

VIABILIDAD DEL MODELO DE CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO BAJO CONDICIONES DE CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO: AHORRO ENERGÉTICO EN REFRIGERACIÓN EN CAMPECHE, MÉXICO

FEASIBILITY OF THE ADAPTIVE THERMAL COMFORT MODEL UNDER WARM SUB-HUMID CLIMATE CONDITIONS: COOLING ENERGY SAVINGS IN CAMPECHE, MEXICO

VIABILIDADE DO MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO EM CONDIÇÕES DE CLIMA QUENTE SUBÚMIDO: ECONOMIA DE ENERGIA NA REFRIGERAÇÃO EM CAMPECHE, MÉXICO

Oscar May-Tzuc

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>

oscajmay@uacam.mx

Mario Antonio Jiménez-Torres

Departamento de Ingeniería y proyectos, Universidad Internacional Iberoamericana, San Francisco de Campeche, México

<https://orcid.org/0000-0002-8331-1888>

mario.jimenez@unini.edu.mx

Andrea del Rosario Cruz y Cruz

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México

<https://orcid.org/0000-0001-8861-1276>

andrcruz@uacam.mx

Román Canul-Turriza

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México

<https://orcid.org/0000-0003-2081-9913>

roacanul@uacam.mx

Juan Edgar Andrade-Durán

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México

<https://orcid.org/0000-0002-7370-1209>

jeandrad@uacam.mx

Felipe Noh-Pat

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México

<https://orcid.org/0000-0003-1981-8323>

felipnoh@uacam.mx



RESUMEN

El enfoque convencional para alcanzar el confort térmico generalmente se centra en modificar la temperatura de consigna en edificios totalmente climatizados. Sin embargo, el enfoque del confort térmico adaptativo es una alternativa que considera la interacción entre los edificios, el clima local y los usuarios para permitir mejoras significativas en el ahorro de energía. El trabajo analiza la viabilidad de implementar estrategias de confort térmico adaptativo, comparando modelos adaptativos basados en la norma ASHRAE 55-2020 y un modelo regional para la tipología climática tropical de México, contrastando los resultados respecto del enfoque estático. Se analizó térmicamente 13 locaciones del Estado de Campeche obteniendo que las estrategias de ventilación son aplicables en todo el Estado y que ambos modelos aseguran mejoras en el consumo de energía. Además, los resultados sugieren que es necesario desarrollar más modelos adaptativos locales para proponer estrategias con mejor potencial de impacto en la región.

Palabras clave

confort térmico adaptativo, clima cálido subhúmedo, ahorro energético

ABSTRACT

The conventional approach to achieve thermal comfort generally focuses on modifying the setpoint temperature in fully air-conditioned buildings. However, the adaptive thermal comfort approach is an alternative that considers the interaction between buildings, the local climate, and the users to allow significant improvements in energy savings. This paper analyzes the feasibility of implementing adaptive thermal comfort strategies, comparing adaptive models based on the ASHRAE 55-2020 Standard and a regional model for the tropical climate typology of Mexico, and contrasting the results with the static approach. Thirteen locations in the State of Campeche were thermally analyzed, seeing that the ventilation strategies are applicable throughout the State and that both models ensure improvements in energy consumption. In addition, the results suggest that it is necessary to develop more local adaptive models to propose strategies with better potential impact in the region.

Keywords

adaptive thermal comfort, hot sub-humid climate, energy savings.

RESUMO

A abordagem convencional para alcançar o conforto térmico geralmente se concentra em modificar a temperatura de referência em edifícios totalmente climatizados. No entanto, a abordagem do conforto térmico adaptativo é uma alternativa que considera a interação entre os edifícios, o clima local e os usuários, a fim de permitir melhorias significativas na economia de energia. Este trabalho analisa a viabilidade de implementar estratégias de conforto térmico adaptativo, comparando modelos adaptativos baseados na norma ASHRAE 55-2020 e um modelo regional para a tipologia climática tropical do México, contrastando os resultados com a abordagem estática. Foram analisados termicamente 13 locais no estado de Campeche, concluindo-se que as estratégias de ventilação são aplicáveis em todo o estado e que ambos os modelos garantem melhorias no consumo de energia. Além disso, os resultados sugerem a necessidade de desenvolver mais modelos adaptativos locais para propor estratégias com maior potencial de impacto na região.

Palavras-chave

conforto térmico adaptativo, clima quente subúmido, economia de energia.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el sector de edificaciones es el segundo mayor consumidor de energía del mundo, abarcando cerca del 40% del consumo energético y generando poco más del 30% de las emisiones globales (Pérez-Fargallo et al., 2020). Una de las principales razones de esto son los altos índices de disconfort térmico al interior de recintos, cuya consecuencia es que 50% de la energía en edificios sea destinado para solventar procesos de climatización de espacios (Jimenez-Torres et al., 2023). Estos patrones se acrecientan en ciudades con climas cálidos o tropicales, las cuales, en la última década, han tenido un aumento constante en su población, propiciando, en consecuencia, una mayor demanda en el uso de aire acondicionado.

Bajo este escenario, la temperatura de consigna en los equipos de aire acondicionado juega un papel importante en el confort térmico y en los altos consumos energéticos. Por un lado, esta temperatura generalmente es colocada a un valor fijo (en ocasiones restringida), lo que produce que no haya una adecuada satisfacción térmica para todos los ocupantes de los recintos. Además, cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura de consigna y la temperatura ambiente, el consumo de energía eléctrica se incrementa. A partir de esta situación, diversos estudios han mostrado que al aumentar la temperatura de consigna o temperatura objetivo es posible reducir el consumo energético hasta un 30%. Incluso en regiones de clima tropical al establecer una temperatura superior a 25.5°C, se han observado reducciones significativas en el uso de la energía (Hoyt et al., 2015). Sin embargo, es importante enfatizar que dichos estudios han sido desarrolladas bajo lo que actualmente se conoce como el enfoque tradicional, basado en el índice de Voto Medio Estimado (PMV, por sus siglas en inglés) y que es también conocido como modelo de balance térmico o modelo estático (Sala et al., 1999), el cual tiene entre sus principales inconvenientes el limitar la interacción de los usuarios con el ambiente.

En la última década ha tomado gran importancia un nuevo enfoque en la búsqueda del confort para los ocupantes denominado confort térmico adaptativo (CTA). Su principal idea es replicar el comportamiento natural del humano, el cual es capaz de adaptarse fisiológica y psicológicamente hasta determinado punto al aumento de temperatura. El modelo adaptativo se basa en diversas investigaciones respecto de las relaciones entre la temperatura aceptable del aire al interior del recinto y la temperatura del aire exterior, estableciendo que la temperatura de confort depende de las condiciones ambientales (Tsolkas et al., 2023). Se han realizado diversos estudios bajo este enfoque con el propósito de analizar el potencial ahorro energético, inclusive considerando escenarios de cambio climático. Salcido et al. (2016) exhibieron un potencial de ahorro entre el 50 – 60% al utilizar el estrategias adaptativas. Otros

investigadores (Sánchez-García et al., 2019; Sánchez-García et al., 2023) han establecido en diversos estudios que, al implementar la estrategia de confort adaptativo, se tienen ahorros en energía superiores al 30% inclusive bajo escenarios de cambio climático.

