

Habitabilidad en vivienda de interés social en Campeche bajo condiciones de cambio climático implementando un sistema pasivo

M. Jiménez Torres^{1,2*}, O. May Tzuc^{3*}, Andrea del Rosario Cruz y Cruz³, Francisco Javier Barrera Lao³, Luis J. Ricalde Castellanos⁴, Francisco Noé Demesa⁵

¹Estudiante de posgrado en Energías Renovables, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias no Contaminantes, Mérida, Yucatán, México.

²Departamento de Ingeniería y Proyectos, Universidad Internacional Iberoamericana, C 15 num 36, Av IMI III, C.P. 24560, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

³Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, Campus V, S/N por Av. Humberto Lanz Cárdenas y Unidad Habitacional Ecológica Ambiental, Col. Ex Hacienda Kalá, C.P. 24085, San Francisco de Campeche, Campeche, México.

⁴Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Av. Industrias no Contaminantes, Mérida, Yucatán, México.

⁵Instituto Tecnológico de Pachuca, Tecnológico Nacional de México, Carretera México - Pachuca Km. 87.5, C.P. 42080, Colonia Venta Prieta, Pachuca de Soto, Hidalgo, México.

Fecha de recepción: 9 de mayo de 2023 - Fecha de aceptación: 22 de junio de 2023

Resumen

El cambio climático ha ocasionado temperaturas extremas en el sureste de México. Las edificaciones residenciales son el principal resguardo ante las inclemencias del clima; sin embargo, en el estado de Campeche estas edificaciones no proporcionan condiciones de habitabilidad adecuadas producto de los materiales empleados. Este estudio analiza el comportamiento termo-energético de recubrimientos reflectivos en el techo como sistema pasivo en las ciudades de Campeche y Ciudad del Carmen. Los resultados reflejan que anualmente la vivienda base supera los 28 °C más del 75 % del tiempo, alcanzando los 34 °C en verano. Al usar una pintura con tonalidad terracota se incrementa la temperatura en un 5 %; mientras que, la pintura tonalidad blanca conocida como Cool Roof decrece la temperatura interna hasta en 2 °C. Este decrecimiento en la temperatura al considerar el uso de equipos de climatización para enfriar un espacio deriva en un ahorro del 20 % respecto al caso base (260 kWh/m²); mientras que la tonalidad terracota incrementa un 5 % el consumo respecto a la vivienda sin modificaciones. Estos patrones energéticos al proyectarlos bajo un escenario de cambio climático aumentan un 20 % respecto al comportamiento actual demostrando que la normativa vigente requiere exigir el uso de materiales aislantes.

Palabras Claves: Vivienda de interés social, consumo energético, sistemas pasivos, cambio climático, Modelación computacional

*mario.jimenez@unini.edu.mx; oscajmay@uacam.mx

Habitability in low-income housing in Campeche under climate change conditions implementing a passive system

Abstract

Climate change has caused extreme temperatures in southeastern Mexico. Residential buildings are the main shelter against inclement weather; however, in Campeche, these buildings do not provide adequate habitability conditions due to the materials used. This study analyzes the thermo-energetic behavior of reflective roof coatings as a passive system in Campeche and Ciudad del Carmen. The results reflect that annually the base house exceeds 28 °C more than 75% of the time, reaching 34 °C in summer. When using a terracotta hue, the temperature increases by 5%, while the white paint, known as a Cool Roof, decreases the internal temperature by up to 2 °C. When considering using air conditioning equipment to cool a space, this decrease in temperature saves 20% compared to the base case (260 kWh/m²), while the terracotta hue increases consumption by 5% compared to the home without modifications. When projected under a climate change scenario, these energy patterns increase by 20% compared to current behavior, demonstrating that current regulations require insulating materials.

Keywords: Social interest housing, energy consumption, passive systems, climate change, Computational modelling.

Introducción

El progreso de la sociedad está estrechamente vinculado con el uso de energía eléctrica. Sin embargo, este proceso ha llevado consigo diversos fenómenos ambientales, como el cambio climático (Sorensen, 2013). Con el fin de abordar esta problemática, se han establecido varios acuerdos internacionales en los cuales se ha fijado como objetivo no superar un aumento de 1.5 °C en la temperatura ambiente para el año 2035 (Vázquez-Torres et al., 2023). Con el propósito de tener modelos predictivos en emisiones de contaminantes el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), estableció a través de los Modelos de Concentración Representativa (RCP, por sus siglas en inglés) diversos gradientes de emisión de contaminantes a la atmosfera y su repercusión en la temperatura ambiente (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2014). Para evitar las

problemáticas ambientales, la política internacional presionada por la divulgación social ha establecido que la ruta de camino es fomentar la eficiencia energética.

De los diversos sectores consumidores de energía, el sector de edificaciones, específicamente, las edificaciones residenciales, es uno de los principales sectores con mayor demanda energética. Se estima que estas edificaciones utilizan cerca del 40 % del consumo energético total y son responsables de al menos el 30 % de las emisiones de contaminantes (Pérez-Fargallo et al., 2020). Estos patrones se acrecientan en regiones con climas cálidos o tropicales, los cuales son caracterizados por tasas de crecimiento constante de la población y mayor demanda de aire acondicionado. De igual manera, en las urbes se presenta el fenómeno de las Islas de Calor Urbano (UHI, por sus siglas en inglés), las cuales potencializan la temperatura ambiente afectando en la salud humana (Grajeda-

Rosado et al., 2023). Por estas razones el 50 % de los requerimientos energéticos en edificación se destinan a procesos de climatización de espacios (Jiménez Torres et al., 2023).

