Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 124 -139
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.10

Recibido 04/09/2025
Aceptado 15/12/2025

ANÁLISIS DEL MARCO NORMATIVO Y CONSTRUCTIVO DE TECHOS EN VIVIENDAS DE SAN FRANCISCO DE CAMPECHE: IMPLICACIONES EN EL DESEMPEÑO TÉRMICO, ENERGÉTICO Y AMBIENTAL

ASSESSMENT OF THE REGULATORY AND CONSTRUCTION FRAMEWORK FOR ROOFS IN HOUSES IN SAN FRANCISCO DE CAMPECHE: IMPLICATIONS FOR THERMAL, ENERGY, AND ENVIRONMENTAL PERFORMANCE

ANÁLISE DO QUADRO NORMATIVO E CONSTRUTIVO DOS TELHADOS EM HABITAÇÕES DE SAN FRANCISCO DE CAMPECHE: IMPLICAÇÕES NO DESEMPENHO TÉRMICO, ENERGÉTICO E AMBIENTAL

Oscar de Jesús May-Tzuc
Doctor en Energías Renovables y Eficiencia Energética
Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
https://orcid.org/0000-0001-7681-8210
oscajmay@uacam.mx

Jordy Alvarado-Pacheco
Magíster en Energías Renovables y Eficiencia Energética
Profesor de asignatura, Academia de Energías Renovables, Instituto Tecnológico Superior Progreso, Progreso, México
https://orcid.org/0000-0001-8259-1307
jordy.ap@progreso.tecnm.mx

Felipe Noh-Pat
Doctor en Ciencias en Ingeniería Mecánica
Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
https://orcid.org/0000-0003-1981-8323
felipnoh@uacam.mx

Francisco Demesa-López
Doctor en Ingeniería y Ciencias Aplicadas
Profesor-Investigador, Facultad de Ingeniería, Instituto Tecnológico de Pachuca, Pachuca de Soto, México
https://orcid.org/0000-0001-7197-6017
francisco.dl@pachuca.tecnm.mx

José Herrera
Doctor en Gobierno y Administración Pública
Profesor-Investigador, Centro de Investigaciones Jurídicas, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
https://orcid.org/0000-0001-6961-8958
jiherrer@uacam.mx

Mario Jiménez-Torres
Doctor en Ingeniería Energías Renovables
Profesor-Investigador, Centro de Investigaciones Jurídicas, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
https://orcid.org/0000-0002-8331-1888
majimene@uacam.mx

RESUMEN

Se analizó el impacto térmico, energético y ambiental de la estructura constructiva en techos de viviendas sociales en San Francisco de Campeche, ubicado en la Península de Yucatán, México. Se calibró un modelo de vivienda con mediciones de temperatura y humedad relativa durante un año, que se usó para evaluar escenarios no contemplados en las normativas nacionales. Este modelo varió la altura del techo y consideró cuatro configuraciones de cubierta basadas en tecnologías pasivas, e incluyó el recubrimiento terracota, muy arraigado en la población. Los resultados muestran que superar las alturas establecidas en los reglamentos mejora el desempeño térmico y ahorro energético. Mientras que el recubrimiento en terracota incrementa el consumo y las emisiones, los impermeabilizantes reflectivos optimizan el confort y disminuyen el impacto ambiental. Se destaca que el uso de aislantes térmicos no supera en desempeño a los recubrimientos, contrariamente a lo esperado por la normativa nacional. Se subraya la urgencia de actualizar los reglamentos para incorporar estrategias que se adapten al contexto climático regional.

Palabras clave
normativa mexicana, clima cálido-húmedo, eficiencia energética, isla de calor urbano

ABSTRACT

The thermal, energy, and environmental impacts of roof construction in social housing in San Francisco de Campeche, located on the Yucatan Peninsula, Mexico, were analyzed. A housing model was calibrated using temperature and relative humidity measurements collected over one year, which was then used to evaluate scenarios not covered by national regulations, varying ceiling height, and considering four roofing configurations based on passive technologies, including the widely used terracotta cladding. Results show that exceeding the heights established in the regulations improves thermal performance and energy savings. While the terracotta cladding increases energy consumption and emissions, reflective waterproofing optimizes comfort and reduces environmental impact. It is noted that the use of thermal insulation does not outperform the cladding, contrary to expectations set by national regulations, emphasizing the urgency of updating regulations to incorporate strategies adapted to the regional climatic context.

Keywords
mexican regulations, hot-humid climate, energy efficiency, urban heat island

RESUMO

Foi analisado o impacto térmico, energético e ambiental da estrutura construtiva em telhados de habitações sociais em San Francisco de Campeche, localizado na Península de Yucatán, México. Foi calibrado um modelo de habitação com medições de temperatura e de umidade relativa ao longo de um ano, que foi utilizado para avaliar cenários não contemplados nas normas nacionais. Este modelo variou a altura do telhado e considerou quatro configurações de cobertura baseadas em tecnologias passivas, incluindo o revestimento de terracota, muito arraigado entre a população. Os resultados mostram que superar as alturas estabelecidas nos regulamentos melhora o desempenho térmico e a economia de energia. Enquanto o revestimento em terracota aumenta o consumo e as emissões, os impermeabilizantes refletivos otimizam o conforto e reduzem o impacto ambiental. Destaca-se que o uso de isolantes térmicos não supera o desempenho dos revestimentos, o que contraria o esperado pela regulamentação nacional. Ressalta-se a urgência de atualizar os regulamentos para incorporar estratégias adaptadas ao contexto climático regional.

Palavras-chave
regulamentação mexicana, clima quente-úmido, eficiência energética, ilha de calor urbana

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 124 -139
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.10

INTRODUCCIÓN

Actualmente, más del 50% del consumo de energía en hogares de todo el mundo es destinado a satisfacer las necesidades de confort térmico de los ocupantes, influenciados directamente por las condiciones ambientales de la región. En este contexto, se prevé que el cambio climático y sus efectos sobre el entorno incrementarán en la demanda de energía de los edificios, que orilla a generar estrategias de eficiencia y adaptación ante estos cambios (Manzano-Agugliaro et al., 2015). Esta situación se intensifica en países con climas cálidos o tropicales, como México, donde las altas temperaturas, predominantes a lo largo del año, aumentan significativamente la demanda de energía eléctrica destinada a conseguir condiciones de bienestar térmico (Gamero-Salinas et al., 2021).

En México, la regulación sobre envolventes térmicas presta especial atención a los techos, dado que las cubiertas planas de mampostería predominan en el país, y en climas cálidos-húmedos, pueden aportar más del 60% de las ganancias térmicas diarias en las viviendas. Destacan la NMX-C-460-ONNCCE-2007 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2009), que establece los requisitos de resistencia térmica en techos de edificios según el tipo de clima; la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011), que presenta criterios constructivos para el diseño de la envolvente y sistemas de climatización; y el Código de Edificación (Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU], & Comisión Nacional de Vivienda [CONAVI], 2017), que determina la altura mínima de las viviendas. No obstante, en la práctica su implementación resulta compleja dado que los códigos de construcción locales poseen mayor relevancia sobre la normativa nacional. Aun así, diversos autores han evaluado su impacto desde distintos enfoques en diferentes regiones climáticas del país. Castro-Bello et-al. (2024), revisaron las estrategias e incentivos nacionales para el sector residencial, que identifica que desde su entrada en vigor ha reducido gradualmente el consumo de energía en viviendas. Galindo-Borbón et al. (2024), analizaron el impacto de la NOM-020-ENER-2011para el norte del país (clima cálido-seco), se obtuvo que al aplicar la estrategia de orientación y envolvente se reduce el consumo energético hasta un 26% y las emisiones de CO_2 en más del 15%. Vázquez-Torres et al. (2022) identificó que el cumplimiento de la NMX-C-460-ONNCCE-2007 en condiciones de clima templado del centro del país, aporta significativamente al ahorro energético y confort térmico. De igual forma estas normas han sido empleadas para evaluar la viabilidad de nuevas propuestas y materiales para viviendas de interés social (Guillén Guillén & Muciño Vélez, 2020; Ruiz Torres, 2019). Sin embargo, estudios como el de Martin-Dominguez (2018) resaltan que las normativas se centran sólo en la propiedades termo-físicas al dejar de lado los fenómenos ópticos que se desarrollan en la envolvente por efecto de cobertura, mismos que podrían contribuir aún más que emplear simplemente aislantes térmicos. Lo anterior son de carácter vital para regiones de clima cálido-húmedo predominantes en el sur del país tal como ha sido demostrado por Vargas (2021).