No obstante, el enfoque adaptativo también ha sido objeto de debate en los últimos años ya que, si bien presenta avances importantes al incorporar variables de adaptación, la formulación del modelo posee sesgos. Entre ellos está la inexactitud para ser implementada en diversas construcciones al ser diseñado con base en datos de edificios de oficina (Yau & Chew, 2012). Además, los modelos de CTA con mayor promoción global carecen de análisis en regiones de climas tropicales, dejando dudas de su viabilidad en locaciones de Latinoamérica (Rodríguez & D'Alessandro, 2019). Esto ha dado pauta al cuestionamiento de si estos modelos pueden llegar a promover un uso más intensivo de la energía en lugar de aminorarlo, siendo una de las alternativas más recomendadas el desarrollo de modelos adaptativos locales que se ajusten a las necesidades de la población donde se desea impactar.

Por lo tanto, el presente trabajo aborda la posibilidad de reducir la demanda en uso de equipos de aire acondicionado para comunidades con clima cálido-húmedo, situadas en el sur de México, a partir del enfoque de confort adaptativo. El caso de México es interesante debido a que el sector residencial es de los principales consumidores de energía, destinando más del 20% en procesos de climatización (SENER, 2021). Además, las locaciones donde predomina el clima cálido-húmedo representan el 30% de las viviendas del país y los registros indican que en ella se duplica los requerimientos energéticos, por lo que el análisis y búsqueda de técnicas de eficiencia energética es imperativo.

El trabajo toma como caso de estudio el Estado de Campeche, México. Se analiza la implementación del modelo de CTA promovido por la normativa ASHRAE 55-2020 (ASHRAE, 2020) y un modelo regional ajustado para el clima tropical de México (Oropeza-Perez et al., 2017).

CARACTERÍSTICAS DE LA REGION DE CAMPECHE

El Estado de Campeche, México, corresponde a uno de los tres Estados del país ubicados en la región peninsular sureste. Colinda al norte con el Golfo de México, al este con Quintana Roo, Yucatán y Belice; al oeste con Tabasco y al Sur con Guatemala. Su extensión territorial es de 57,484.9 km² con una población de poco menos de 1 millón de habitantes distribuida entre 13 municipios (Figura 1). El 99.95% del territorio presenta un clima cálido húmedo con lluvias en verano. En la cuestión energética, está catalogado entre los Estados con tarifa eléctrica correspondiente a temperaturas entre 30°C y 31°C durante el verano. No obstante, los últimos registros de estaciones meteorológicas indican que

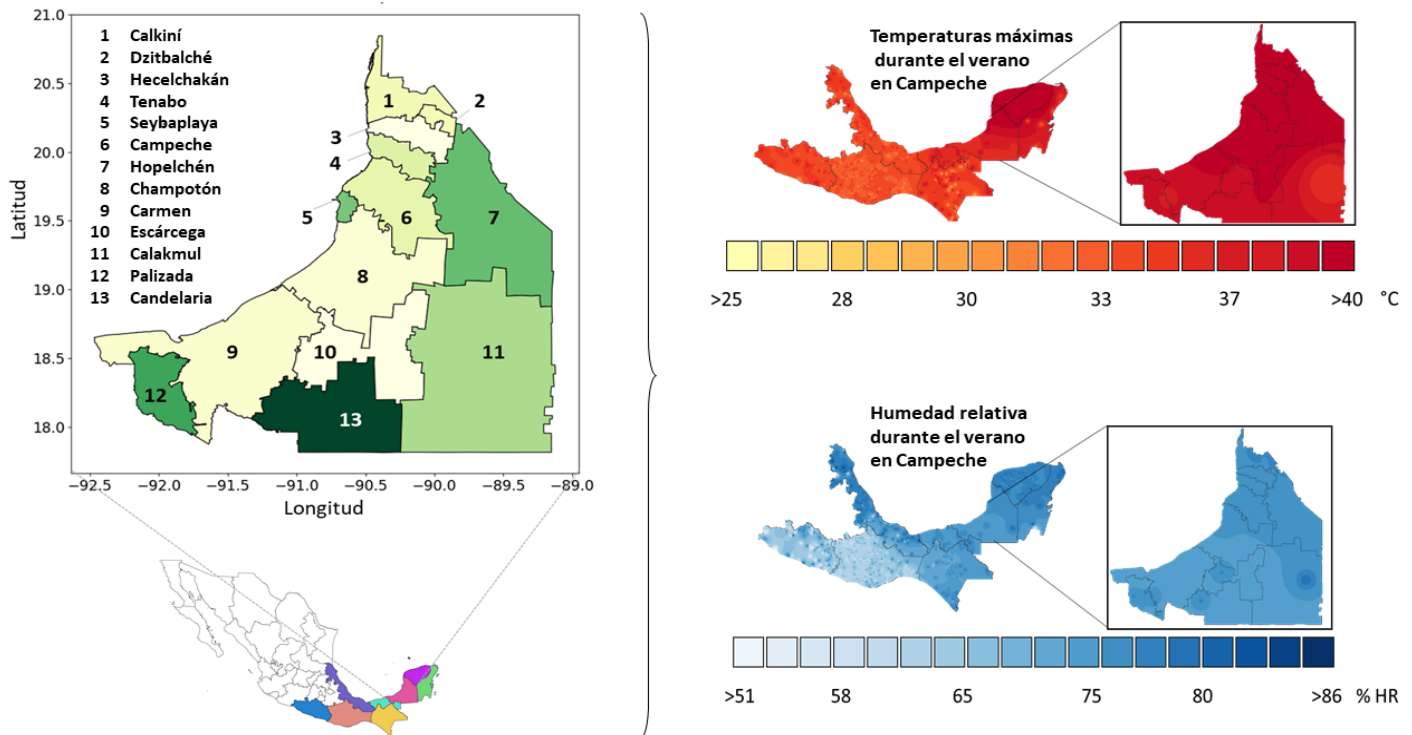


Figura 1. Distribución geográfica y características climáticas del Estado de Campeche, México. Fuente: Elaboración de los autores

las temperaturas al interior del Estado supera los 37°C (INEGI, 2022), propiciando un alto consumo eléctrico para la satisfacer la necesidad del confort térmico en las viviendas. Lo anterior es un indicativo de que esta región puede ser potencialmente beneficiada tanto en ahorro de energía como en confort térmico al aplicar un enfoque adaptativo.

METODOLOGÍA

El estudio se dividió en tres etapas: (i) obtención de la información climática y geoestadística del Estado de Campeche; (ii) aplicación de los modelos de CTA en los municipios del Estado para obtener sus temperaturas de confort; (iii) el cómputo del potencial de horas de enfriamiento y calefacción para cada municipio, así como la viabilidad del enfoque de CTA respecto del modelo estático.

DATOS CLIMATICOS Y GEOSTADISTICOS

La información meteorológica fue obtenida a través del software Meteonorm V7, desde cual se descargaron los 13 ficheros climáticos del Estado de Campeche correspondientes al año 2022, en intervalos de una hora. En relación con los datos geoestadísticos de población y extensión territorial, así como los ficheros de mapas

de la entidad, estos correspondieron al último censo poblacional realizado en 2020, cuya información es de acceso libre en el portal del Sistema Nacional de Estadística y Geografía¹.