Aunado a los aspectos meteorológicos el alto consumo en climatización es producto de los materiales constructivos empleados en las envolventes, las cuáles son una barrera del medio externo con el interior (Littlewood et al., 2020). Específicamente, en regiones con condiciones de clima tropical, el techo es uno de los elementos de mayor importancia por recibir alta incidencia solar, aportando cerca del 50 % del total de energía que ingresa al edificio (Nahar et al., 2014). Diversas tecnologías se han desarrollado para contrarrestar y regular la ganancia de calor por esta envolvente, las cuales se clasifican en materiales aislantes, materiales de cambio de fase, materiales reflectivos, espacios y cavidades ventiladas, vegetación, entre otras. Particularmente, en regiones de clima cálido tropical se ha demostrado que las pinturas reflejantes son una alternativa viable para reducir el consumo energético en edificios, alcanzando disminuciones en la temperatura interna de 1 °C hasta 4 °C (Al-Obaidi et al., 2014; Hernández-Pérez et al., 2018).

En México los estados de Oaxaca, Guerrero, Chiapas, Veracruz, Tabasco, Quintana Roo, Yucatán y Campeche componen el sureste del país y se catalogan con una tipología climática cálida-Subhúmeda y tropical. En esta región se concentra el 30 % de las edificaciones residenciales del país; sin embargo, duplican el consumo energético (40,000 millones de kWh) respecto a zonas con clima templado, siendo la climatización artificial uno de los principales consumidores de energía con el 30 % (CONUEE, 2020; Statista, 2022). Las viviendas residenciales conocidas como “interés social” son las de mayor

implementación en México, razón por la cual han adquirido relevancia en las últimas décadas. Estas edificaciones integran como elementos constructivos materiales basados en concreto, block y ladrillo caracterizados por una alta densidad y conductividad térmica. Estos materiales no proporcionan una protección efectiva a los habitantes, derivando en la insatisfacción de los parámetros de confort térmico y ocasionando un incremento en el consumo de energía en la climatización de espacios a los usuarios (May Tzuc et al., 2020). Por ello, la investigación se ha enfocado en técnicas que reduzcan los requerimientos energéticos en climatización mediante diversas técnicas.

Basado en lo anterior, este trabajo se enfoca en un análisis computacional termo-energético en el empleo de pinturas reflectivas con diferente tonalidad y su efecto en viviendas de interés social en las ciudades de Campeche y Ciudad del Carmen. Posteriormente, se proyectó el patrón energético en una década futura bajo un escenario de cambio climático.

Características de la región de tipología climática tropical de México

De acuerdo con datos meteorológicos el sureste del país presenta una temperatura promedio de 28 °C, alcanzando picos máximos superiores a los 33 °C en los meses de verano como se exhibe en la Figura 1. El presente estudio se enfoca en las ciudades de Campeche (19° 50' 16.91" N, 90° 31' 39.72" O) y Ciudad del Carmen (18° 38' 45.3" N y 91° 49.795" O). La precipitación anual varía entre los 1,200 y 2,000 mm, siendo muy abundante durante el verano. Debido a estos índices de precipitación y su cercanía al mar (Figura 1), se tiene una humedad relativa superior al 60 %, lo cual afecta directamente en la sensación térmica. En aspectos energéticos, la clasificación tarifaria asignada por la Comisión Federal

de Electricidad (CFE) es 1D para estas ciudades. Esta tarifa establece que la región no supera los 31 °C en verano; sin embargo, se han registrado temperaturas superiores a los 38 °C, repercutiendo directamente en consumos masivos de energía para satisfacer las necesidades de confort térmico. Esto adquiere mayor relevancia al considerar que la población en el estado de

Campeche tiene un ingreso promedio de \$ 6,000 MXN. Así mismo, en Campeche y Ciudad del Carmen se aglomeran la mayor cantidad de viviendas en el estado, por lo cual el desarrollo de estrategias pasivas que mejoren el comportamiento térmico de la edificación es imprescindible para apoyar la economía de la población (Mexico, 2022; SEMARNAT, 2022).