En este contexto, San Francisco de Campeche resulta un caso relevante por su crecimiento y distribución poblacional. Los hogares se caracterizan por la autoconstrucción y los programas de vivienda de organismos nacionales, lo que deriva en el uso de materiales térmicamente ineficientes. Más del 45 % de las viviendas presentan rezago habitacional, asociado tanto a la calidad de los materiales como al hacinamiento. (Comisión Nacional de Vivienda [CONVI], 2022). Además, la población de San Francisco de Campeche creció más del 25 %, al impulsar una urbanización no planificada que ha transformado zonas verdes en complejos habitacionales. (Canul-Turriza et al., 2024). Esto ha originado que la temperatura en la región aumente más de 6 °C, incrementándose la demanda energética en los hogares. Esto hace imperativo analizar estrategias que promuevan el confort térmico y la eficiencia energética en las viviendas, que mejoran así la calidad de vida de la población.

En este contexto, el presente estudio propone analizar la cubierta de la vivienda al implementar estrategias pasivas, con dos objetivos principales: (i) determinar la pertinencia técnica de la norma NMX-X-460-ONNCCE-2009 (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, 2009) frente a las condiciones constructivas y climáticas locales, en particular respecto a la altura de las edificaciones; (ii) evaluar, desde una perspectiva térmica y energética, los materiales aislantes establecidos por la NOM-020-ENER-2011 (Secretaría de Energía, 2011), considera que ésta no contempla el uso de recubrimientos reflectivos en techos. En la primera fase se recabó información de la estructura constructiva y materiales que compone una vivienda de interés social típica de la región, así como el montaje de sensores para registro de la humedad y temperatura interna durante un año en conjunto, con datos meteorológicos de la ciudad. Esta información fue utilizada para calibrar un modelo energético de la vivienda, y comparar tres modificaciones en la losa respecto al caso base, al variar la elevación de techo. Esto con el fin de contrastar estrategias pasivas de enfriamiento con los hábitos en materiales comúnmente usados por la población o normativa nacional. La segunda fase consistió en la elaboración de un modelo computacional mediante la paquetería EnergyPlus. Dicho modelo fue calibrado con los datos de la primera fase y, utilizado para evaluar y comparar el comportamiento térmico y energético del edificio frente a modificaciones en la estructura de losa, derivadas del uso de materiales aislantes y recubrimientos, así como de variaciones en la altura de la vivienda. Los resultados permitieron

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 124 -139
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.10

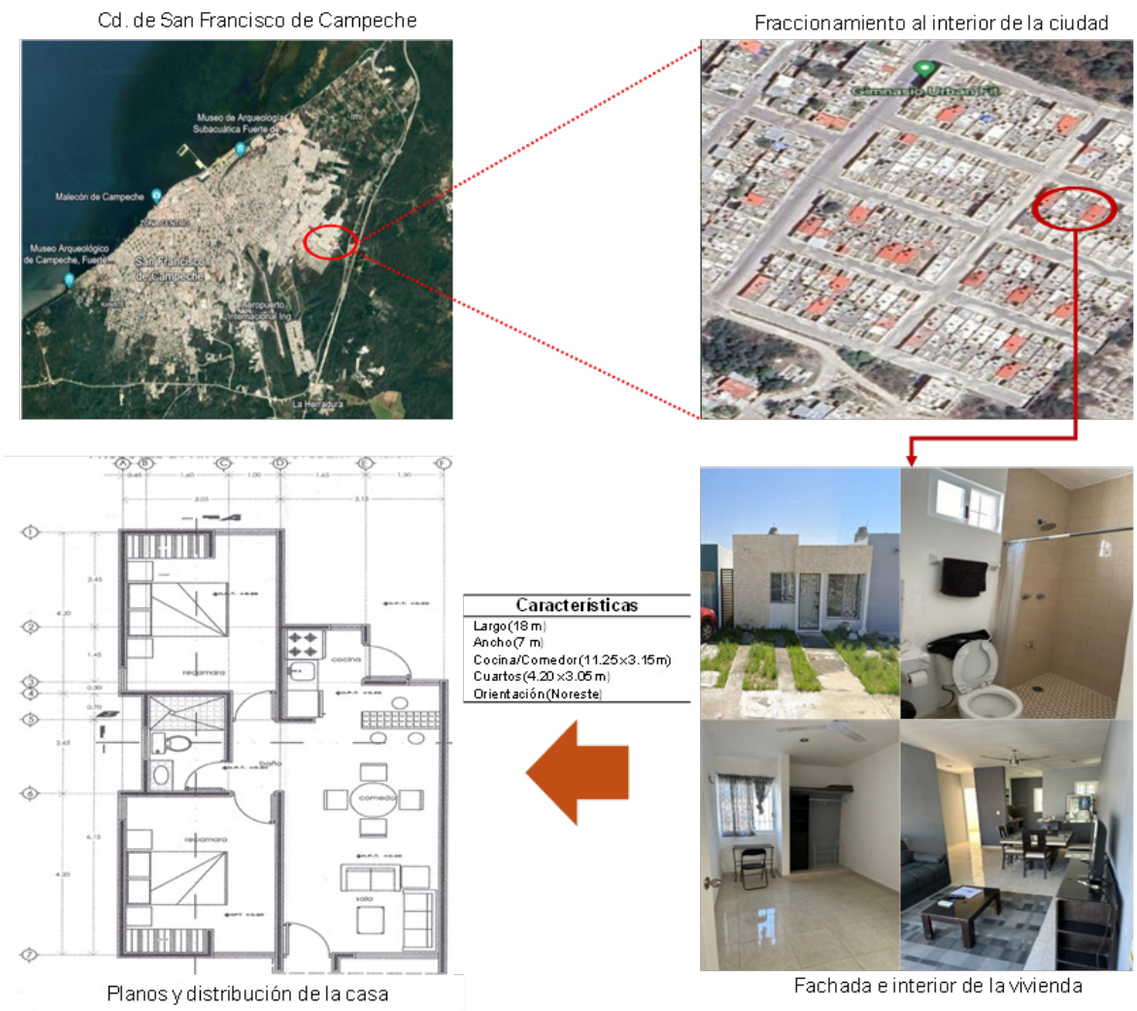

Figura 1. Vista aérea, fachadas, interiores y planos de vivienda del caso de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

identificar el impacto de las modificaciones en la losa de techo sobre el desempeño térmico, energético y ambiental de la vivienda. En particular, se determinaron las horas de confort, la demanda de refrigeración y el consumo eléctrico asociado a los equipos de aire acondicionado (A/C). Asimismo, se evaluó el impacto ambiental a escala de complejo residencial en términos de emisiones de CO_2 equivalente y su influencia en la formación de Islas de Calor Urbano (UCI).

METODOLOGÍA

DESCRIPCION DE LA LOCACION Y VIVIENDA BAJO ESTUDIO

El estudio se enfoca en la envolvente superior de un modelo vivienda de interés social ubicado en San Francisco de Campeche (19°50'N, 90°28'E), ciudad costera y capital del estado mexicano de Campeche. La ciudad presenta un clima cálido-húmedo con temperatura promedio anual de 30°C (con máximos que superan los 40 °C en verano) y una humedad relativa por encima del 75% la mayor parte del año. La precipitación anual varía entre 1,200 y 2,000mm (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 2024). Bajo este contexto, se analizó una casa en un fraccionamiento de reciente creación conformado por 120 viviendas, edificado a las periferias de la ciudad (Figura 1). Fue seleccionada por no presentar modificaciones estructurales posteriores.

La casa consta de una superficie construida de 64 m^2, una altura de 2.60 m, con la fachada orientada hacia el sur. Esta conformada por dos habitaciones, sala, comedor, cocina y un baño completo. Cuenta con muros de 17.0 cm de grosor, hechos a partir de bloques de concreto de 15 cm x 20 cm x 40 cm, con revestimiento exterior de mortero de 1.0 cm y una capa de yeso interior. El techo, de exterior a interior, se compone de una capa de calcreto colado de 5.0 cm, vigueta-bovedilla de 16.0 cm, una capa de 2.5 cm de espuma de poliuretano expandido (EPS) y un recubrimiento final de yeso. El listado de las propiedades físicas de los materiales se exhibe en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades térmicas de materiales de la envolvente en la vivienda de interés social. Fuente: datos obtenidos de (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 1979).

Envolvente		Especificaciones			
Elemento de la envolvente	Material	Espesor (m)	Conductividad (W/m K)	Calor específico (J/kg K)	Densidad (kg/m^3)
Muros	Revoco	0.015	0.720	840.00	185.00
	Block de 20 cm	0.200	0.490	880.00	512.00
	Yeso	0.015	0.380	1090.00	1120.00
Techo	Calcreto	0.050	1.740	920.00	2300.00
	Vigueta-bovedilla	0.160	1.580	1000.00	600.00
	Aislante EPS	0.068	0.035	1400.00	25.00
	Yeso	0.015	0.380	1090.00	1120.00

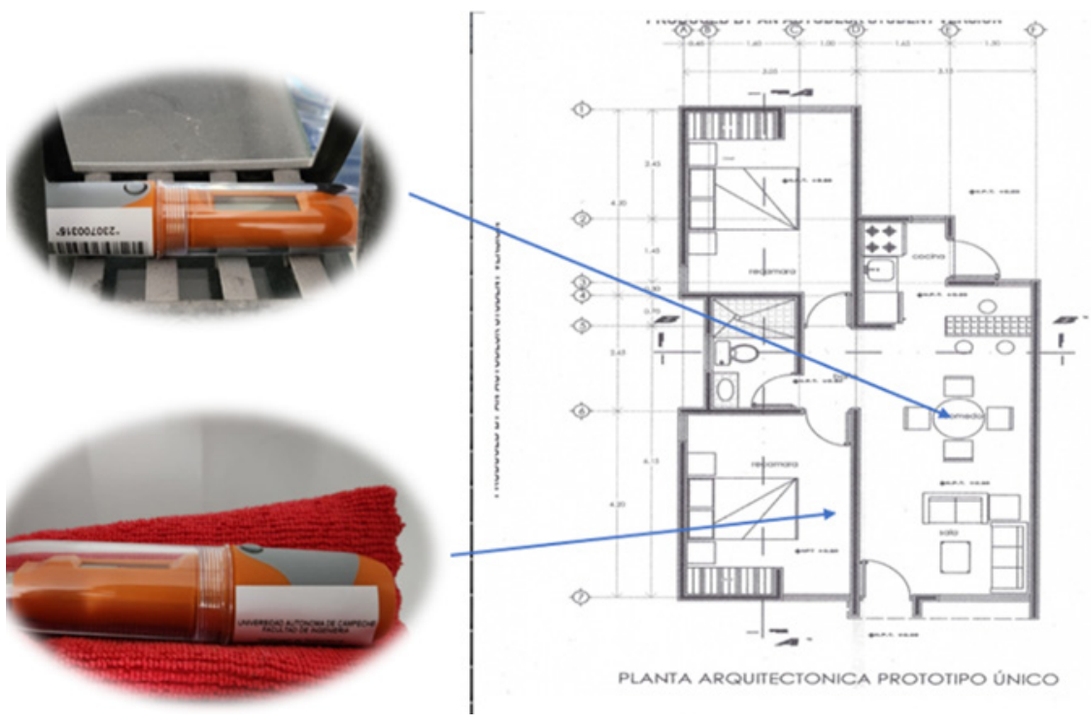

Figura 2. Ubicación de los Datalogger dentro de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

CALIBRACIÓN DEL MODELO DE VIVIENDA

Se recopilaron datos experimentales de temperatura y humedad relativa al interior de la vivienda, empleándose Dataloggers modelo RC-51H, caracterizados por presentar una exactitud: ±0.5 °C y ±3% HR; rango de operación de -20 °C a 40 °C y 10 % HR a 90 % HR (Haupt et al., 2025). Los Dataloggers se instalaron en la sala-comedor y en la habitación principal (Figura 2), dado que estos espacios concentran la mayor parte del tiempo la ocupación de los usuarios. Los dispositivos de medición se programaron para recabar la información en intervalos de 60 minutos durante un periodo de 14 meses, comprendido entre el 25 de julio de 2023 y el 30 de septiembre de 2024. Dicho periodo fue seleccionado junto con los ocupantes de la vivienda en función de las facilidades logísticas para la instalación, verificación y revisión continua de operación de los equipos. En cuanto a las variables ambientales que influyen en el comportamiento térmico de la vivienda (humedad relativa, temperatura, irradiancia, presión atmosférica, y velocidad y dirección del viento), se emplearon datos climatológicos generados mediante el software METEONORM 8, correspondientes a las coordenadas de San Francisco de Campeche para los años 2023 y 2024. La selección de este conjunto de datos se realizó en concordancia con el periodo de muestreo experimental, el cual abarcó ambos años. Con esta información se generó un archivo climático representativo del periodo de medición interior, utilizado para calibrar el modelo computacional. Posteriormente, se realizaron

los análisis térmicos y energéticos al considerar el fichero climático del año 2024. Finalmente, el perfil operativo de los equipos energéticos, así como el uso de los sistemas de ventilación natural y mecánica, se determinó mediante una encuesta aplicada al propietario. Toda la información fue vaciada en el software DesignBuilder para construir el modelo de la vivienda.

El modelo computacional se validó, a través de indicadores estadísticos propuestos por el estándar ASHRAE en materia de modelos computacionales en edificaciones, contemplando el *Mean Bias Error (MBE)* (Ecuación 1) y *Coefficient of Variation of the Root Mean Square Error (CV RMSE)* (Ecuación 2) comparando los datos recabados experimentalmente respecto a los datos simulados (Corrado & Fabrizio, 2019; Cui et al., 2022):

$$MBE = \frac{\Sigma_{i-1}^{N_P}(m_i - s_i)}{\Sigma_{i-1}^{N_P}(m_i)} \quad \text{(Ecuación 1)}$$

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\Sigma_{i-1}^{N_P}(m_i - s_i)^2/Np}}{\Sigma_{i-1}^{n_P} m_i/Np} \quad \text{(Ecuación 2)}$$

Donde m_i y s_i representan los datos medidos y simulados, respectivamente; y Np es el número de mediciones analizadas. El rango aceptable de MBE para datos horarios es de hasta 10% y para CV(RMSE) es del 30%. La Tabla 2 muestra los resultados de la calibración, donde temperatura y humedad relativa se mantienen dentro de límites aceptables, que validan la representación térmica de la vivienda.

Tabla 2. Parámetros de validación de la vivienda según indicadores estadísticos de calibración. Fuente: Elaboración de los Autores.

Parámetro	MBE(%)	CV(RMSE)(%)
Temperatura ambiente	0.10	4.31
Humedad relativa	7.60	11.92

PROPUESTA DE MODIFICACION DE LA ENVOLVENTE SUPERIOR

Se analizó la variación de la altura del techo entre 2.60 y 3.40 m, en intervalos de 10 cm, para evaluar el impacto térmico. De forma paralela se definieron cuatro escenarios constructivos de cubierta, centrados en el análisis de las tecnologías de recubrimiento reflectivo de mayor uso en la región sureste de México. Los escenarios simulados fueron Caso A: estructura convencional de techo de la vivienda (denominada como caso base) conformada de exterior a interior de una capa de calcreto, vigueta y bovedilla, EPS y yeso; Caso B: conformado de exterior a interior de una

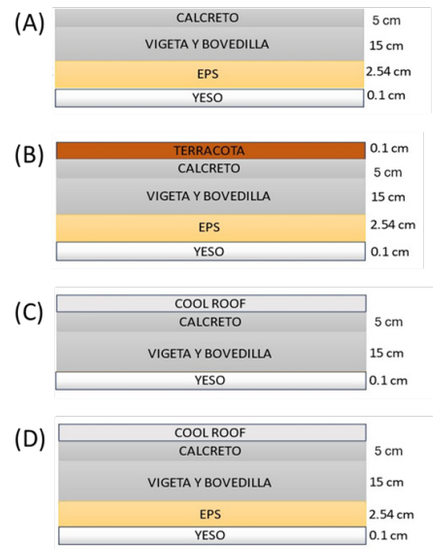

Figura 3. Escenarios constructivos de techos para evaluación térmica: Caso A (base), Caso B (terracota), Caso C (cool-roof sin EPS) y Caso D (cool-roof convencional). Fuente: Elaborado por los autores.

capa de recubrimiento terracota, calcreto, vigueta y bovedilla, EPS y yeso (Caso A, colocar un recubrimiento terracota en exterior); Caso B: conformado de exterior a interior de una capa de pintura reflectiva blanca (cool-roof), calcreto, vigueta y bovedilla y yeso (se elimina el aislante térmico EPS); y Caso D: conformado de exterior a interior de una capa de recubrimiento cool-roof, calcreto, vigueta y bovedilla, EPS y yeso (Caso A, se coloca un recubrimiento reflectivo blanco). La Figura 3 muestra los sistemas constructivos considerados y la Tabla 3 presenta las propiedades ópticas de los materiales utilizados. En particular, el recubrimiento reflectivo blanco (cool-roof) analizado corresponde a un producto comercial ampliamente distribuido en México, con disponibilidad en todos los municipios del país, lo que facilita su acceso y reproducibilidad en otros estudios o proyectos constructivos. Este recubrimiento cuenta con certificación ENERGY STAR, la que avala su desempeño reflectivo y su durabilidad. De acuerdo con la ficha técnica del proveedor, su vida útil estimada es de hasta 5 años, uno de los valores más altos reportados para recubrimientos reflectivos disponibles comercialmente en el país. Respecto al recubrimiento terracota, este igualmente corresponde a un producto del mismo proveedor, el que cuenta con certificaciones

Tabla 3. Propiedades ópticas de recubrimiento empleados en el estudio. Fuente: datos obtenidos de Hernández-Pérez et al. (2014).

Envolvente	Material	Emisividad (-)	Absorbancia (-)	Reflectancia (-)
Techo	Calcreto	0.87	0.67	0.33
	Terracota	0.78	0.16	0.84
	Cool-roof	0.90	0.67	0.30

de calidad bajo la normativa mexicana vigente, que garantiza su estabilidad cromática y su desempeño como impermeabilizante (Hernández-Pérez et al., 2018).

CALCULO DE INDICADORES

Indicador térmico

Se emplearon los grados de enfriamiento hora (CDH, por sus siglas en inglés) como métrica para cuantificar la cantidad de refrigeración necesaria para mantener una temperatura objetivo (T_T) en la vivienda durante un periodo determinado. Se calculó el CDH (Ecuación 3) considerando T_T = 25 °C, siendo T_a la temperatura ambiente, z el total de horas por año, y los apóstrofes (+, h) se refieren al acumulado positivo y las horas, respectivamente (May-Tzuc et al., 2023):

$$CDH = \Sigma_{h=1}^{z} (T_a - T_T)_j^+ \quad \text{(Ecuación 3)}$$

Del mismo modo se identificó el porcentaje de horas de confort (HC) al interior de casa a partir de la Ecuación 4.

$$HC = \frac{100 \sum_i^z h_i}{8760} \times 100 \quad \text{(Ecuación 4)}$$

INDICADOR ENERGÉTICO

La energía utilizada para la refrigeración del espacio interior mediante el sistema de aire acondicionado (E_e) se calculó con base en la Ecuación 5. En dicha expresión, el COP corresponde al coeficiente de desempeño del equipo, mientras que representa la suma de todas las cargas térmicas que actúan sobre la vivienda durante el periodo de análisis. Estas cargas incluyen efectos de transferencia de calor por transmisión, ventilación, infiltración, ganancias internas, radiación solar y pérdidas de energía (Szokolay, 2014). Para el caso de estudio, se consideró un sistema de aire acondicionado de desempeño intermedio, con un COP = 2.8 y una capacidad de 12,000 BTU/h, por ser el equipo estándar instalado en los hogares del sureste de México (Jiménez Torres et al., 2024).

$$E_e = \sum_{t=1}^{z} Q_{fria}(t)\Delta t/COP \quad \text{(Ecuación 5)}$$

INDICADOR AMBIENTAL

La Ecuación 6 presenta la mitigación de emisiones de CO_2 equivalentes derivado de la electricidad consumida por unidad de a/c para alcanzar la temperatura objetivo, donde E_B representa el consumo eléctrico de la vivienda estándar, E_S el consumo simulado y FE el factor de emisión. Para el caso de México, este es reportado por la Secretaria del Medio Ambiente, empleándose en este estudio el correspondiente al 2024 (0.444 tCO_2e / MWh) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2025).

$$CO_2 = FE(E_B - E_S) \quad \text{(Ecuación 6)}$$

Por último, se calificó el efecto del a/c sobre la temperatura exterior (ΔT), al estimar el aumento promedio en calles y patios de fraccionamiento debido al calor liberado por los condensadores, basado en un balance de advección-energía, en la formación de ICU mediante la siguiente Ecuación 7 (Yamamoto et al., 2021):

$$\Delta T = \frac{N \cdot P_{elec}(1 - COP) \cdot 1000}{\rho c_p \upsilon A_{ab}} \quad \text{(Ecuación 7)}$$

En dónde P_{elec} y N representan a la potencia eléctrica consumida y el número de equipos al operar en el fraccionamiento, respectivamente. Por su parte ρ, c_p y υ corresponden a la densidad, calor especifico y velocidad del aire circundante, mientras que A_{ab} es el área efectiva de renovación de aire. Para el caso de estudio, se consideró N igual a todas las casas del fraccionamiento (120 viviendas). Con relación al volumen de control urbano este se conformó por una altura de 10m y una superficie en planta del fraccionamiento de 2,300m^2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 4 presenta los resultados del perfil de temperaturas promedio al interior de la vivienda durante un día tipo para cada mes del año y para los cuatro escenarios analizados. Se observa que el intervalo comprendido entre las 18:00 y las 06:00 horas (periodo de mayor actividad y permanencia de los ocupantes) concentra las temperaturas interiores más elevadas, independientemente del mes considerado. En este rango horario se identifica un comportamiento consistente: el Caso B, asociado al recubrimiento terracota, incrementa la temperatura interior entre 1.1 y 1.5 °C respecto al sistema constructivo convencional (Caso A). Por el contrario, la aplicación de un recubrimiento cool-roof que mantiene la configuración base (Caso D) genera una reducción máxima cercana a 0.5 °C, mientras que su incorporación elimina el aislante térmico (Caso C) disminuye la temperatura hasta en 1.1 °C. Estos resultados evidencian que el uso de recubrimientos reflectivos puede tener un impacto significativo en el confort térmico. En particular, la sustitución de un acabado terracota por un recubrimiento cool-roof puede traducirse en reducciones de temperatura de hasta 2.6 °C, lo que representa un potencial considerable de mejora en el desempeño térmico pasivo de las viviendas, especialmente durante los periodos de mayor ocupación.

Al complementar lo anterior, se analizaron los CDH que determinan la necesidad de aire acondicionado en el interior del edificio. A mayor CDH, mayor es la demanda de refrigeración. La Figura 5 muestra el comportamiento mensual durante un año para los casos analizados en la vivienda de interés social, así como un resumen visual de

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 124 -139
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.10

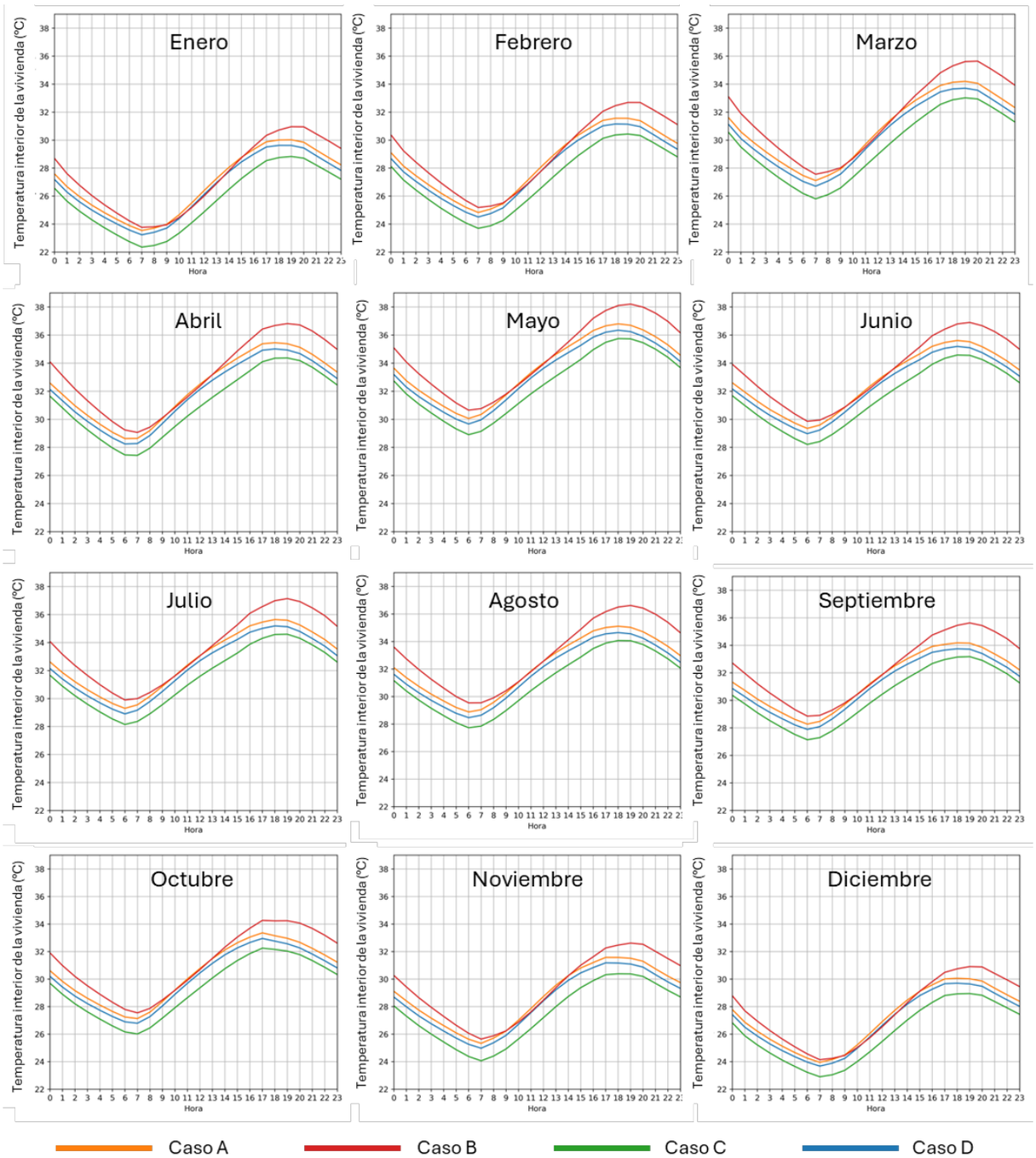

Figura 4. Perfil horario de temperatura interior por mes para los cuatro escenarios constructivos. Fuente: Elaborado por los autores.