ENFOQUE DEL CONFORT TERMICO ADAPTATIVO

El CTA se basa en la idea de que la temperatura al interior de un edificio (T_c) puede ser estimada a partir de la temperatura ambiente del exterior (T_{out}).

Tanto en las actualizaciones oficiales de diversas normativas internacionales como en adaptaciones regionales del enfoque, esta relación se expresa mediante una regresión lineal utilizando datos recopilados en estudios de campo (Carlucci et al., 2018):

$$T_c = mT_{out} + b \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde la pendiente m es un valor proporcional al grado de adaptación de las condiciones climáticas de la región y la abscisa b corresponde al valor teórico de confort (basado en mediciones) a una temperatura exterior de 0°C (Ecuación 1).

El trabajo pretende analizar dos modelos de CTA para Campeche. El primero corresponde al modelo promovido por la normativa ASHRAE 55-2020 (ASHRAE, 2020), el que, si bien no corresponde a una normativa internacional, representa la de mayor adopción alrededor del mundo. Este modelo de CTA fue generado a partir de datos medidos en 160 edificios localizados en países de cuatro continentes, cuestión que ha promovido su uso como un estándar en gran parte del mundo. La normativa indica que un umbral de temperatura de confort a un 80% de confiabilidad se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones lineales (Ecuación 2 y Ecuación 3) (Carlucci et al., 2018):

$$\text{Límite superior (aceptabilidad 80\%)} = 0.31 T_{pma(out)} + 21.3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10 \leq T_{pma(out)} \leq 33.5) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\text{Límite inferior (aceptabilidad 80\%)} = 0.31 T_{pma(out)} + 14.3 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10 \leq T_{pma(out)} \leq 33.5) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde $T_{pma(out)}$ representa la temperatura media exterior predominante. Cuando el $T_{pma(out)}$ se encuentra por encima o por debajo de dicho umbral, es necesaria la implementación de estrategias de enfriamiento o calefacción al interior del edificio para alcanzar el confort de los ocupantes.

El segundo modelo de CTA evaluado es el desarrollado por Oropeza-Perez et al. (2017). Este se distingue por ser el primer modelo regional de CTA diseñado para México, el cual divide al país en cuatro tipos de climas (árido, templado, cálido seco y cálido húmedo). El modelo se desarrolló a partir de 74 encuestas distribuidas de forma proporcional en las cuatro zonas climáticas. Todo el territorio del Estado de Campeche se clasifica en clima cálido húmedo. De acuerdo con esto, el CTA está dado por la ecuación 4:

$$T_c = 0.38 T_{pma(out)} + 15.7 \text{ }^\circ\text{C} \quad (\text{Ecuación 4})$$

A fin de homogeneizar la descripción de este modelo con lo expresado por la normativa ASHRAE 55-2020, se definieron los límites superior (Ecuación 5) e inferior (Ecuación 6) añadiendo $\pm 3.5^\circ\text{C}$:

$$\text{Límite superior (aceptabilidad 80\%)} = 0.38 T_{pma(out)} + 18.2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10 \leq T_{pma(out)} \leq 33.5) \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\text{Límite inferior (aceptabilidad 80\%)} = 0.38 T_{pma(out)} + 13.2 \text{ }^\circ\text{C} \quad (10 \leq T_{pma(out)} \leq 33.5) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Para ambos enfoques resalta el concepto del $T_{pma(out)}$. Su importancia radica en que el CTA se basa en la premisa de que la temperatura al interior de las edificaciones no depende exclusivamente del día en curso, sino que está influenciada por la temperatura ambiente de los días previos; donde el $T_{pma(out)}$ representa dichos efectos. En versiones anteriores de la normativa ASHRAE 55-2017, se consideraba al $T_{pma(out)}$ como valor obtenido a través de los promedios mensuales. A partir de las últimas dos modificaciones, esta se vincula a los días previos al día de interés, cuya ecuación está dada por la ecuación 7:

$$T_{pma(out)} = (1-\alpha)[T_{e(d-1)} + \alpha T_{e(d-2)} + \alpha^2 T_{e(d-3)} + \alpha^3 T_{e(d-4)} + \dots] \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde α es un valor ponderado que varía entre 0 y 1, mientras que $T_{e(d-1)}$ representa el número de días pasados a considerar que puedan impactar en la temperatura interna del edificio. Para el presente trabajo se emplearon siete días previos, así como un α de 0.8 que corresponde a aquellas regiones con clima tropical como es el caso del Estado de Campeche de acuerdo con la normativa ASHRAE 55-2020.

POTENCIAL DE HORAS DE ENFRIAMIENTO Y CALEFACCION

Para identificar el potencial de enfriamiento y calefacción durante la implementación del CTA, se emplearon los métodos de Horas Grado de Enfriamiento (CDH, *cooling degree hours*) (Ecuación 8) y Horas Grado de Calefacción (HDH, *heating degree hours*) (Ecuación 9). Ambos miden la influencia de los cambios de temperatura sobre el desempeño energético del edificio. El CDH está definido como la suma acumulativa de restar al promedio de la temperatura ambiente de cada hora (T_a) una temperatura de consigna (T_r). Donde h indica el número total de horas analizadas y el apostrofe (+) indica que solo son efectivos los resultados positivos durante la sumatoria. De manera homóloga, el HDH indica la suma acumulativa de restar a la temperatura de consigna (T_r), el promedio de la temperatura ambiente de cada hora (T_a) (Jimenez-Torres et al., 2023):

$$CDH = \begin{cases} \sum_h^{8760} (T_a - T_{r,EC})^+ & \text{enfoque estático} \\ \sum_h^{8760} (T_a - T_{r,DC})^+ & \text{enfoque dinámico} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$HDH = \begin{cases} \sum_h^{8760} (T_{r,EH} + T_a)^+ & \text{enfoque estático} \\ \sum_h^{8760} (T_{r,DH} + T_a)^+ & \text{enfoque dinámico} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 9})$$

De forma convencional, la temperatura de consigna es asignado a un valor estático. Para el CDH, está dado por la temperatura estática de enfriamiento ($=25^\circ\text{C}$), y para el

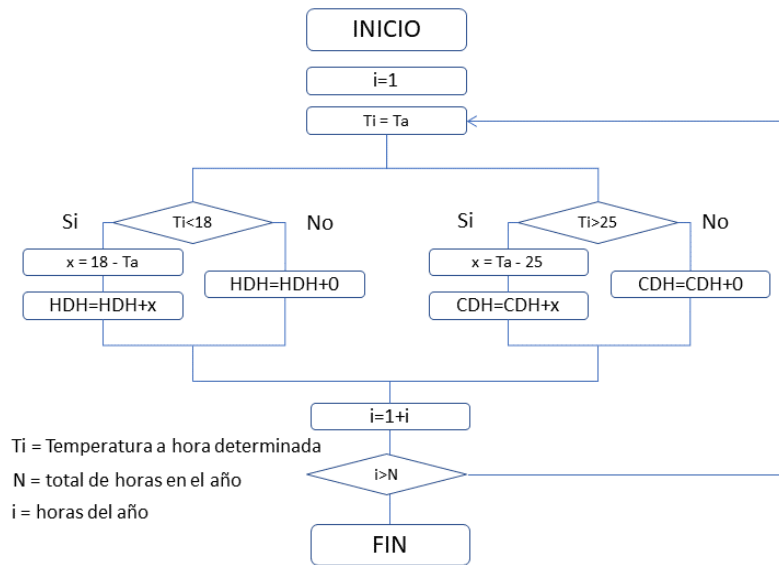


Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención del CDH y HDH estáticos. Fuente: Elaboración de los autores

HDH está dado por la temperatura estática de calefacción (=18°C). Ambos valores se encuentran dentro del rango históricamente descrito en diversas normativas, como el caso de la ANSI/ASHRAE 169-2020 (ANSI/ASHRAE, 2021). La Figura 2 ilustra el algoritmo utilizado para el computo del CDH y HDH estáticos.