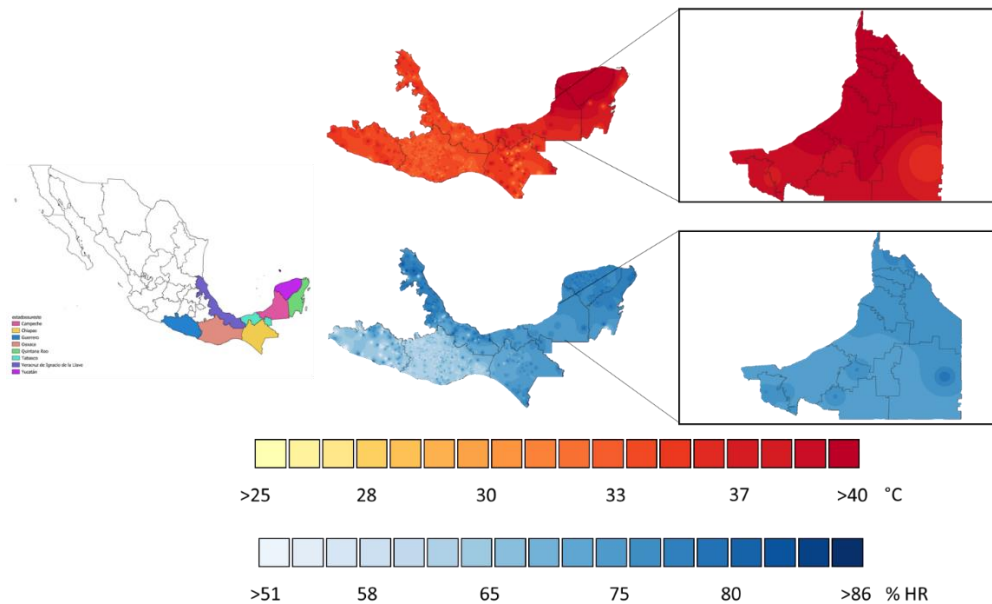


Fig. 1 Comportamiento de la temperatura ambiente y humedad relativa en los estados del sureste de México.

Metodología

El estudio se desarrolló en tres etapas: a) Acceso a información meteorológica de las ciudades de Campeche y Ciudad del Carmen considerando la fenomenología de la temperatura ambiente, dirección y velocidad de viento, radiación, índice de precipitación, humedad relativa, entre otras, en la actualidad y a futuro bajo un escenario de cambio climático; b) Obtención de características físicas, térmicas y óptimas de los materiales constructivos, el área y distribución de espacios para la modelación y ejecución en software especializado; c) Caracterización térmica y energética de la

vivienda al aplicar el sistema pasivo contrastando el comportamiento al modificar la colorimetría del material.

Adquisición de base de datos meteorológica

La información meteorológica de los municipios fue obtenida a través del software Meteonorm (Remund, J., Muller, S., Kunz, S., Huguenin-Landl, B., Studere, C., Cattin, 2017) contemplando el año 2020 y un escenario futuro 2050, estableciendo el escenario de cambio climático RCP 8.5. El escenario RCP 8.5, presenta un forzamiento radiativo que asciende los 1,350 ppm de CO₂ equivalente, resultado en un

incremento en la temperatura ambiente de 2 °C y 4.3 °C para el año 2050 y 2100 respectivamente.

Descripción de la vivienda

Las edificaciones residenciales en México se catalogan en Económica, Popular, Tradicional, Media, Residencial y Residencial Plus. Estas categorías se determinan de acuerdo con el área constructiva y el precio, como se exhibe en la Tabla 1. De dicha categorización, la vivienda Económica, Popular y tradicional se catalogan en lo que se conoce como “vivienda de interés social” las cuales son la de mayor implementación en México y son el tema de estudio del presente trabajo. Los materiales constructivos que emplean estas edificaciones son con base en block, ladrillo y concreto que son materiales caracterizados por poseer una alta conductividad térmica (Jiménez Torres et

al., 2023). La construcción de estudio se compone de dos recámaras, comedor, cocina y baño con un área constructiva de 69 m² (Figura 2). Los materiales constructivos se componen de paredes de 17 cm de grosor las cuales se conforman por bloques de concreto de 15 cm x 20 cm x 40 cm, con revestimiento de mortero de 1 cm por cada extremo; el techo se conforma por vigueta, bovedilla y un colado de 3 cm, siendo los materiales solicitados por la normativa vigente (SENER, 2011). Sintetizando la información de las propiedades térmicas de la envolvente, el coeficiente global de pérdida de calor (Valor – U) tiene 2.21 W/m²K en los muros, 1.784 W/m²K en el techo y 3.8 W/m²K para las ventanas. Estas propiedades y las dimensiones de la edificación se utilizan para la realización del modelo computacional y posterior ejecución a través del software Energy Plus.

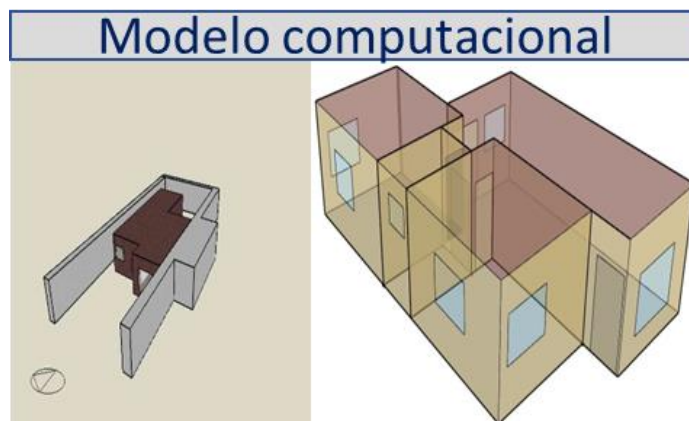


Fig. 2. Modelo computacional de la vivienda de interés social de estudio.

Tabla 1. Clasificación de la vivienda de acuerdo con el área constructiva y precio promedio (SEDATU & CONAVI, 2017)

Promedios	Económica	Popular	Tradicional	Media	Residencial	Residencial plus
-----------	-----------	---------	-------------	-------	-------------	------------------

Superficie construida (m²)		40	50	71	102	156	Más de 188
Costo promedio considerando (UMA)		Hasta 118	118.1 – 200	200.1 – 350	350.1 – 750	750.1 – 1,500	Mayor de 1,500
Número de espacios	de	Baño de Cocina Área de usos múltiples	1 baño Cocina Estancia-Comedor De 1 a 2 recámaras	1 ½ baños Cocina Estancia-Comedor De 2 a 3 recámaras	2 baños Cocina Sala Comedor De 2 a 3 recámaras Cuarto de servicio	3 a 4 baños Cocina Sala Comedor De 3 a 4 recámaras Cuarto de servicio	3 a 5 baños Cocina Sala Comedor De 3 a más recámaras De 1 a 2 cuartos de servicio Sala familiar Salón de juegos Jardín

Pinturas reflejantes

Las edificaciones en México presentan una amplia diversidad de materiales y tonalidades en los recubrimientos empleados, partiendo desde la tonalidad gris del techo sin modificaciones hasta el uso de impermeabilizantes con colorimetría roja. Sin embargo, la tonalidad blanca ha adquirido relevancia por su implementación en pinturas comerciales. Estas pinturas tienen el propósito de funcionar como material reflejante, incrementando la reflexión de la luz solar y absorbiendo la cantidad mínima de energía comparado con un techo estándar. Esta clase de tecnología

se caracteriza por colocar como primera capa al ambiente una cubierta especial de pintura, lámina o tejas altamente reflectantes, como se exhibe en la Figura 3. En el presente estudio, se considera la implementación de dos pinturas comerciales conocidas como Top Total usadas como impermeabilizante. Las tonalidades que maneja esta pintura son blanca y roja, lo cual afecta sus propiedades ópticas como se observa en la Tabla 2. Considerando estas tecnologías se procedió a realizar el contraste en la afectación de la temperatura interna y la energía requerida en equipos de climatización para alcanzar el confort térmico.

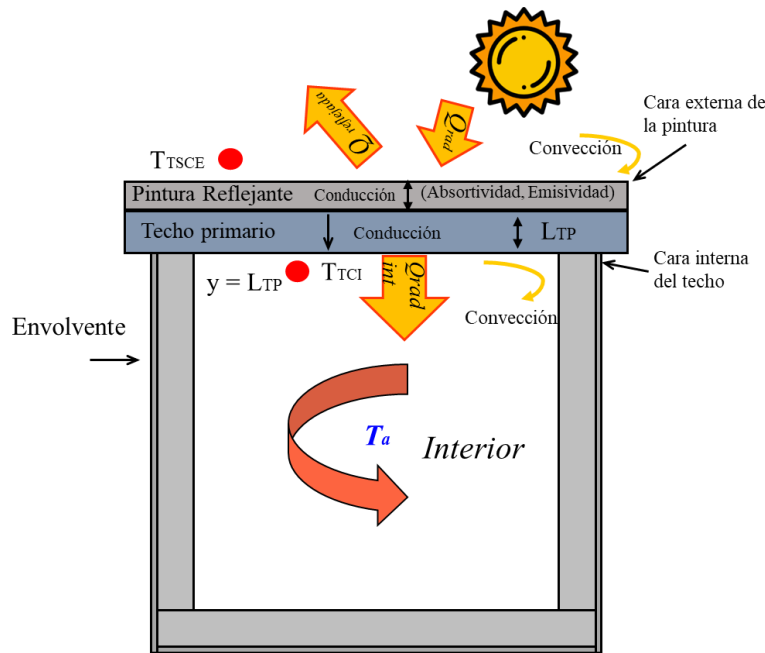


Fig. 3. Comportamiento del techo con material reflectivo.

Tabla 2. Reflectancia solar de los recubrimientos en el techo

Recubrimiento	Reflectancia solar (ρ)
Gris (Techo sin modificaciones)	0.33
Blanco (Top Total)	0.84
Terracota (Top Total)	0.3

Simulación térmica y energética de la vivienda de estudio

Con el objetivo de determinar los efectos de las variables ambientales en la temperatura interna del recinto se realizó un proceso de simulación energética. Esta simulación, se ejecutó mediante el software Energy Plus, el cual mediante cálculos de transferencia de calor predice el comportamiento térmico y energético del edificio. El software requiere de las propiedades físicas de los materiales, el diseño del edificio, así como procesos de infiltración y patrones operativos en ventilación natural y refrigeración artificial. Las propiedades de los materiales, así como el espacio constructivo se describieron

anteriormente. El perfil operacional de ventilación natural y horarios de climatización se elaboró con los resultados emitidos por la Encuesta Nacional de Consumo de Energía en Viviendas Particulares (ENCEVI). En este perfil se estableció el uso de equipos de climatización durante los meses de marzo a octubre desde las 18:00 h hasta las 6:00 h, estableciendo una temperatura objetivo de 26 °C que es recomendada por el ASHRAE para el confort térmico y mayor eficiencia energética considerando las condiciones climáticas de la región (ANSI/ASHRAE, 2017). Con esta información, el software puede calcular la temperatura interna del

edificio en función de las condiciones ambientales. Al recabar la proyección de la temperatura interna, el software calcula el consumo energético requerido para aproximarse a la temperatura de consigna de acuerdo al perfil operativo ingresado evaluando la tecnología del equipo de refrigeración.

Resultados

En esta sección se presenta la comparativa térmica y energética entre la vivienda sin modificaciones respecto al implementar las pinturas como sistema reflectivo en las ciudades de Campeche y Ciudad del Carmen, Campeche, México.

Análisis del comportamiento de la temperatura ambiente

Las zonas del sureste se caracterizan por presentar durante todo el año altas temperaturas perjudicando en la sensación térmica al interior de la vivienda, produciendo una alta dependencia a equipos de climatización en la adecuación térmica del entorno. En la Figura 4, se observa el comportamiento de la temperatura en las ciudades de Campeche y Ciudad del

Carmen. Es evidente que únicamente tres meses al año se tiene una temperatura ambiente promedio por debajo de los 24 °C, mientras que al comenzar los meses de verano la temperatura aumenta drásticamente siendo el mes de mayo la mayor temperatura con 30.5 °C en Campeche (Fig. 4a) y 30 °C en Ciudad del Carmen (Fig. 4b). Es imperativo enfatizar que las temperaturas son promedio por lo cual al observar que durante los meses abril hasta octubre se presentan temperaturas que rondan los 27 °C – 28 °C, significa que durante diversos lapsos de tiempo se alcanzan temperaturas superiores a los 30 °C equilibrándose durante la noche. Al momento de considerar la temperatura para el año 2050 bajo el escenario de cambio climático RCP 8.5 que es el de mayor índice de contaminantes, se exhibe de manera evidente un incremento superior a 1.5 °C, respecto al comportamiento actual. Bajo este panorama más del 70 % del año la temperatura superará los 28 °C, siendo el mes de mayo el de mayor repercusión en la afectación de temperatura sobre todo en Ciudad del Carmen, en la cual se alcanzará una temperatura de 32 °C.

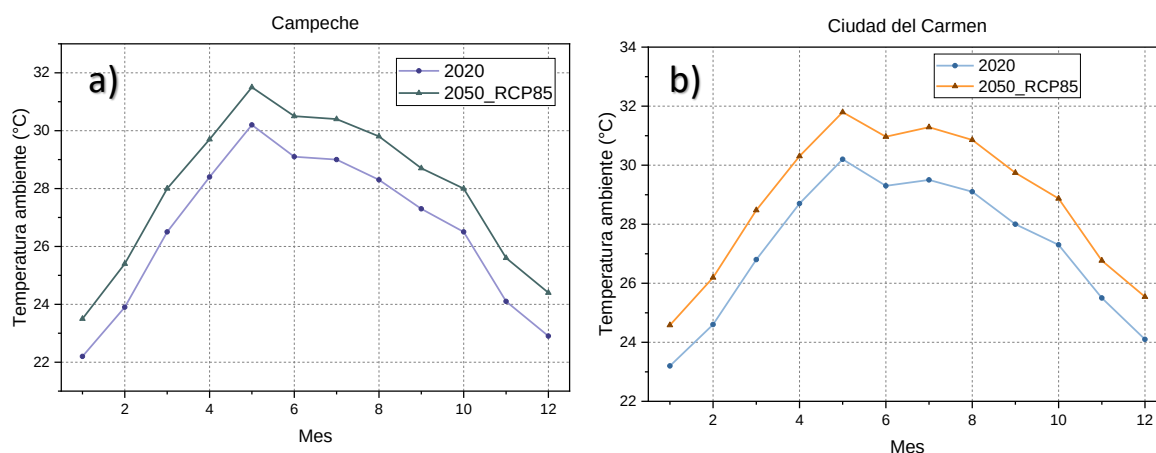


Fig. 4. Comportamiento de la temperatura ambiente respecto al escenario actual (2020) y el año 2050 con el escenario de cambio climático RCP 8.5: a) Campeche; b) Ciudad del Carmen.

