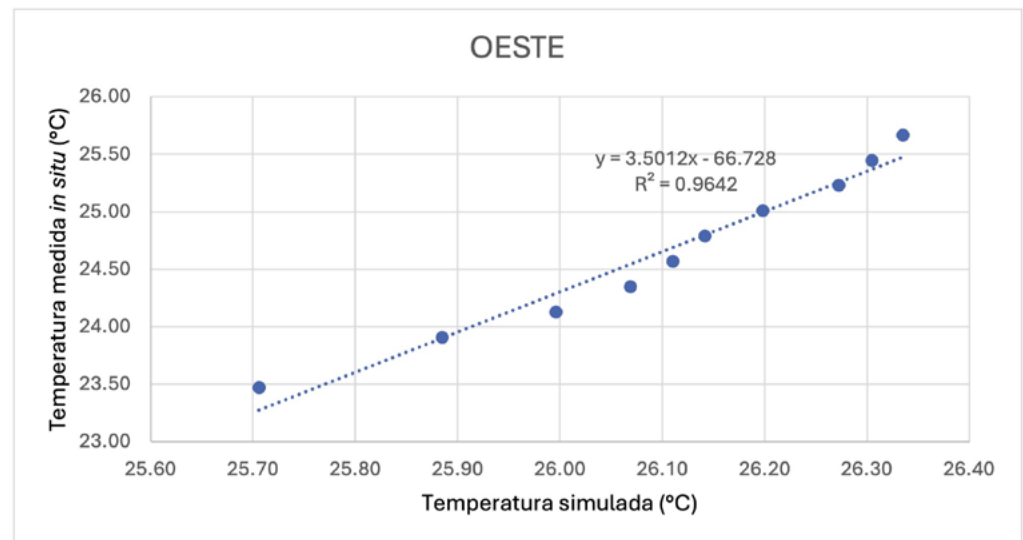


FIGURA 13.
Correlación de temperaturas interiores:
medición y simulación
(muro oeste).
Fuente: elaboración propia.

En el muro sur, la pendiente fue de 2.95, con un $R^2 = 0.9909$, lo que representa también una relación estrecha entre datos simulados y medidos. La exposición solar en esta orientación es significativa durante gran parte del día y, aunque la pendiente es ligeramente menor que en los muros este y oeste, la relación presenta una alta precisión, como se muestra en la Figura 14.

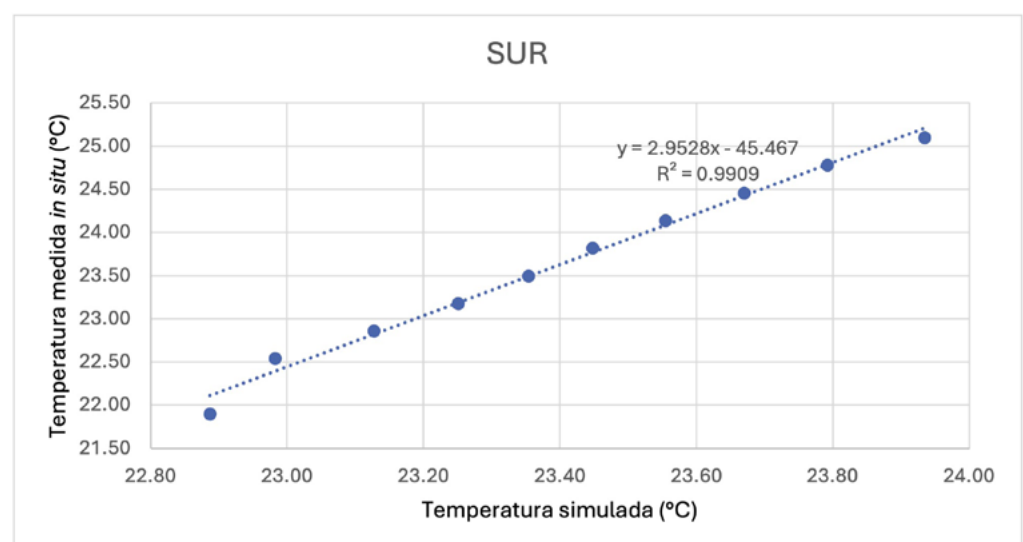


FIGURA 14.
Correlación de temperaturas interiores:
medición y simulación
(muro sur).
Fuente: elaboración propia.



Conclusión

Para analizar el comportamiento térmico de un recinto en Huimilpan, Querétaro, se compararon las temperaturas superficiales en los muros interiores del recinto medidas *in situ* contra los resultados obtenidos mediante simulación numérica. A través de esta comparación se evaluó la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento térmico observado y, con ello, respaldar su aplicación en el estudio del comportamiento térmico al interior de edificaciones bajo condiciones climáticas locales.