Para el enfoque adaptativo, la temperatura de consigna se considera dinámica y está dada por el valor de la temperatura de confort en el límite superior de aceptabilidad al 80% (y límite inferior de aceptabilidad al 80% para el CDH y HDH, respectivamente). En el presente trabajo se pretende comparar tanto el modelo adaptativo de la normativa ASHRAE 55-2020 y el modelo regional desarrollado por Oropeza-Perez et al. (2017) respecto del modelo estático para determinar la viabilidad del enfoque adaptativo.

INDICADORES DE VIABILIDAD DEL ENFOQUE ADAPTATIVO

La viabilidad del CTA para la región es medida mediante el cotejo de las horas anuales (h_i) en el que cada uno de los municipios se encuentra dentro del umbral de confort a una aceptabilidad del 80%. Esto es conocido como el porcentaje anual de potencial aplicación de ventilación natural (PNV) y está dado por Bienvenido-Huertas et al. (2021):

$$PNV = \frac{100 \sum_h^{8760} h_i}{8760} \quad (\text{Ecuación 10})$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS DE HORAS GRADO DE ENFRIAMIENTO

La Figura 3 ilustra la representación espacial a lo largo del territorio de Campeche sobre la demanda de horas de refrigeración anuales considerando el enfoque estático (Figura 3a), enfoque dinámico desarrollado por Oropeza-Perez et al. (2017) (Figura 3b) y el dinámico basado en la normativa ASHRAE 55-2020 (Figura 3c). Para los tres casos queda claro que los municipios localizados al norte del estado son los que requieren una mayor demanda de refrigeración, a pesar de que toda la entidad posee el mismo tipo de clima. Esto puede ser explicado debido a que en los municipios al norte del Estado se presentan los niveles de precipitación más bajos a lo largo del año, los mismos que rondan entre los 700 y 800 mm, mientras que en los municipios del sur se alcanzan precipitaciones de 1500 hasta 2000 mm (INEGI, 2022). Además, aunque los datos del INEGI reportan que más del 77% del estado está cubierto por selva y pastizal, el tipo de suelo es variante en la región. Las zonas donde se reportan mayores niveles de CDH se ubican en suelo cárstico con abundancia de superficie rocosa. A medida que se dirige al sur, la fisiografía dominante corresponde a lomeríos, lo que coincide con la reducción de la demanda para refrigeración. Finalmente, las latitudes más bajas, con menor demanda de CDH, corresponden a la zona pantanosa del Estado.

De la Figura 3 se infiere que el enfoque estático es el que demuestra mayor demanda de CDH en el año, de forma homogénea, en la mayor parte del territorio. A excepción del municipio de Candelaria, todo el Estado se encuentra con un CDH casi constantes que va de los

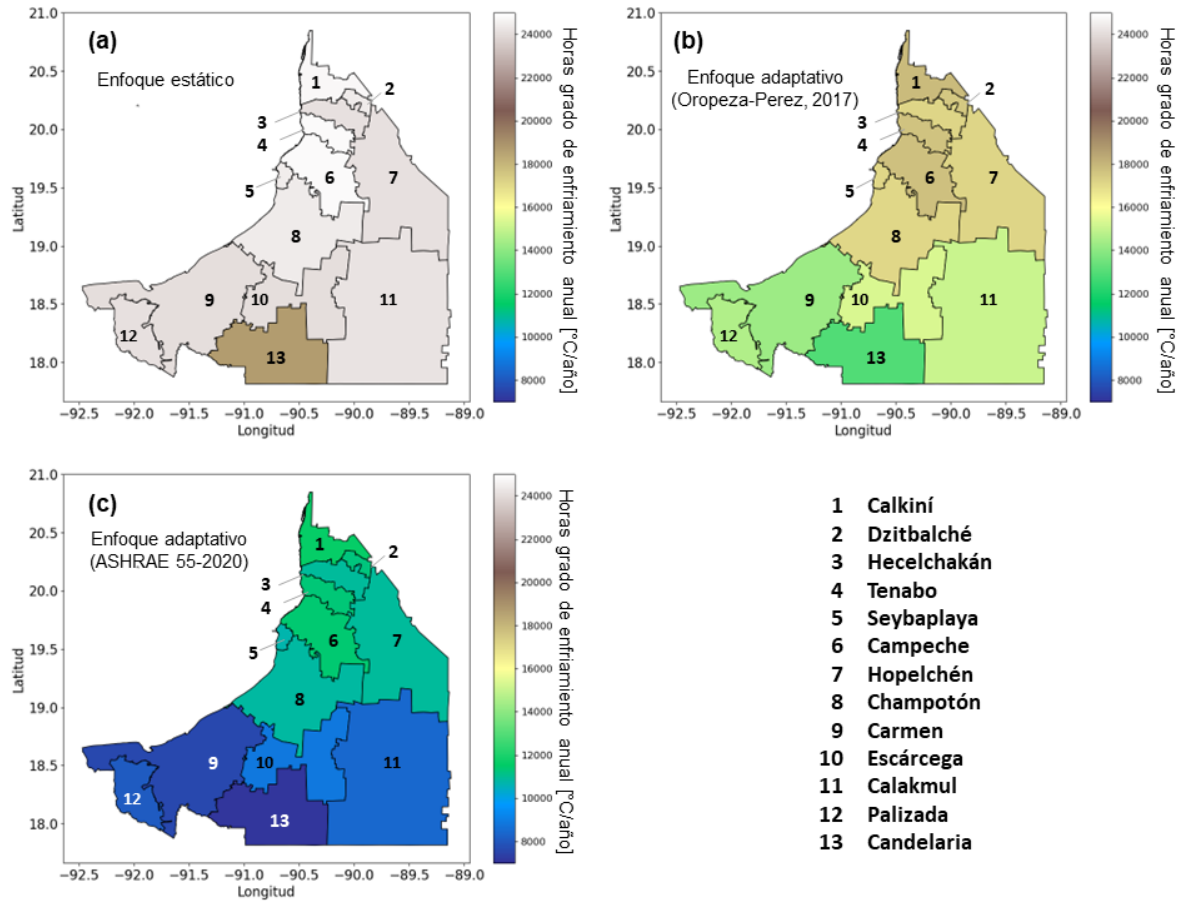


Figura 3. Horas grado de enfriamiento para los municipios de Campeche: (a) modelo estático; (b) modelo adaptativo regional; (c) modelo adaptativo ASHRAE 55-2020. Fuente: Elaboración de los autores.

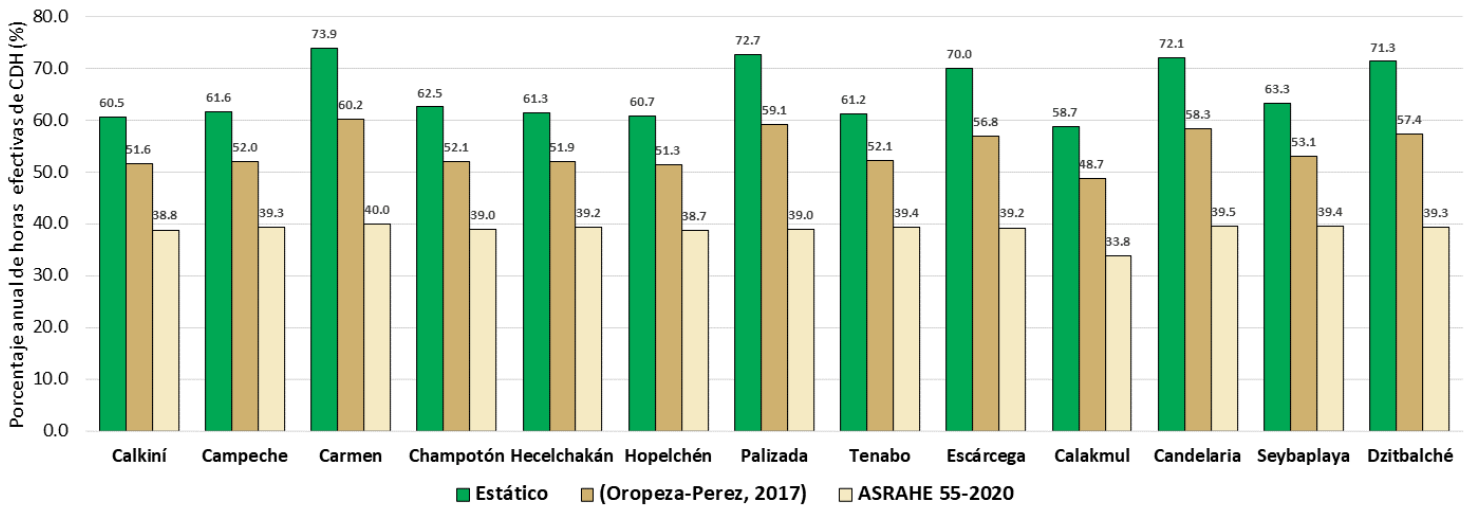


Figura 4. Contraste anual para los municipios de Campeche del porcentaje de horas-año requeridas para refrigeración empleando el enfoque estático y el enfoque de confort adaptativo. Fuente: Elaboración de los autores.

24,000 a los 24,800°C/hora-año. Comparando estos valores con los de la Figura 3b y Figura 3c, se visualiza que el enfoque adaptativo propicia menor uso de energía para refrigeración en todos los municipios de la entidad. No obstante, existen diferencias notables entre ambos modelos de CTA. El modelo de la ASHRAE indica que es posible reducir entre un 53 y 62% el índice de CDH, mientras que el modelo regional, si bien exhibe beneficios, estos se reducen a la mitad, disminuyendo entre 28 y 31%, respecto del enfoque estático. Esto puede deberse a que el modelo de la ASHRAE 55-2020 está diseñado bajo análisis en climas menos calurosos, implicando una razón de cambio para los ocupantes menos drástica ($m=0.31$). Lo anterior puede llevar a que en regiones de clima tropical, como Campeche, haya un límite crítico para cumplir en teoría con el modelo, pero en la práctica aumenta la incomodidad de los ocupantes. Por su parte, el modelo regional indica que las poblaciones en climas cálidos no tienen amplia tolerancia al calor ($b=18.3$), así como una menor adaptación climática a los cambios bruscos de temperatura que se dan en la región.

Otro punto importante para analizar es cómo impacta la integración del enfoque adaptativo en las horas de operación de los equipos de aire acondicionado. La Figura 4 presenta el porcentaje anual de horas de uso de equipo de climatización para enfriar recintos. El enfoque

estático muestra un 60 % de uso de aire acondicionado durante el año, siendo los municipios del sur (Carmen, Palizada, Escárcega y Candelaria) los que más emplean climatización. Esto implica que, a pesar de que su consumo anual es menor que los municipios del norte, son los de mayor tiempo fuera de la zona de confort. Por su parte, al usar el modelo adaptativo regional, es posible disminuir entre 10% y 8% las horas efectivas de CDH; reduciendo en la mayor parte de los municipios las horas operativas por debajo del 55%, mientras que el modelo ASHRAE sugiere que es posible disminuir por debajo del 40% las horas de CDH anuales. No obstante, es importante considerar lo discutido con anterioridad ya que de acuerdo a Humphreys et al. (2007) una mala implementación del enfoque adaptativo puede ser contraproducente pues alentaría a los ocupantes a utilizar más energía para aliviar el estrés térmico. Esto demuestra la valía del modelo regional al representar de forma más clara las características del Estado, al mismo que tiempo de indica que el enfoque adaptativo es una opción adecuada para la reducción del consumo energético de climatización.

ANÁLISIS DE HORAS GRADO DE CALEFACCION

Para los HDH, su análisis no implica la necesidad de acciones de calefacción en el Estado (temperaturas en la

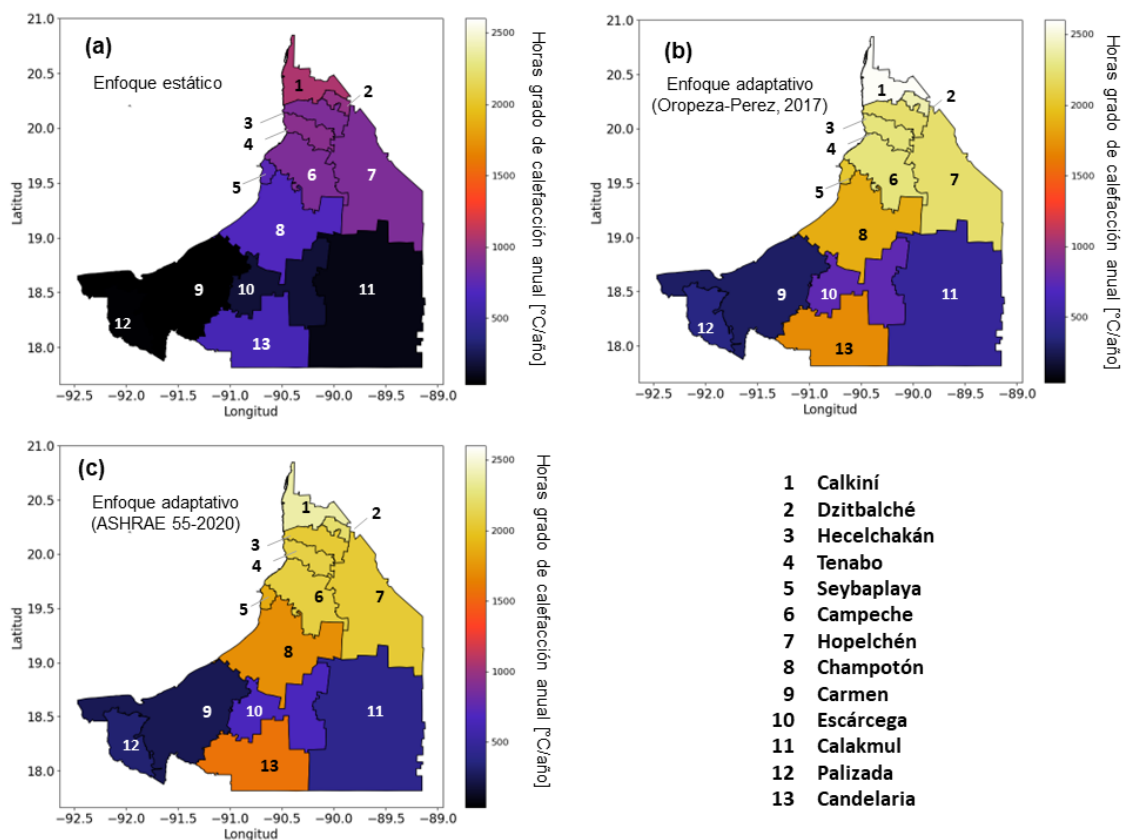


Figura 5. Horas grado de calefacción para los municipios de Campeche: (a) modelo estático; (b) modelo adaptativo regional; (c) modelo adaptativo ASHRAE 55-2020. Fuente: Elaboración de los autores.

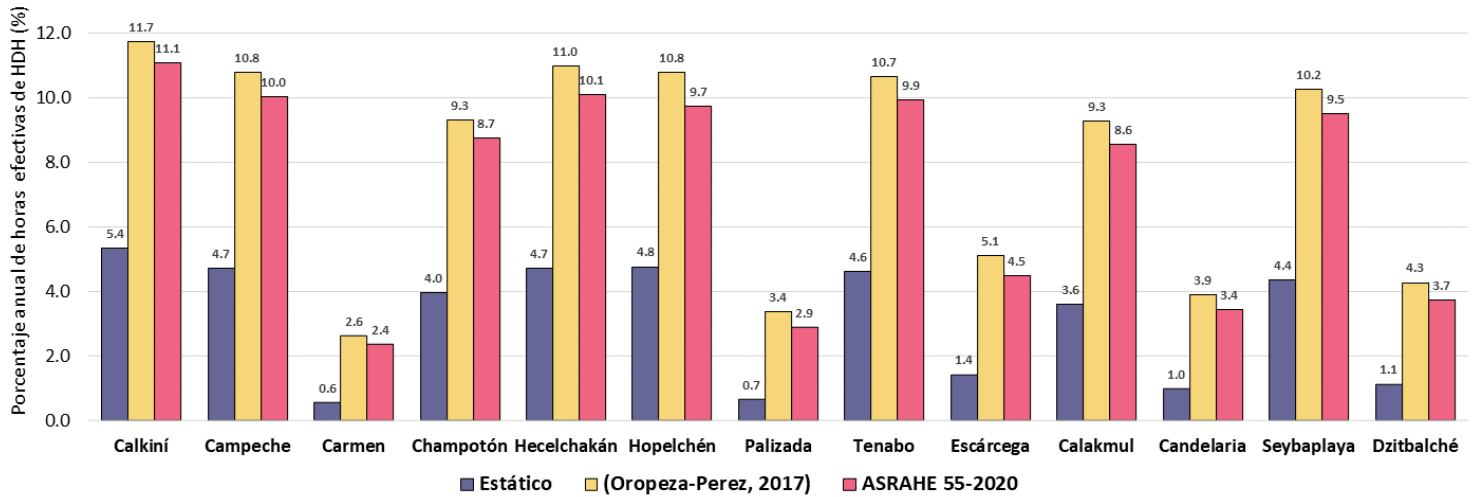


Figura 6. Contraste anual para los municipios de Campeche del porcentaje de horas-año requeridas para calefacción empleando el enfoque estático y de confort adaptativo. Fuente: Elaboración de los autores.

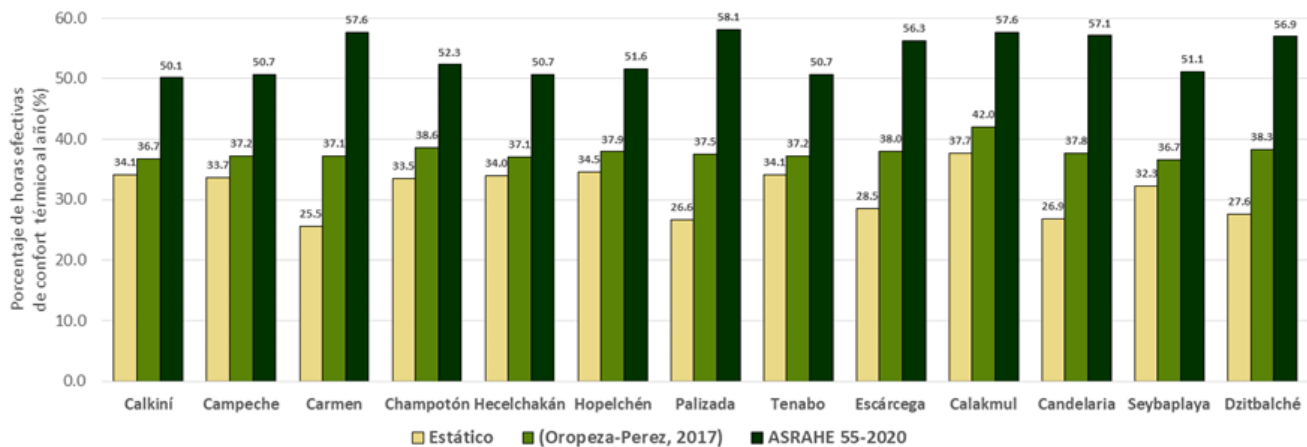


Figura 7. Contraste anual para los municipios de Campeche del porcentaje de horas-año requeridas para calefacción empleando el enfoque estático y el enfoque de confort adaptativo. Fuente: Elaboración de los autores.

región difícilmente son inferiores a los 18°C), pero sí es un indicativo del tiempo en el que la población puede estar en temperaturas por debajo de la zona de confort.

De acuerdo con la Figura 5, hay un fenómeno similar al caso del CDH donde los municipios del Carmen, Palizada, Candelaria y Escárcega (ubicados al sur) presentan los menores índices de desconfort en el año. Los resultados del enfoque estático muestran que los requisitos de HDH para el Estado son mínimos, coincidiendo con las condiciones de clima tropical de Campeche. No obstante, recordando que para nuestro caso el HDH indica el nivel desconfort de los ocupantes, es necesario cotejar con los resultados adaptativos. Basado en las Figuras 5b y 5c, el enfoque adaptativo infiere que las necesidades de HDH son mayores. Es importante resaltar que en comparación al caso de CDH donde el modelo del ASHRAE varía hasta en 20% del modelo regional, la diferencia de HDH

entre ambos es mínima, lo que se puede corroborar en la escala de colores de la Figura 5. En promedio ambos modelos difieren 9.8% entre sí, por lo que en este caso sí coinciden en la estimación del calor. Cabe destacar que esta diferencia puede deberse por la percepción de frío en regiones de clima tropical, en donde la población comienza a entrar en desconfort cuando se encuentra frente a temperaturas más elevadas respecto a regiones templadas.

Por otra parte, se realizó el análisis respecto de las horas anuales que la población está por debajo de la zona de confort (Figura 6). La diferencia entre las horas efectivas para ambos modelos adaptativos varía apenas entre 0.2% y 0.9%, siendo en los municipios con menor porcentaje de HDH donde se encontraban las menores diferencias. En todos los casos el modelo adaptativo apenas superó el 10% de horas anuales lo cual se traduce en poco menos

Tabla 1. Diferencias del porcentaje de horas de CDH, HDH y confort térmico anual de cada modelo adaptativo respecto al enfoque estático para el Estado de Campeche. Fuente: Elaboración de los autores.

Municipio	Modelo (Oropeza-Perez et al., 2017)			Modelo ASHRAE 55-2020		
	CDH	HDH	Confort	CDH	HDH	Confort
Calkiní	9.0	6.4	2.6	21.7	5.7	16.0
Campeche	9.6	6.1	3.5	22.2	5.3	16.9
Carmen	13.7	2.1	11.6	33.9	1.8	32.1
Champutón	10.4	5.3	5.1	23.6	4.8	18.8
Hecelchakán	9.4	6.3	3.1	22.1	5.4	16.7
Hopelchén	9.4	6.0	3.4	22.0	5.0	17.0
Palizada	13.6	2.7	10.9	33.7	2.2	31.5
Tenabo	9.1	6.0	3.1	21.8	5.3	16.5
Escárcega	13.2	3.7	9.5	30.8	3.1	27.8
Calakmul	10.0	5.7	4.3	24.8	5.0	19.9
Candelaria	13.8	2.9	10.8	32.6	2.5	30.2
Seybaplaya	10.2	5.9	4.3	23.9	5.1	18.8
Dzitbalché	13.9	3.1	10.8	32.0	2.6	29.4
Promedio	11.2	4.8	6.4	26.5	4.1	22.4
Desv. Estándar	2.1	1.6	3.6	5.1	1.4	6.5

de 40 días del año, siendo la mayor parte de tiempo en horas nocturnas.

POTENCIAL DE APLICACIÓN DE VENTILACION NATURAL

El fin último del análisis es identificar el nivel de impacto positivo que tiene la implementación de estrategias adaptativas en los 13 municipios de Campeche. De acuerdo con lo expuesto en la Figura 7, la implementación de ambos modelos adaptativos demuestra ventajas respecto del enfoque estático. En el caso del modelo ASHRAE 55-2020, se identificó que su uso estaría asociado a la posibilidad de aplicar ventilación natural en al menos el 50% del año en todos los municipios del Estado, con posibilidad de ser aprovechado en hasta más del 57 % en municipios como Palizada, Carmen y Calakmul. En el caso del modelo regional, existen beneficios moderados con porcentaje de aprovechamiento de ventilación natural en promedio del 38% en todo el territorio.

La Tabla 1 permite ver que el enfoque adaptativo de la normativa y el enfoque regional mejoran un 16 % y 6.4 % la perspectiva de aplicación de ventilación natural, respectivamente. Es interesante analizar los efectos que presenta el modelo regional. Por un lado, los municipios correspondientes al norte del estado (Campeche, Calkiní, Hecelchakán y Tenabo) poseen apenas mejoras de entre 2.4 y 3.5 % respecto del modelo tradicional. En contra

parte, los mejores resultados ocurren en los municipios del sur.

En el caso del modelo ASHRAE, se pueden encontrar resultados similares a lo señalado en el párrafo anterior, lo cual deja claro que las estrategias de ventilación natural basadas en el enfoque adaptativo no benefician del mismo modo a toda la entidad federativa. En el caso del modelo ASHRAE, queda en duda su efectividad, específicamente en el caso de los CDH, al considerar que puede estar sobreestimando la tolerancia de la población a las condiciones de calor extremo de la región. Por otra parte, el modelo regional demostró que, si bien se puede ajustar a las condiciones del clima, también deja claro la necesidad de desarrollar modelos de confort locales que tomen en cuenta la subdivisión regional de las entidades del país para poder plantear estrategias acordes a la realidad del sureste mexicano.

Los resultados pueden ser utilizados para realizar otros análisis como identificar el porcentaje y grado de impacto sobre la población al implementar estrategias de ventilación natural mediante el enfoque adaptativo (Figura 8). En el caso del modelo ASHRAE, se aprecia que el rango de impacto se encuentra entre el 50% y 60%. En este caso, los datos se pueden dividir en cuatro estratos, donde el caso de 54-56% se omitió al carecer de valores. De acuerdo con los datos poblacionales de cada municipio el 48% de los habitantes de Campeche tienen la posibilidad de aplicar estrategias de ventilación

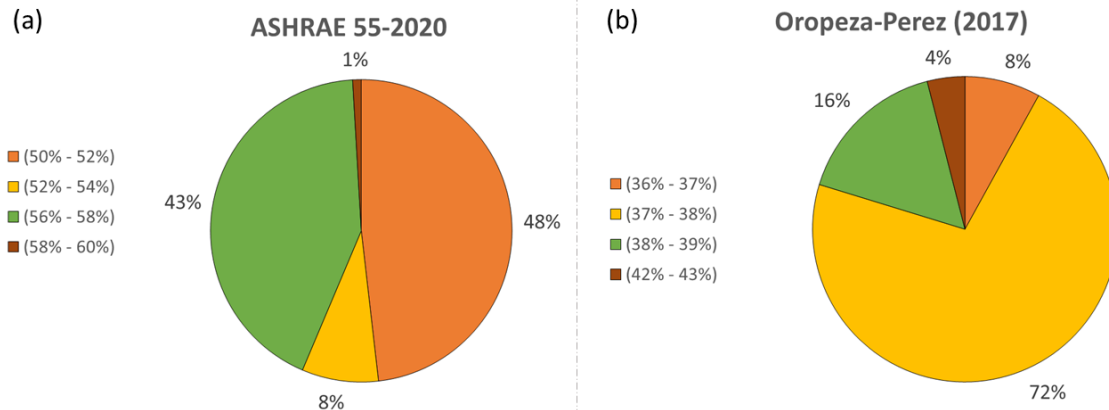


Figura 8. Fracción de población en el Estado de Campeche sobre la que impacta el porcentaje de horas efectivas de CTA (a) análisis basado en modelo ASHRAE 55-2020; (b) análisis basado en modelo de regional. Fuente: Elaboración de los autores.

natural, poco menos del 52% del año. Dichos resultados coinciden con el hecho de que la zona más densamente poblada corresponde a los municipios de Campeche y Seybaplaya. Por otra parte, el 43% de la población tiene la posibilidad de implementar el enfoque adaptativo para alcanzar niveles de confort térmico entre el 56% y 58% anual. Lo anterior debido a la mayor distribución demográfica en los municipios del sur donde la estabilidad térmica es mayor. Para el caso del modelo local, los resultados se encuentran más concentrados. En este caso, con el fin de brindar una mejor apreciación se dividió en cuatro estratos con intervalos 1%. De acuerdo con los resultados de este modelo, el 88% de la población se encuentra en un intervalo entre el 37 y 39 % de posibilidad de ventilación natural. Esto indica que el modelo impacta en un gran porcentaje de los habitantes. Además, estos valores están por encima de lo que se puede alcanzar con el enfoque estático. De esta manera, el modelo regional demuestra que, aunque en menor medida, el enfoque adaptativo sí favorece la reducción del consumo energético entre los habitantes del Estado y abre el cuestionamiento sobre la viabilidad de implementar el modelo convencional de la ASHRAE en la región.

Finalmente, el enfoque adaptativo posee ventajas tanto desde la perspectiva del confort como del ahorro energético. Para el caso de Campeche, que es una entidad federativa joven y con una población reducida y creciente, el desarrollo de este tipo de enfoques brinda la posibilidad de un crecimiento urbano con mejores estrategias de diseño y planteamiento. Sin embargo, es imperativo el desarrollo de estudios más focalizados en los diversos municipios con el fin de poder hacer estimaciones más concretas y ajustadas con la realidad de la región.

CONCLUSIÓN

El presente estudio se centró en analizar la implementación del enfoque de confort térmico adaptativo como estrategia para mejorar la sensación térmica y el ahorro energético en edificios del estado de Campeche. Mediante la revisión de los 13 ficheros climáticos de cada uno de los municipios del Estado se determinó el potencial de horas de enfriamiento, calefacción y viabilidad del enfoque adaptativo para la región. Para tal efecto se analizó el modelo presentado por la normativa ASHRAE 55-2020 y un modelo regional desarrollado para climas tropicales en México. Dichos modelos fueron contrastados con el enfoque convencional de confort térmico estático para determinar las ventajas y diferencias entre ambos.

Los resultados mostraron que ambos modelos adaptativos pueden contribuir a reducir el uso de equipo de climatización en los 13 municipios del Estado. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas en el potencial de ambos modelos, las cuales se atribuyeron a que el modelo basado en la norma ASHRAE 55-2020, a pesar de que es ampliamente usado, puede tener sesgos al no estar diseñado con variables características del clima tropical. De acuerdo con los resultados, el modelo regional promedió una reducción de 11.2% en las horas anuales de climatización mientras que el enfoque basado en la normativa obtuvo 15.4% y 16.0 % respectivamente.

En relación con la viabilidad de implementación, el enfoque adaptativo regional demostró capacidad de mejorar entre un 2.6% y 11.6% el confort térmico al interior de los edificios, mientras que el enfoque de la ASHRAE indicó mejoras entre un 16% y 32%. Por su parte, los resultados del modelo regional demuestran que, aunque en menor medida, el enfoque adaptativo sí favorece la reducción del consumo energético entre los habitantes del Estado, y abre el cuestionamiento sobre la

viabilidad de implementar el modelo convencional de la ASHRAE en la región.

Finalmente, el trabajo da pie al desarrollo de posteriores estudios enfocados a: (i) generar modelos específicos para los diversos municipios o subregiones del estado con el fin hacer estimaciones ajustadas al contexto del sureste del país, (ii) estudiar el comportamiento adaptativo en los diversos tipos de construcciones que se edifican en la región.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto 014/UAC/2023 y realizado con el apoyo de la Red Temática 722RT0135 "Red Iberoamericana de Pobreza Energética y Bienestar Ambiental (RIPEBA), financiado por la Convocatoria de Redes Temáticas del Programa CYTED".

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/ASHRAE. (2021). ANSI/ASHRAE Standard 169-2020 - *Climatic Design Building Standards*. Recuperado de: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/169_2020_a_20211029.pdf

ASHRAE. (2020). *ASHRAE Standard 55-2020 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Recuperado de: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/55_2020_a_20210430.pdf

Bienvenido-Huertas, D., Pulido-Arcas, J. A., Rubio-Bellido, C. & Pérez-Fargallo, A. (2021). Feasibility of adaptive thermal comfort for energy savings in cooling and heating: A study on Europe and the Mediterranean basin. *Urban Climate*, 36, 100807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100807>

Carlucci, S., Bai, L., De Dear, R. & Yang, L. (2018). Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Building and Environment*, 137, 73-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>

Hoyt, T., Arens, E. & Zhang, H. (2015). Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Building and Environment*, 88, 89-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.010>

Humphreys, M. S., Nicol, J. M. & Raja, I. A. (2007). Field Studies of Indoor Thermal Comfort and the Progress of the Adaptive Approach. *Advances in Building Energy Research*, 1(1), 55-88. DOI: <https://doi.org/10.1080/17512549.2007.9687269>

INEGI. 2022. *Aspectos Geográficos: Campeche 2021*. Aguascalientes.

Jimenez-Torres, M., Bienvenido-Huertas, D., May Tzuc, O., Bassam, A., Ricalde Castellanos, L. J. & Flota-Bañuelos, M. (2023). Assessment of climate change's impact on energy demand in Mexican buildings: Projection in single-family houses based on Representative Concentration Pathways. *Energy for Sustainable Development*, 72, 185-201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.012>

Oropeza-Perez, I., Petzold-Rodriguez, A. H. & Bonilla-Lopez, C. (2017). Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buildings*, 145, 251-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.031>

Pérez-Fargallo, A., Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C. & Trebilcock, M. (2020). Energy poverty risk mapping methodology considering the user's thermal adaptability: The case of Chile. *Energy for Sustainable Development*, 58, 63-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.07.009>

Rodríguez, C. M. & D'Alessandro, M. (2019). Indoor thermal comfort review: The tropics as the next frontier. *Urban Climate*, 29, 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100488>

Sala, M., Gallo, C. & Sayigh, A. A. M. (1999). *Architecture - Comfort and Energy*. Elsevier.

Salcido, J. C., Raheem, A. A. & Issa, R. R. A. (2016). From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review. *Energy and Buildings*, 127, 1008-1018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.054>

Sánchez-García, D., Bienvenido-Huertas, D., Pulido-Arcas, J. A. & Rubio-Bellido, C. (2023). Extending the use of adaptive thermal comfort to air-conditioning: The case study of a local Japanese comfort model in present and future scenarios. *Energy and Buildings*, 285, 112901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112901>

Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Martín del Río, J. J. & Pérez-Fargallo, A. (2019). Towards the Quantification of Energy Demand and Consumption through the Adaptive Comfort Approach in Mixed Mode Office Buildings Considering Climate Change. *Energy and Buildings* 187, 173-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.002>

SENER, Secretaria Nacional de Energía. (2021). Comisión Nacional Para el uso Eficiente de la Energía. *Infografía Confort Térmico*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estadisticas-energeticas-en-las-viviendas-mexicanas>

Tsolkas, C., Spiliotis, E., Sarmas, E., Marinakis, V. & Doukas, H. (2023). Dynamic energy management with thermal comfort forecasting. *Building and Environment*, 237, 110341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110341>

Yau, Y. H. & Chew, B. P. (2012). A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(1), 23-35. DOI: <https://doi.org/10.1177/0143624412465200>