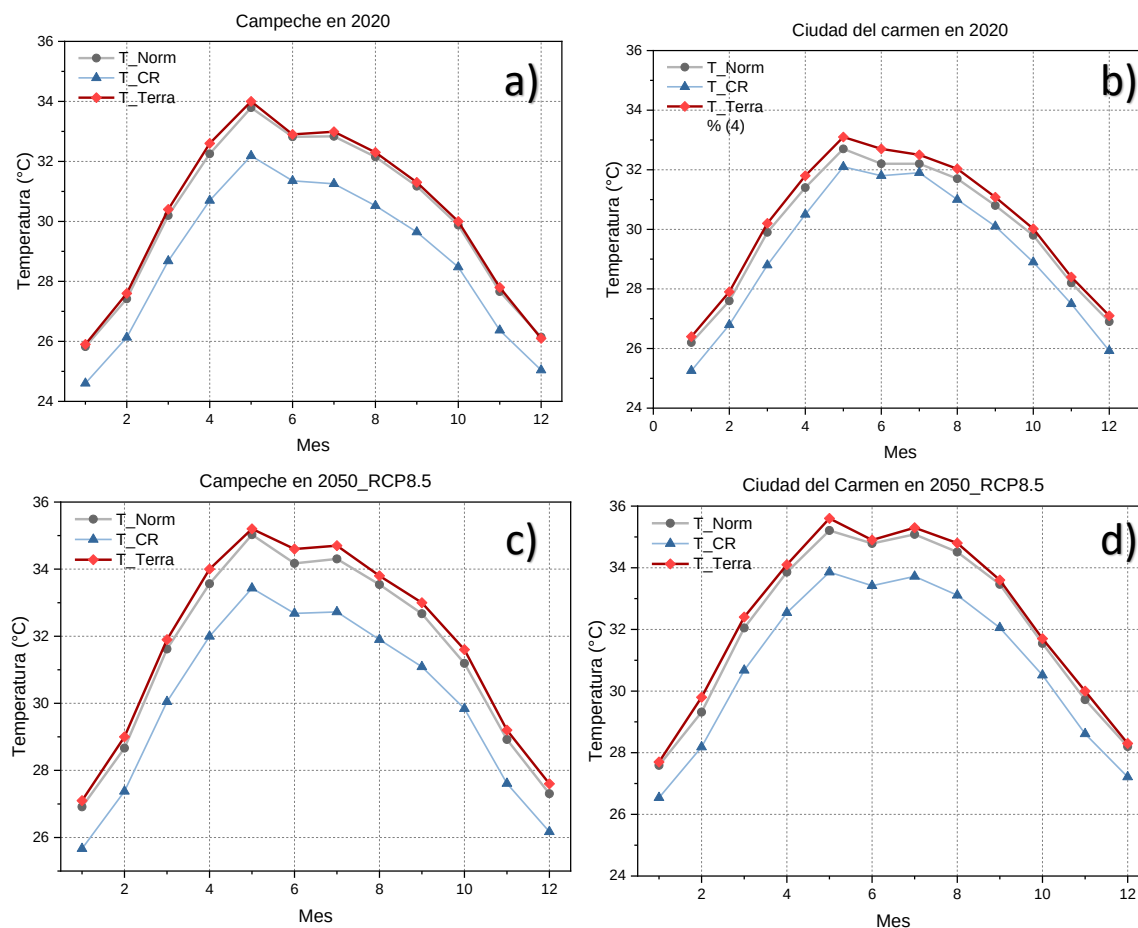


Fig. 5. Contraste de la temperatura interna al implementar los recubrimientos de pinturas reflectivas en las tonalidades blanca y terracota durante el año 2020 y 2050 con el escenario de cambio climático RCP 8.5 a) Campeche; b) Ciudad del Carmen; c) Campeche en 2050 RCP 8.5; d) Ciudad del Carmen en 2050 RCP 8.5.

En la Figura 5 se aprecia el comportamiento de la temperatura interna implementando las técnicas de sistemas pasivos considerando el escenario actual y la perspectiva de las variables meteorológicas para el año 2050 con el escenario RCP 8.5. En la Figura 5a. se deja en evidencia el comportamiento de la temperatura al interior de la vivienda en la ciudad de Campeche considerando las diversas tipologías del techo. Lo primero a remarcar es que las temperaturas al interior únicamente se encuentran por debajo de los 28 °C durante 4 meses al año. Durante los meses de abril a octubre la temperatura al interior es superior a los 30 °C, siendo el mes de mayo el más drástico con una temperatura promedio en el interior de la

vivienda de 34 °C. Respecto a las técnicas pasivas es interesante analizar la fenomenología al utilizar una cubierta del techo con tonalidad terracota. Se observa en la Figura 5, que al implementar dicha tonalidad la temperatura al interior es mayor 0.5 °C respecto a tener el techo sin modificar con la tonalidad gris del concreto. Esto es importante debido a que dichas temperaturas son promedios mensuales, por lo cual al analizar la fenomenología de manera diaria se exhibiría que el gradiente térmico es superior. En contraste, al emplear el techo con recubrimiento blanco conocido como Cool Roof los datos exhiben una mejora considerable en la sensación térmica, disminuyendo hasta 2 °C la

temperatura de manera mensual, lo que equivale a mejores comportamientos de manera diaria. La Figura 5c ofrece la perspectiva del comportamiento de la temperatura al interior de la vivienda en Campeche para el año 2050 con el RCP 8.5. Se exhibe un patrón semejante en el comportamiento térmico al emplear los sistemas pasivos, con el Cool Roof decreciendo la temperatura al interior, mientras que la tonalidad terracota incrementa la sensación respecto al caso base. Sin embargo, es importante recalcar que bajo el RCP 8.5 la vivienda sin modificaciones superará los 34 °C en los meses de verano, superando en 2 °C al comportamiento actual (Figura 5a). Esto es importante de recalcar debido a que la fenomenología de los sistemas reflectivos resultará en el gasto energético al igual que posibles afectaciones a la salud por las temperaturas en el interior del recinto. En Ciudad del Carmen, observando el comportamiento de la temperatura interna, se tiene que el recubrimiento terracota aumenta la temperatura en el interior de la vivienda respecto a no tener ningún recubrimiento en el techo (Tonalidad gris) poco más de 0.5 °C. Lo interesante de la Figura 5b, es el contraste respecto a la ciudad de Campeche (Figura 5a) debido a que en ciudad del Carmen no se alcanza la temperatura de 34 °C demostrando una variabilidad climática importante. Así mismo, es notorio que el Cool Roof sigue siendo la mejor técnica pasiva para evitar el aumento de temperatura al interior, sin embargo, no tiene una disminución en la temperatura tan significativa respecto a los escenarios descritos previamente. La perspectiva del comportamiento de la temperatura en la vivienda en el año 2050 se observa en la Figura 5d permitiendo visualizar un aumento superior en 2 °C respecto al año 2020.

En la Figura 6 se cuantifica el consumo energético requerido al tener las temperaturas descritas previamente al momento de emplear equipos de refrigeración con una temperatura objetivo de 26 °C. La vivienda sin modificaciones requiere un consumo promedio de 244 kWh/m² para enfriar el recinto en Campeche; mientras que en Ciudad del Carmen, el consumo es de 250 kWh/m². Es importante recalcar que el consumo esta relacionado directamente con la temperatura objetivo, por lo cual, disminuir la temperatura de consigna incrementará la energía eléctrica requerida en el enfriamiento de espacios. En la Figura 6 también se observa que el aumento de 0.5 °C hasta 1 °C en la temperatura interna al usar la pintura terracota como recubrimiento del techo incrementa el consumo energético en 13 kWh/m² con las condiciones climáticas actuales. Este consumo puede parecer mínimo, sin embargo, al considerar el tiempo de operación del equipo y el espacio a enfriar, resulta en una afectación importante en la economía de los usuarios. Contrario a la fenomenología anterior, al utilizar el Cool Roof se decrece el consumo energético más del 25 %, derivando en requerimientos de 169 y 183 kWh/m² para las ciudades de Campeche y Ciudad del Carmen respectivamente. Esto es importante de recalcar debido a que la disminución en 2 °C de la temperatura interna mejora significativamente los requerimientos energéticos en climatización. Estudiando la perspectiva en energía requerida para la climatización de espacios en el año 2050 – RCP 8.5, la Figura 6, establece que el consumo energético incrementará más de un 20 % respecto al escenario actual. Con estas condiciones se requerirá cerca de 300 kWh/m² para disminuir la temperatura a 26 °C al interior de la vivienda. Esto es relevante debido a que los usuarios no utilizan el equipo de climatización con el termostato a dicha

temperatura, sino que, colocan valores inferiores por lo cual la perspectiva de consumo es significativa. En ambas ciudades de estudio implementando el Cool Roof se presenta un ahorro cercano al 25 % respecto a tener el techo con la tonalidad gris (sin modificar) y del 28 % respecto a

tener el techo con recubrimiento color terracota. Dichos consumos son interesantes debido a que en la Figura 6 se aprecia que utilizando el Cool Roof en el año 2050 en ambas ciudades se estaría teniendo un consumo similar al escenario actual de tener la vivienda sin modificaciones.

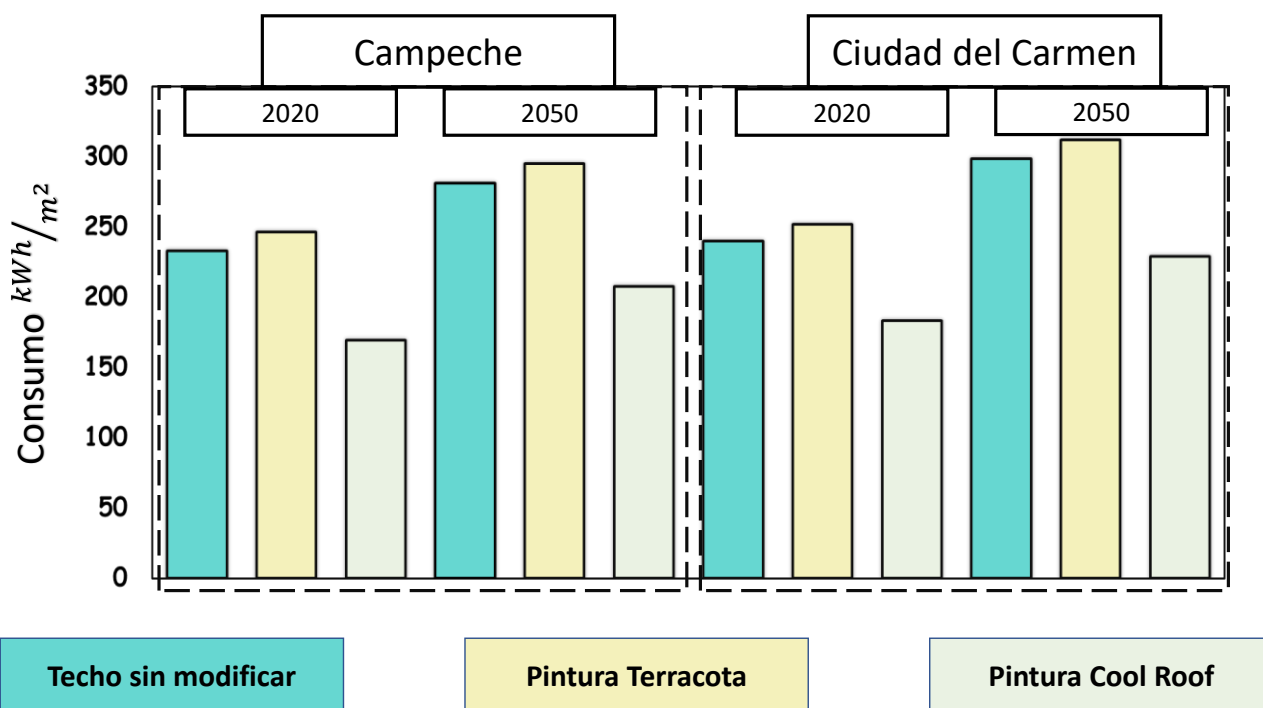


Fig. 6. Contraste de consumo energético bajo las diversas tipologías de techo considerando el comportamiento actual y escenario futuro con cambio climático: a) Campeche; b) Ciudad del Carmen.

Conclusiones

En este trabajo se analizó el comportamiento térmico y energético de la vivienda de interés social en las ciudades de Campeche y Ciudad del Carmen para el año 2020 y el año 2050 considerando el escenario RCP 8.5 al emplear pinturas reflejantes de diferente tonalidad como sistema pasivo. La tendencia en consumo energético consideró una temperatura objetivo de 26 °C en el uso de equipos de

refrigeración que fomenta la eficiencia energética y choque térmico.