Los resultados muestran que las temperaturas simuladas y las medidas *in situ* presentan una alta concordancia para los cuatro muros evaluados, con coeficientes de determinación R^2 superiores a 0.93 en todos los casos. Esto indica que el modelo numérico es capaz de representar de manera adecuada el comportamiento térmico del recinto, logrando reproducir las tendencias observadas en las mediciones experimentales. A pesar de que las diferencias entre los valores simulados y experimentales son reducidas, estas pueden atribuirse a la variabilidad de las condiciones reales.

Se identificó que la orientación influye de manera directa en la respuesta térmica de los muros. Aquellos con superficies con mayor exposición a la radiación solar presentan una mayor variabilidad térmica, mientras que los muros con una menor incidencia solar muestran un comportamiento más estable. Esta relación entre la radiación incidente, la orientación y la respuesta térmica refuerzan la importancia de considerar estrategias de diseño pasivo, especialmente en elementos con alta exposición, como muros exteriores y cubiertas, y en contextos climáticos como el del estado de Querétaro.

Adicionalmente, los resultados sugieren que los modelos de simulación numérica, cuando son calibrados mediante datos experimentales, pueden emplearse como una herramienta confiable para evaluar el comportamiento térmico de edificaciones. Esto permite anticipar condiciones de confort térmico y respaldar la toma de decisiones en el diseño, particularmente en la implementación de estrategias pasivas orientadas a la reducción de ganancias térmicas.

Finalmente, aunque el modelo mostró un buen desempeño general, las diferencias observadas pueden estar asociadas a la simplificación de ciertas variables presentes en condiciones reales, como la variabilidad de la radiación solar y las condiciones de ventilación. En este sentido, futuras investigaciones podrían incorporar un mayor número de puntos de medición, así como evaluar distintos escenarios climáticos y configuraciones constructivas, con el fin de forta-



lecer la validación del modelo y ampliar su aplicación en estudios de confort térmico. Asimismo, la incorporación de modelos físicos adicionales, como el transporte de especies, permitiría considerar de manera más detallada la composición del aire, incluyendo efectos asociados a la humedad y a la presencia de distintos gases. Esto contribuiría a una representación más completa de las condiciones ambientales interiores y a un análisis más integral del confort térmico en espacios habitados.

Adicionalmente, este tipo de enfoques puede extenderse a escalas mayores, como el análisis del comportamiento térmico en entornos urbanos, donde otras variables, además de la orientación de las edificaciones, la densidad urbana y la configuración del espacio construido, podrían influir en las condiciones microclimáticas. En este sentido, la integración de modelos numéricos validados con datos experimentales representa una herramienta valiosa para apoyar la planeación urbana y el diseño de ciudades más eficientes.

Agradecimientos

Agradecemos a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (Secihti) por el apoyo otorgado para el desarrollo de esta investigación, así como a los revisores, cuyas observaciones y sugerencias contribuyeron significativamente. También expresamos nuestro reconocimiento a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, cuyo programa de becas hizo posible la realización de este trabajo.

Referencias

- [1] Comisión Nacional del Agua (Conagua), "Resumen mensual de temperaturas máximas: Abril 2025, Ciudad de México". Servicio Meteorológico Nacional. <https://smn.conagua.gob.mx/es/climatologia/temperaturas-y-lluvias/resumenes-mensuales-de-temperaturas-y-lluvias>
- [2] P. R. Mondelo, E. Gregori Torada, S. Comas Úriz, E. Castejón Vilella y E. Bartolomé Lacambra, *Ergonomía 2. Confort y estrés térmico*. México: Alfaomega, 2001.
- [3] Servicio Meteorológico Nacional, "Temperatura Máxima Promedio por Entidad Federativa y Nacional 2025", Servicio Meteorológico Nacional. <https://www.gob.mx/smn/es/articulos/temperaturas-maximas-del-pais>
- [4] V. Masson-Delmotte, *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, V. Masson-Delmotte et al., Eds. Reino Unido y Estados Unidos: Cambridge University Press, 2023, DOI: [10.1017/9781009157896](https://doi.org/10.1017/9781009157896)
- [5] X. Xiang, Y. He, y N. Li, "Evaluating annual thermal discomfort time ratio of indoor occupants caused by solar radiation using a novel model", *Architectural Intelligence*, vol. 3, 2024, DOI: [10.1007/s44223-024-00072-1](https://doi.org/10.1007/s44223-024-00072-1)
- [6] G. Betti, F. Tartarini, C. Nguyen y S. Schiavon, "CBE Clima Tool: A free and open-source web application for climate analysis tailored to sustainable building design", *Building Simulation*, vol. 17, pp. 493-508, 2023, DOI: [10.1007/s12273-023-1090-5](https://doi.org/10.1007/s12273-023-1090-5)
- [7] A. De Lieto Vollaro, G. Galli, y A. Vallati, "CFD Analysis of Convective Heat Transfer Coefficient on External Surfaces of Buildings", *Sustainability*, vol. 7, núm. 7, pp. 9088-9099, 2015, DOI: [10.3390/su7079088](https://doi.org/10.3390/su7079088)