las tendencias de los casos para cada mes. De acuerdo con esto, los meses de enero y diciembre presentan las menores demandas de refrigeración, que aumentan gradualmente hasta alcanzar el máximo en mayo. Además, las viviendas con 2.60m de altura exhiben una demanda de CDH mayor que aquellas de 3.40m, lo que contrasta con la norma de edificación (SEDATU & CONAVI, 2017), que establece 2.54m como altura mínima para asegurar condiciones de confort térmico en este tipo de clima. Esto se debe a que la mayor altura favorece la estratificación del gradiente térmico del aire, lo que no es ponderado en la construcción de viviendas populares en la ciudad. Entre las simulaciones, el techo con recubrimiento terracota registró las mayores demandas de refrigeración (rondando entre los 53,000°C/h y 55,000°C/h anuales), debido a sus propiedades ópticas: alta absorbancia y baja transmitancia en el espectro infrarrojo. En contraste, el impermeabilizante tipo *cool-roof* presentó las demandas más bajas, cercanas a 40,000°C/h anuales, producto de su tonalidad blanca y la composición de materiales que favorecen una alta reflectancia solar y reducen la absorción de calor.

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 124 -139
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.10

Figura 5. Comportamiento anual del CDH para los escenarios de altura del techo y materiales empleados: (a) Caso A; (b) Caso B; (c) Caso C; (d) Caso D. Fuente: Elaborado por los autores.

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 124 -139
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.10

Tabla 4. Porcentaje anual de horas de confort y CDH acumulados en los cuatro casos de techo analizados en viviendas de Campeche. Fuente: Elaboración de los Autores.

Altura (m)	Porcentaje anual de horas de Confort (%)					CDH anuales (°C/hora)			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D		Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
2.60	6.68	5.96	11.39	6.68		54,188	40,279	56,461	47,923
2.70	6.88	6.20	11.39	6.89		53,866	40,389	56,068	47,801
2.80	6.96	6.35	11.45	7.08		53,562	40,492	55,698	47,685
2.90	7.11	6.56	11.46	7.26		53,276	40,588	55,348	47,575
3.00	7.28	6.77	11.47	7.41		53,005	40,68	55,018	47,472
3.10	7.48	6.87	11.52	7.52		52,747	40,765	54,705	47,375
3.20	7.57	7.00	11.59	7.65		52,502	40,847	54,408	47,281
3.20	7.68	7.13	11.62	7.77		52,27	40,923	54,125	47,191
3.40	7.82	7.26	11.71	7.89		52,049	40,995	53,856	47,106
Promedio	7.27	6.68	11.51	7.35		53,052	40,662	55,076	47,49

Al analizar las diferentes tecnologías implementadas en la cubierta a 3.40m de altura (Tabla 4), se observa que la vivienda convencional presenta un CDH de 52,049 °C/h. En comparación, el uso de impermeabilizante terracota incrementa la demanda en aproximadamente 2,000 °C/h, mientras que el Caso C reduce más de 11,000 °C/h anuales. Por su parte, la aplicación de *cool-roof* en la estructura convencional logra una disminución cercana a 5,000°C/h respecto al caso base. Estos resultados evidencian el notable impacto de los recubrimientos selectivos en las viviendas de la región, al reducir de manera significativa la demanda de refrigeración incluso desde el escenario con 2.60 m de altura. Este comportamiento se presenta tanto en los casos C como D. Sin embargo, aunque el aislante EPS ayuda a reducir la temperatura interior, su efectividad es limitada bajo condiciones de alta temperatura y humedad. Esto se debe a que las pinturas reflectivas limitan la ganancia de calor por la envolvente del techo, mientras que, el aislante funciona como una barrera que impide la transferencia de calor del exterior al interior y viceversa. Por ello, el EPS retiene el calor acumulado al interior, manteniendo un mayor gradiente térmico al interior del espacio. Por ello, se evidencia que estrategias que contrarrestan la radiación solar son más efectivas que el uso exclusivo de materiales aislantes.

La Tabla 4 también resume el comportamiento anual tanto de las horas de confort como de los CDH. El modelo de vivienda convencional alcanza en promedio un 7 % de horas de confort anual. En contraste, el techo con recubrimiento terracota presenta un valor ligeramente inferior (6 %), lo que representa una reducción de 1 % en el bienestar térmico del ocupante atribuible a este material. En el caso del *cool-roof*, el confort anual supera el 11 %, equivalente a más de 1,000 horas de confort en la vivienda. Por su parte, el sistema con aislante térmico presenta resultados prácticamente iguales al Caso A, que indica que su implementación no mejora significativamente la sensación térmica de los ocupantes en la región. Esto concuerda con los comportamientos realizados en celdas de pruebas y simulación descritos en regiones de clima cálido tanto de norte y sur de México (Villar-Ramos et al., 2022) . Esto demuestra el efecto que tiene la implementación de normativas centralizadas que no consideran los contextos climáticos de un país como México.

ANÁLISIS DE CONSUMO ENERGÉTICO

La Figura 6 muestra el consumo eléctrico por a/c de los casos propuestos. Para la comparación se omitieron los meses de enero, febrero y diciembre, ya que las temperaturas se encontraban por debajo del valor objetivo (T_T=25°C), y coincidían con los hábitos operativos de los ocupantes. Al igual que en los CDH, se observa que, a mayor altura del techo, menor es la demanda energética por vivienda. De acuerdo con lo anterior, y considerándose que mayo es el mes de mayor demanda eléctrica, el caso base (2.6 m de altura) registra un consumo de 864.247 kWh, mientras que el escenario con recubrimiento terracota alcanza 891.834 kWh, con una diferencia cercana a 30 kWh. A nivel anual y en las mejores condiciones de desempeño energético (altura de 3.40m), el caso base presenta un consumo de 5,643 kWh, en tanto que el modelo con recubrimiento de terracota registra 5,822 kWh. Esto evidencia que incrementar la altura de la vivienda no genera un beneficio energético significativo cuando el techo se impermeabiliza con terracota, ya que se anulan las ventajas térmicas y energéticas asociadas al aumento de altura. En contraste, el mejor desempeño corresponde al recubrimiento *cool-roof* (Caso C), cuyo consumo anual se mantiene en un rango de 4,628.00 a 4,534 kWh para las alturas analizadas (2.60–3.40 m).

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 124 -139
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.10

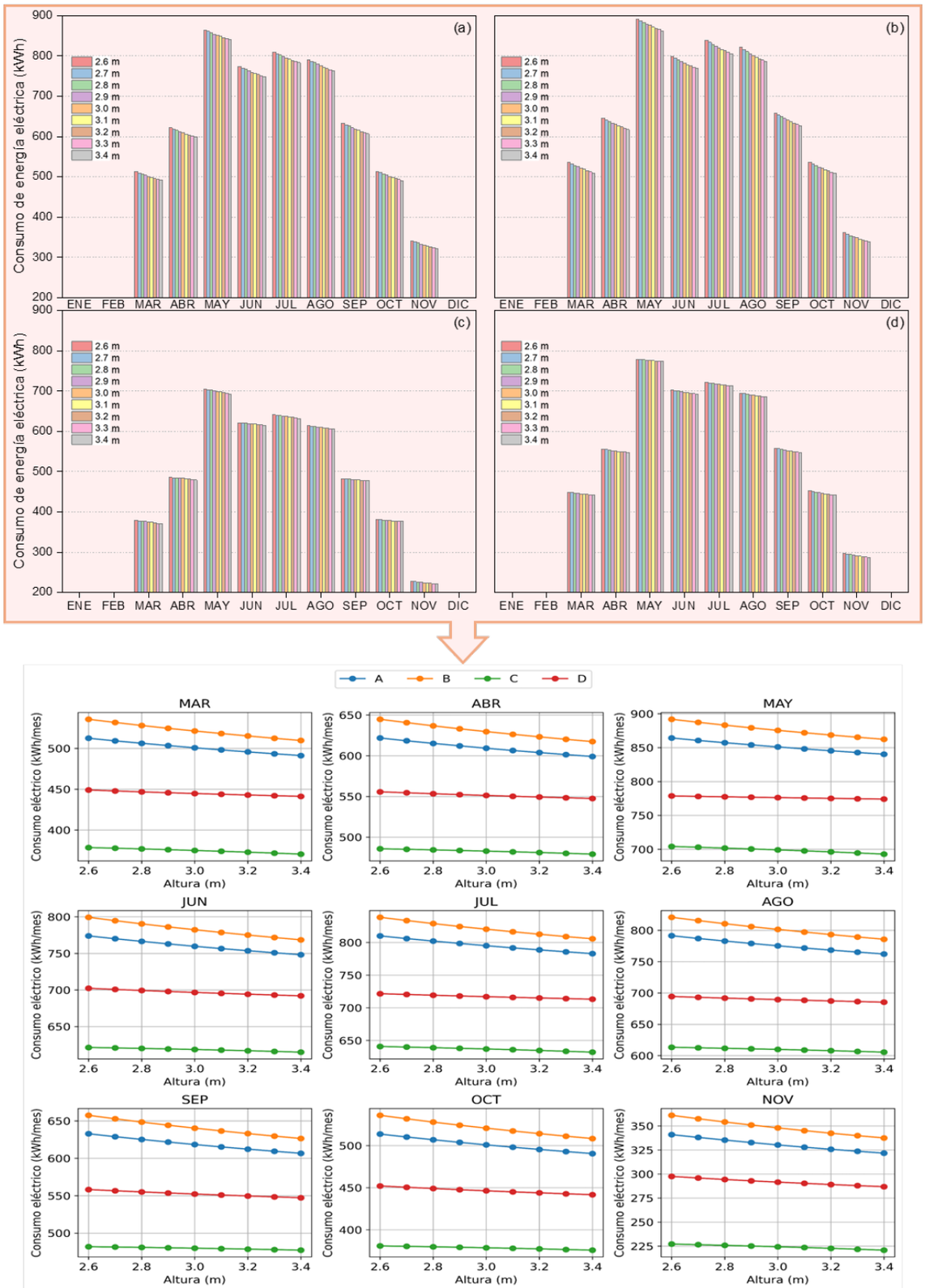

Figura 6. Consumo eléctrico anual por climatización en distintos escenarios de altura de techo y materiales de cubierta.: (a) Caso A; (b) Caso B; (c) Caso C; (d) Caso D. Fuente: Elaborado por los Autores.

Revista Hábitat Sustentable Vol. 15, N°. 2. ISSN 0719 - 0700 / Págs. 124 -139
https://doi.org/10.22320/07190700.2025.15.02.10

Tabla 5. Capacidad de mitigación de CO2 equivalente por vivienda a partir de la integración de las estrategias bioclimáticas. Fuente: Elaborado por los Autores.

Altura (m)	Mitigación de CO_2 por vivienda ($kgCO_2$)					Mitigación de CO_2 por fraccionamiento ($TonCO_2$)					Mitigación de CO_2 a 20 años por fraccionamiento ($TonCO_2$)			
	Caso A	Caso B	Caso C	Caso D		Caso A	Caso B	Caso C	Caso D		Caso A	Caso B	Caso C	Caso D
2.60	-	-97.4	577.5	283.6		-	-12	69	34		-	-234	1386	681
2.70	14.3	-80.2	580.3	288.7		2	-10	70	35		34	-192	1393	693
2.80	27.7	-64.0	583.3	293.7		3	-8	70	35		67	-153	1400	705
2.90	40.5	-48.6	586.5	298.3		5	-6	70	36		97	-117	1408	716
3.00	52.5	-34.0	589.9	302.7		6	-4	71	36		126	-82	1416	727
3.10	64.0	-20.2	593.5	307.0		8	-2	71	37		154	-49	1424	737
3.20	74.9	-7.1	597.3	311.0		9	-1	72	37		180	-17	1434	746
3.20	85.3	5.4	601.4	314.8		10	1	72	38		205	13	1443	756
3.40	95.2	17.3	605.8	318.6		11	2	73	38		228	41	1454	765

ANÁLISIS AMBIENTAL

La Tabla 5, muestra el impacto en las emisiones equivalentes de CO_2 anuales asociados a los cuatro escenarios de configuración constructiva del techo a diferentes alturas. En todos los casos es claro que el incremento de la altura contribuye a reducir las emisiones derivadas del uso de a/c. En la configuración convencional de techo (Caso A), la elevación de 80 cm permite mitigar cerca de 95 $kgCO_2$ anuales, lo que extrapolado a las 120 viviendas de un fraccionamiento típico equivale a 11 toneladas evitadas por año. El esquema constructivo de la normativa vigente muestra mejores resultados al combinarse con recubrimiento reflectivo, que alcanzan una mitigación 3.5 veces mayor que la estructura convencional. No obstante, el mejor desempeño corresponde al recubrimiento reflectivo (Caso C), su simple implementación reduce hasta 6 veces las emisiones de CO_2 respecto al mejor desempeño del Caso A. Esta ventaja se incrementa al En contraste, el recubrimiento terracota es el único con valores negativos, ya que incrementa las emisiones por la mayor demanda eléctrica para climatización. Solo al alcanzar 3.40 m de altura, el terracota logra una capacidad de mitigación comparable a la del Caso A con 2.70m. En conjunto, los hallazgos indican que el cumplimiento de la normativa actual no necesariamente asegura la mejor solución ambiental, ya que existen alternativas con un desempeño mucho más favorable. Por otra parte, el caso del recubrimiento terracota demuestra que una decisión de diseño aparentemente menor puede generar un efecto negativo considerable en las emisiones. Este contraste enfatiza la importancia de establecer criterios normativos basados en el contexto climático local, que garantizan no solo el cumplimiento mínimo, sino un impacto ambiental realmente significativo.

La Figura 7 muestra el posible impacto urbano en el incremento de la temperatura generado por la operación de a/c en un complejo residencial de 120 casas, que considera un día representativo de cada mes a una altura promedio de vivienda de 3.0 m. Los resultados evidencian que, durante los meses más cálidos, el uso simultáneo de a/c en el espacio reducido de un fraccionamiento puede incrementar la temperatura exterior en más de 1.0 °C a lo largo del día; mientras que en promedio anual este incremento se mantiene por encima de 0.3 °C (Caso A). En este escenario, la aplicación de impermeabilizantes en color terracota (Caso B) provoca un aumento adicional de aproximadamente 3.6 % anual en la temperatura exterior, que contribuyen directamente a la formación de isla de calor urbano debido únicamente a la inadecuada selección de materiales. Por el contrario, los Casos C y D muestran reducciones en el incremento de la temperatura respecto a la edificación convencional. El Caso C logra disminuir la temperatura exterior en más de 24 % durante meses como marzo, octubre y noviembre, con una reducción promedio anual cercana al 22 %. El Caso D, si bien se encuentra respaldado por la normativa nacional vigente, presenta una reducción menor, que oscila entre 8.3 % y 11.7 % anual en los meses más cálidos y frescos, respectivamente. Esto evidencia que, a pesar de su fundamentación normativa, el impacto energético-ambiental del Caso D es inferior al del Caso C, lo que plantea la necesidad de revisar y fortalecer la legislación para que esta incorpore criterios más eficientes en la mitigación de la isla de calor urbano.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran que los recubrimientos blancos, en especial los sistemas *cool-roof*, permiten ahorros energéticos superiores al 30 % respecto a la configuración

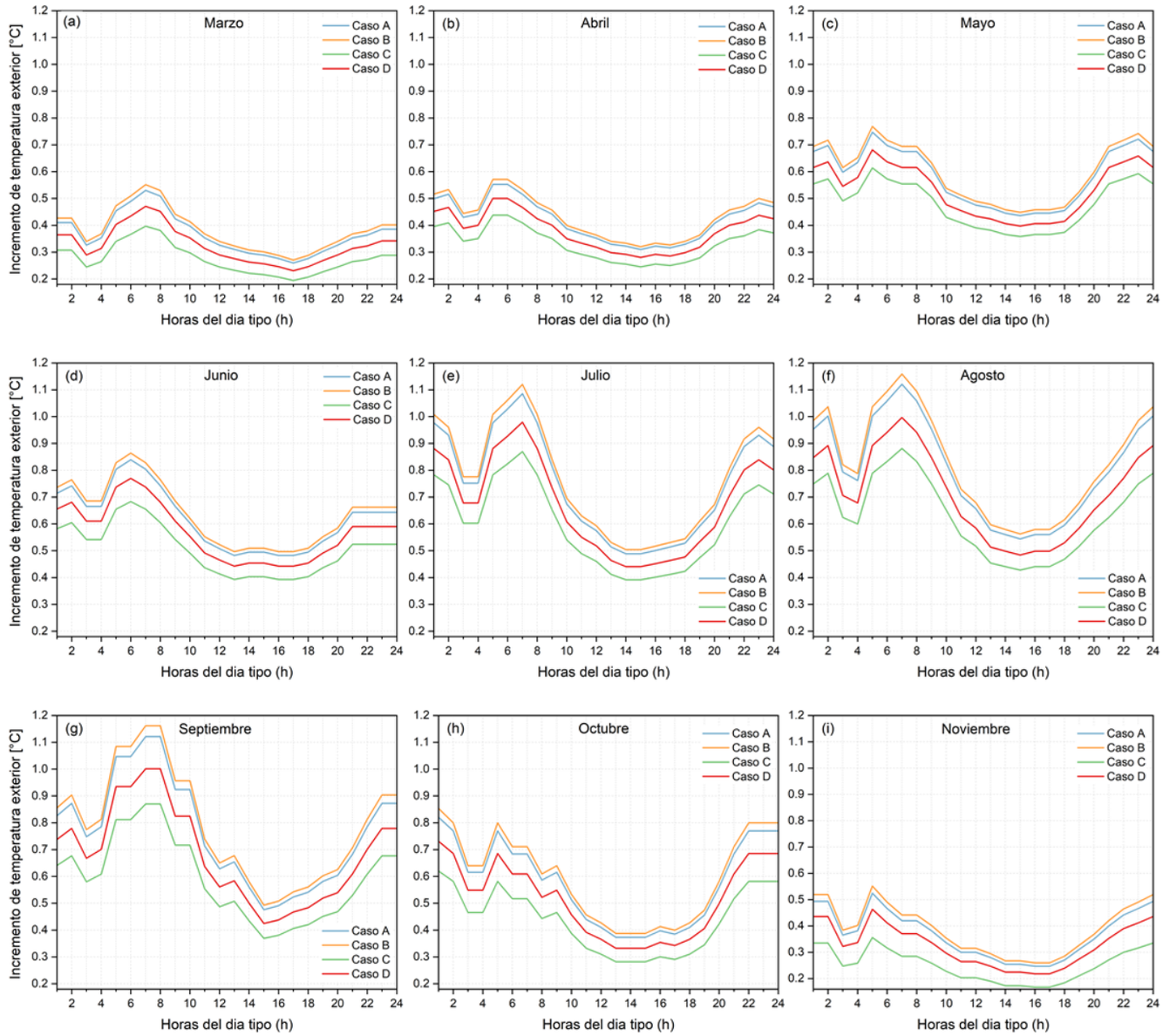

Figura 7. Efecto en incremento urbano de la temperatura exterior para un fraccionamiento de Campeche considerando un complejo de 120 viviendas. Fuente: Elaboración de los Autores.

establecida por la NOM-020-ENER-2011. Además, esta estrategia prolonga las condiciones de confort térmico bajo climas cálidos y húmedos, que confirman su eficacia. En contraste, el uso de recubrimientos en tonalidad terracota mostró una mayor demanda energética que la proyectada en edificios convencionales. Esto es especialmente relevante en contextos como el de la ciudad de Campeche, donde este material se aplica de manera masiva en edificios residenciales y públicos (Figura 8). Esta fenomenología obedece a dos factores principales: el arraigo cultural de estrategias mediterráneas, que incorporan elementos decorativos como celosías, y la obligación de usar impermeabilizantes para prevenir humedad e infiltraciones. En consecuencia, familias y organismos públicos optan por recubrimientos en tonos rojos, que buscan reducir los costos iniciales de inversión. No obstante, esta decisión deriva en un incremento de la temperatura interna del edificio, originándose mayores necesidades de refrigeración, gastos asociados al consumo eléctrico, disconfort e impactos ambientales que afectan la sustentabilidad del edificio.

Los fenómenos encontrados son de sumo interés desde una perspectiva multidimensional. Por un lado, reflejan que la normativa nacional ha comenzado a tomar un rumbo adecuado al promover el uso de materiales aislantes en la envolvente de los edificios, que contribuyen a la reducción del consumo energético y el decrecimiento de las ICU. No obstante, también evidencian que, en regiones cálidas y húmedas, los aislantes pueden

Figura 8. Estado actual de materiales utilizados en la envolvente superior de vivienda de San Francisco de Campeche. Fuente: Elaborado por los Autores.

provocar acumulación térmica al interior de la vivienda. Este fenómeno ocurre porque el aislante funciona como una barrera que restringe la transferencia de calor hacia el exterior, al prologar la permanencia de temperaturas elevadas en interiores. Por ello, es fundamental diversificar las estrategias pasivas de la normativa, adaptándolas a las condiciones climáticas y socioculturales de cada región. Las pinturas reflectivas en tonalidades claras destacan por reflejar más del 80 % de la radiación solar, que reduce la temperatura superficial del techo y las necesidades de refrigeración, además de facilitar la disipación del calor interior, refrescándose naturalmente la vivienda. Sin embargo, la regulación energética no debe centrarse únicamente en el rendimiento o retorno de inversión sino también en su viabilidad económica y social. Las estrategias pasivas promovidas por programas gubernamentales implican alta inversión inicial por la modificación de la envolvente y adquisición de materiales, así como costos de mantenimiento elevados, que varían según el clima, lo que las hace poco accesibles para la población. Por el contrario, estrategias como los recubrimientos reflectivos representan una opción hasta 60 % más económica, que contemplan la adquisición de los materiales, la implementación, el mantenimiento, volviéndose una opción con alto potencial de adopción por parte de la población. Si bien normativas como la NMX-C-460-ONNCCE-2009 que abordan aspectos térmicos del techo han mostrado efectividad en regiones céntricas de México (Vázquez-Torres et al., 2022), estudios dejan claro que tanto esta como la NOM-020-ENER-2011 no se aproximan a verdaderos escenarios de ahorro de energía y mitigación de impacto ambiental al no contemplar aspectos como el recubrimiento de materiales principalmente en la losa de vivienda (Martin-Dominguez et al., 2018). Estos fenómenos quedan validados en los resultados del presente estudio.

Esto evidencia que la legislación y normativa no solo debe promover la incorporación de tecnologías pasivas eficientes, sino también concientizar a la población sobre los materiales y estrategias constructivas óptimas, dado que muchos priorizan la estética sobre la eficiencia energética y el confort térmico. Asimismo, los resultados muestran la necesidad de replantear la normativa, que transitan de un modelo centralizado hacia regulaciones regionales o municipales, que permitan adaptar las soluciones a las condiciones climáticas, sociales y culturales locales, favoreciendo su arraigo y adopción. Esto impulsaría además el uso de materiales y técnicas constructivas locales, que mejora el desempeño energético y genera beneficios económicos y ambientales.

CONCLUSIONES

El trabajo se enfocó en analizar la aplicabilidad de la norma NMX-C-460-ONNCCE-2009 y NOM-020-ENER-2011 en viviendas de interés social localizadas en condiciones de clima cálido-húmedo del sureste de México. Asimismo, se compararon alternativas de confort pasivo frente a un material de uso habitual en la región: el recubrimiento en color terracota. Para ello, se construyó un modelo energético de una vivienda típica, calibrado con mediciones experimentales de temperatura y humedad interior registradas durante un año. Se evaluaron cuatro escenarios: (i) techo estándar, (ii) techo con recubrimiento terracota, (iii) techo sin aislante térmico con recubrimiento *cool-roof* y (iv) techo convencional con *cool-roof*. Finalmente, los casos fueron analizados en tres dimensiones: térmica, energética y ambiental.

Entre los resultados, se demostró que la aplicación de un material profundamente arraigado en la población campechana, como es la impermeabilizante terracota, produce efectos adversos en el confort de los ocupantes, incrementos en el consumo energético, aumento en las emisiones de CO_2 y una mayor contribución a las islas de calor urbano en zonas residenciales. En contraste, la integración de las normativas nacionales junto con recubrimientos reflectivos contrarresta estos efectos de manera significativa. No obstante, el escenario más favorable identificado corresponde a la omisión de materiales aislantes establecidos en la normativa y la aplicación exclusiva de recubrimientos reflectivos, lo que eleva en más del 11 % las horas de confort anuales, reduce en 21 % la demanda de refrigeración y en 20 % el consumo de energía eléctrica, además de incrementar más de seis veces la mitigación de emisiones de CO_2 equivalentes por vivienda y disminuir en 24 % el incremento de temperatura exterior asociado a la operación de los equipos de aire acondicionado. Estos resultados evidencian que, si bien las normativas actuales representan un avance, al estar diseñadas de forma centralizada y sin considerar las particularidades climáticas, desaprovechan oportunidades sustanciales de mejora. En este sentido, se vislumbra la necesidad de generar regulaciones regionales, locales e incluso municipales que impulsen la sostenibilidad, el bienestar social y una mayor pertinencia en la aplicación de estrategias constructivas. Finalmente, este trabajo da pie al desarrollo de líneas de oportunidad para investigaciones futuras, particularmente en el contexto de materiales y acabados propios de la arquitectura local, como *la* incorporación de una cámara de aire estática o ventilada para mejorar el desempeño térmico de la cubierta sin modificar significativamente la altura o volumetría de la edificación, entre otros.

El estudio pone de manifiesto la importancia de replantear el marco normativo en materia de eficiencia energética en la edificación, de manera que no se limite a lineamientos homogéneos de carácter nacional, sino que incorpore enfoques diferenciados que respondan a la diversidad climática, social y cultural del país. La inclusión de estrategias pasivas de bajo costo y fácil implementación, como los recubrimientos reflectivos, constituye una alternativa viable para mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético. Bajo esta perspectiva, se hace evidente la necesidad de transitar hacia regulaciones con mayor pertinencia regional, que impulsen tanto la aplicación de materiales y técnicas locales como la concientización de la población respecto a los beneficios de un diseño constructivo eficiente, al contribuir a la sostenibilidad energética y ambiental en el sector de la vivienda.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, O.M.T.; Curación de datos, J.J.A.P.; Análisis formal, F.N.D.L., J.I.H.; Adquisición de financiación O.M.T.; Investigación, O.M.T., J.I.H.; Metodología, F.N.D.L.; Software. J.J.A.P., F.N.P., M.A.J.T.; Supervisión, O.M.T., F.N.P., M.A.J.T.; Validación, F.N.P., M.A.J.T.; Visualización, J.I.H., M.A.J.T.; Escritura – borrador original, O.M.T., F.N.D.L., M.A.J.T.; Escritura – revisión y edición, O.M.T.

AGRADECIMIENTOS

Al Laboratorio de Habitabilidad y Diseño Urbano Sustentable por los sensores para las mediciones experimentales. El segundo y último autor reconocen el apoyo económico de la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación mediante la beca de posgrado (CVU-1050900) y posdoctorado (CVU-930301). También al respaldo del proyecto 15/UACAM/2024 y de la Red Temática 722RT0135 "Red Iberoamericana de Pobreza Energética y Bienestar Ambiental" (RIPEBA), financiada por la convocatoria de Redes Temáticas del Programa CYTED 2021.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (1979). International Journal of Refrigeration, 2(1), 56-57. https://doi.org/10.1016/0140-7007(79)90114-2

Canul-Turriza, R. A., Aké-Turriza, K., May-Tzuc, O., & Jiménez-Torres, M. (2024). Análisis espaciotemporal de islas de calor aplicado en la ciudad costera de San Francisco de Campeche, México. *Urbano, 27*(49), 08–23. https://doi.org/10.22320/07183607.2024.27.49.01

Castro-Bello, M., Gómez-Muñoz, L., Marmolejo-Vega, C. V., Morales-Morales, C., Valencia-Díaz, E. F., Maldonado-Catalán, J. F., & Marmolejo-Duarte, C. (2024). Public Policies for the Energy Efficiency of Buildings in Mexico. *Buildings, 14*(11), 3437. https://doi.org/10.3390/buildings14113437

Comisión Nacional de Vivienda [CONVI]. (2022). *Rezago Habitacional 2022. Desarrollo Territorial*, Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial

y Urbano [SEDATU]. https://siesco.conavi.gob.mx/doc/analisis/2023/Rezago_Habitacional_2022.pdf

Corrado, V., & Fabrizio, E. (2019). Chapter 5- Steady-state and dynamic codes, critical review, advantages and disadvantages, accuracy, and reliability in F. Asdrubali & H. Desideri (Eds.), *Handbook of Energy Efficiency in Buildings* (pp. 263–294). Elsevier. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812817-6.00011-5

Cui, Y., Zhu, Z., Zhao, X., Li, Z., & Qin, P. (2022). Bayesian Calibration for Office-Building Heating and Cooling Energy Prediction Model. *Buildings, 12*(7), 1052. https://doi.org/10.3390/buildings12071052

Galindo-Borbón, C., Borbón-Almada, A., Ochoa-de-la-Torre, J. M., & Marincic-Lovriha, I. (2024). Análisis costo-beneficio de estrategias para eficiencia energética en vivienda, aplicando la normatividad vigente en el Noroeste de México. *Hábitat Sustentable, 14*(2), 32–47. https://doi.org/10.22320/07190700.2024.14.02.03

Gamero-Salinas, J., Monge-Barrio, A., Kishnani, N., López-Fidalgo, J., & Sánchez-Ostiz, A. (2021). Passive cooling design strategies as adaptation measures for lowering the indoor overheating risk in tropical climates. *Energy and Buildings, 252*, 111417. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111417

Guillén Guillén, C. A., & Muciño Vélez, A. (2020). Ahorro energético en vivienda social mediante la implementación de materiales regionales. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (8), 59-80. https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i8.142

Haupt, J., Hack, J., & Backhaus, A. (2025). Targeted irrigation to improve the cooling potential of urban trees as a nature-based solution: Insights from a field trial in Hanover. *Nature-Based Solutions, 8*, 100247. https://doi.org/10.1016/j.nbsj.2025.100247

Hernández-Pérez, I., Álvarez, G., Xamán, J., Zavala-Guillén, I., Arce, J., & Simá, E. (2014). Thermal performance of reflective materials applied to exterior building components - A review. *Energy and Buildings, 80*, 81–105. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.008

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

Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (2024). *Aspectos Geográficos de Campeche. Compendio 2023*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía – México. https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/889463915973.pdf

Jiménez Torres, M., Pérez-Fargallo, A., May Tzuc, O., Ricalde Castellanos, L., Bassam, A., Flota-Bañuelos, M., & Rubio-Bellido, C. (2024). Energy poverty under 2M indicator: Feasibility of decrease by using passive techniques in residential buildings of Southeast Mexico. *Energy and Buildings, 323*, 114761. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.114761

Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A., & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 49*, 736–755. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095

Martin-Dominguez, I. R., Rodriguez-Muñoz, N. A., Romero-Perez, C. K., Najera-Trejo, M., & Ortega-Avila, N. (2018). Analysis of the Methodologic Assumptions of the NOM-020-ENER-2011—Mexican Residential Building Standard. *Environments, 5*(11), 118. https://doi.org/10.3390/environments5110118

May-Tzuc, O., Jiménez-Torres, M. A., Cruz y Cruz, A. del R., Canul-Turriza, R., Andrade-Durán, J. E., & Noh-Pat, F. (2023). Feasibility of the adaptive thermal comfort model under warm sub- humid climate conditions: cooling energy savings in Campeche, Mexico. *Hábitat Sustentable, 13*(1), 120–131. https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.10

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación. (2009). NMX-C-460-ONNCCE-2009: Determinación de la transmitancia térmica en elementos que conforman la envolvente en edificaciones. https://platiica.economia.gob.mx/normalizacion/nmx-c-460-onncce-2009/

Ruiz Torres, R. P. (2019). Evaluación del sistema termolosa entre la medición experimental y el calculado con la Norma NMX-C-460-ONNCCE-2009. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, (6), 119–136. https://doi.org/10.32870/rvcs.v0i6.126

Secretaría de Energía, (SENER). (2011). Diario Oficial. Norma Oficial Mexicana NOM-020-ENER-2011. 47. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/181660/NOM_020_ENER_2011.pdf

Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano [SEDATU], & Comisión Nacional de Vivienda [CONAVI]. (2017). *Código de Edificación de Vivienda* (Conavi, 3ra, pp.1–586). https://onncce.org.mx/images/Publicaciones/publicado-CEV_2017__FINAL_.pdf

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT]. (2025). Aviso. Factor de emisión del sistema eléctrico nacional 2024. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/981194/aviso_fesen_2024.pdf

Szokolay, S. V. (2014). *Introduction to Architectural Science*. Routledge. https://doi.org/10.4324/9781315852409

Vargas, A. P., & Hamui, L. (2021). Thermal Energy Performance Simulation of a Residential Building Retrofitted with Passive Design Strategies: A Case Study in Mexico. *Sustainability, 13*(14), 8064. https://doi.org/10.3390/su13148064

Vázquez-Torres, C. E., Sotelo-Salas, C., & Grajeda-Rosado, R. M. (2022). Efecto de la NMX-C-460-ONNCCE-2009 sobre el Comportamiento Térmico en Viviendas de Interés Social en Clima Templado Sub-Húmedo. *Estudios de Arquitectura Bioclimática, 17*, 109-124. https://zaloamati.azc.uam.mx/server/api/core/bitstreams/619d980f-850d-45a6-b462-ae0a947b99be/content#page=109

Villar-Ramos, M. M., Hernández-Pérez, I., Aguilar-Castro, K. M., Zavala-Guillén, I., Macias-Melo, E. V., Hernández-López, I., & Serrano-Arellano, J. (2022). A Review of Thermally Activated Building Systems (TABS) as an Alternative for Improving the Indoor Environment of Buildings. *Energies, 15*(17), 6179. https://doi.org/10.3390/en15176179

Yamamoto, T., Ozaki, A., & Lee, M. (2021). Optimal Air Conditioner Placement Using a Simple Thermal Environment Analysis Method for Continuous Large Spaces with Predominant Advection. *Energies, 14*(15), 4663. https://doi.org/10.3390/en14154663