Bajo las condiciones ambientales de las ciudades de estudio, las simulaciones revelan que la vivienda de interés social con la tipología constructiva actual supera los 30 °C en el interior. Los recubrimientos reflectivos son una técnica con impacto directo en la variación de temperatura al interior de la edificación bajo las condiciones climáticas de la región. Sin embargo, la tonalidad tiene un rol

significativo en el comportamiento de la temperatura; ejemplificando, el uso de un recubrimiento con tonalidad terracota incrementa entre 0.5 °C hasta 1 °C la temperatura al interior respecto a tener la vivienda sin modificaciones en el techo. El uso de recubrimientos claros es la opción optima, los resultados reflejan un decrecimiento de hasta 2 °C en la temperatura al emplear el Cool Roof. Desde una perspectiva energética el Cool Roof decrece entre un 25 % - 28 % el consumo energético destinado a la climatización de espacios ($T_T=26$ °C) respecto a la vivienda sin modificaciones la cual requiere 240 kWh/m². En el año 2050 bajo el escenario de emisiones más crítico, el consumo

energético incrementará más del 15 % para lograr un comportamiento similar a la actualidad, mientras que, al emplear pinturas tonalidad terracota la perspectiva de energía incrementa un 18 %.

Los resultados de este trabajo contribuyen a la generación de información del panorama térmico y energético en las viviendas de interés social y su perspectiva a futuro considerando el cambio climático. Por otro lado, la metodología presentada mediante los ajustes pertinentes se puede implementar en diversas regiones del sureste o diversas zonas del país en la evaluación de técnicas pasivas.

Bibliografía

- Al-Obaidi, K. M., Ismail, M., & Abdul Rahman, A. M. (2014). Passive cooling techniques through reflective and radiative roofs in tropical houses in Southeast Asia: A literature review. *Frontiers of Architectural Research*, 3(3), 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.foar.2014.06.002>
- ANSI/ASHRAE. (2017). ANSI/ASHRAE Standard 55-2017 : Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. In *ASHRAE Inc.*
- CONUEE. (2020). Cuadernos de la Conuee número 5. Eficiencia energética en el confort térmico en viviendas de clima cálido en México. *Cuadernos de La Conuee*, 5. <https://www.conuee.gob.mx/transparencia/boletines/Cuadernos/cuaderno5nvociclo.pdf>
- Grajeda-Rosado, R. M., Levet-Nofrietta, A., Mondragón-Olan, M., & Velázquez-Sanabia, C. (2023). La importancia de la isla de calor urbano como un indicador más a tomar en cuenta en los procesos de planeación urbana en las ciudades de México. *E-RUA*, 15(03), 42–53. <https://doi.org/10.25009/e-rua.v15i03.192>
- Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I., & Simá, E. (2018). Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings. *Energy and Buildings*, 158, 569–579. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.085>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2014). *Climate Change 2013. The Physical Science Basis* (Cambridge University Press (ed.)).

- Jiménez 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. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.012>
- Littlewood, J., Howlett, R., Capozzoli, A., & Jain, L. (2020). Sustainability in Energy and Buildings. In J. Littlewood, R. J. Howlett, A. Capozzoli, & L. C. Jain (Eds.), *Smart Innovation, Systems and Technologies* (Vol. 163). Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-32-9868-2>
- May Tzuc, O., Livas-García, A., Jiménez Torres, M., Cruz May, E., López-Manrique, L. M., & Bassam, A. (2020). Artificial Intelligence Techniques for Modeling Indoor Building Temperature under Tropical Climate Using Outdoor Environmental Monitoring. *Journal of Energy Engineering*, 146(2). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EY.1943-7897.0000649](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000649)
- Mexico, D. (2022). *Campeche: Economía, empleo, equidad, calidad de vida, educación, salud y seguridad pública | Data México*. <https://datamexico.org/es/profile/geo/campeche-cm>
- Nahar, N. M., Sharma, P., Purohit, M. M., Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J., Simá, E., Aflaki, A., Mahyuddin, N., Al-Cheikh Mahmoud, Z., Baharum, M. R., Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K. M., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I., Emmanuel, R. (2014). Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings*, 5(3), 283–297. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.07.009>
- Remund, J., Muller, S., Kunz, S., Huguenin-Landl, B., Studere, C., Cattin, R. (2017). *Global Meteorological Database Version 7 Software and Data for Engineers, Planners and Education*. 51.
- SEDATU, & CONAVI. (2017). Código de Edificación de Vivienda. *Conavi*, 3ra, 1–586.
- SEMARNAT. (2022). *Viviendas Particulares habitadas por municipio*. http://dgeiawf.semarnat.gob.mx:8080/ibi_apps/WFServlet?IBIF_ex=D1_EMPVIV02_14&IBIC_user=dgeia_mce&IBIC_pass=dgeia_mce&NOMBREENTIDAD=*
- SENER, S. de E. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011*. 47.
- Sorensen, B. (2013). *A History of energy: Northern Europe from the Stone Age to the present day*.
- Statista. (2022). *Número de viviendas en México, por estado 2020 | Statista*.

<https://es.statista.com/estadisticas/1123140/numero-viviendas-mexico-por-estado/>

Vázquez-Torres, C. E., Bienvenido-Huertas, D., Beizaee, A., Bassam, A., & Torres, M. J. (2023). Thermal performance of historic buildings in Mexico: An analysis of passive systems under the influence of climate change. *Energy for Sustainable Development*, 72, 100–113. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.002>