- [8] M. Hajdukiewicz, M. Geron y M. M. Keane, "Formal calibration methodology for CFD models of naturally ventilated indoor environments", *Building and Environment*, vol. 59, pp. 290-302, 2013, DOI: [10.1016/j.buildenv.2012.08.027](https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.08.027)
- [9] J. A. Fernández Benítez y C. Corrochano Sánchez, *Fundamentos de Transmisión de Calor*, 2a ed. España: DEXTRA Editorial, 2014.
- [10] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*, 4a ed. México: Prentice Hall, 1999.
- [11] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2a ed. Inglaterra: Pearson Education Limited, 2007.
- [12] T. Norton, D.-W. Sun, J. Grant, R. Fallon, y V. Dodd, "Applications of computational fluid dynamics (CFD) in the modelling and design of ventilation systems in the agricultural industry: A review", *Bioresource Technology*, vol. 98, núm. 12, 2007, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.025>
- [13] C. H. Galeano Urueña, J. M. Mantilla González, y J. C. Galvis Arrieta, *El método de los elementos finitos: un enfoque teórico práctico*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2016.
- [14] R. A. Estrada Cingualbres, *Análisis por elementos finitos (FEA): cosmosWorks 2006*. Cuba: Editorial Universitaria, 2014.
- [15] C. Hernández Pezzi, *Un Vitruvio ecológico: principios y práctica del proyecto arquitectónico sostenible*. España: Gustavo Gili, 2012.
- [16] L. A. Mondragón del Ángel, "Acceso solar en México: Caso de estudio Querétaro", *SketchIn. Revista de Arquitectura y Diseño*, vol. 4, núm. 7, pp. 58-69, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://revistas.uaq.mx/index.php/sketchin/article/view/58-69>
- [17] Testo SE & Co. KGaA, "testo 445 - Medidor para climatización". Testo. <https://www.testo.com/es-MX/testo-445/p/0560-4450>
- [18] Final Test, "FLIR-15, Cámara Termográfica. 9Hz, Rango de Medición de Temperatura de -20 °C a 250 °C (-4 °F a 482 °F), Resolución de 100 × 100 Píxeles, Enfoque Libre". Final Test. <https://www.finaltest.com.mx/FLIR-15-C-mara-Termo-p/flir-15.htm>
- [19] *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*, ANSI/ASHRAE Standard 55, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Estados Unidos, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- [20] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, *ASHRAE Handbook - Fundamentals*. Estados Unidos: ASHRAE, 2021.
- [21] Integrated Environmental Solutions (IES), "Table 6 Thermal Conductivity, Specific Heat Capacity and Density". IES Virtual Environment Help. https://help.iesve.com/ve2021/table_6_thermal_conductivity_specific_heat_capacity_and_density.htm
- [22] R. W. Kim, I. B. Lee, y K. S. Kwon, "Evaluation of wind pressure acting on multi-span greenhouses using CFD technique, Part 1: Development of the CFD model", *Biosystems Engineering*, vol. 164, pp. 235-256, 2017, DOI: [10.1016/j.biosystemseng.2017.09.008](https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2017.09.008)
- [23] ANSYS, Inc., "Boundary Conditions". ANSYS Fluent User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_ug/flu_ug_bcs_sec_bound_cond.html
- [24] ANSYS, Inc., "1.2. Program Capabilities". ANSYS Fluent User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v242/en/flu_ug/flu_ug_gs_sec_gs_capabilities.html
- [25] ANSYS, Inc., "6.1. Improving the Mesh". ANSYS Fluent User's Guide. https://ansyshelp.ansys.com/public/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v252/en/flu_ug/tgd_user_improve_mesh.html



PERSPECTIVAS DE LA
CIENCIA Y LA TECNOLOGÍA

¿Quieres publicar en esta revista?

¿Dudas o sugerencias? Escríbenos a:

? perspectivasci@uaq.mx

.....
REVISTA INCLUIDA EN:
.....

VISITA NUESTRO

FISIÓN
PODCAST

Escucha de la voz de
los autores, entrevistas
y comentarios
relacionados a sus
artículos.

Disponible en:

MÁS REVISTAS UAQ EN:



revistas.uaq.mx



ingenieria.uaq.mx

EDICIÓN CUIDADA, DISEÑADA
Y MAQUETADA POR

D | DESPACHO DE
PUBLICACIONES

Visítanos y conoce
las publicaciones que la
FACULTAD DE INGENIERÍA
DE LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE QUERÉTARO
tiene para ti:



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA