

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**MAESTRÍA Y DOCTORADO EN CIENCIAS E INGENIERÍA**



**EVALUACIÓN Y PROYECCIÓN DEL DESEMPEÑO EN EL CONSUMO ELÉCTRICO  
DE ACCIONES DE EFICIENCIA ENERGÉTICA EN EL SECTOR DOMÉSTICO DE  
MÉXICO**

**T E S I S**

Para obtener el grado de

**DOCTOR EN CIENCIAS**

**P R E S E N T A:**

**GRECIA CATALINA GÓMEZ BRAVO**

**DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. JOSÉ ALEJANDRO SUÁSTEGUI MACÍAS**

**CO DIRECTOR DE TESIS:**

**DR. ALEXIS ACUÑA RAMÍREZ**



**MEXICALI B.C. A DICIEMBRE DE 2025**

## **Dedicatoria**

*A Dios, " Porque todas las cosas proceden de él, y existen por él y para él. ¡A él sea la gloria por siempre! Amén" (Romanos 11:36 NVI).*

*A mis padres, a mi hermana, a mi familia y a quienes me han acompañado en este camino.*

## Agradecimientos

A Dios, gracias. “Y a Aquel que es poderoso para hacer todas las cosas mucho más abundantemente de lo que pedimos o entendemos, según el poder que actúa en nosotros, a Él sea gloria en la iglesia y en Cristo Jesús por todas las edades, por los siglos de los siglos. Amén.” (Efesios 3:20–21 RVR1960)

Quiero expresar mi agradecimiento a mi director de tesis, el Dr. José Alejandro Suástegui Macías por compartir generosamente su conocimiento y experiencia. Su paciencia, orientación y apoyo fueron fundamentales en mi formación y en el desarrollo de este trabajo de investigación.

Al Dr. Alexis Acuña y al Dr. Hernán Magaña en agradecimiento por su tiempo, por compartir sus enseñanzas, y por su disposición y apoyo durante el desarrollo de esta investigación.

A los miembros del comité de tesis, por su apoyo y por los comentarios y observaciones brindados a este proyecto.

A mis compañeros el Mtro. Salvador Soto, Mtra. Ada Josefina, Mtra. Brenda Ibarra, Mtra. Claudia Pérez y el Mtro. Erick Nava por todo su apoyo y amistad brindado durante mis estudios de doctorado.

A mi familia, mi hermana Hirlanda Gómez y mis amigas, gracias por su amor, apoyo incondicional y por creer en mí incluso cuando yo misma dudé.

Al Dr. Juan Ríos por compartir conmigo gran parte de este camino, por el apoyo brindado y los aprendizajes que dejó esta etapa. Asimismo, a mi prima Vianney, Lic. en Idiomas, por su valioso apoyo durante este proceso.

Finalmente, a la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Baja California, al personal administrativo y docente, y a la SECIHTI, por el apoyo otorgado para la realización de mis estudios de doctorado.

## Resumen

Una de sus manifestaciones del cambio climático es el aumento de las temperaturas ambientales, que ocasiona un mayor consumo eléctrico por los sistemas de climatización de los hogares, los cuales han aumentado un 35% sus requerimientos de energía en México en los últimos 25 años. Para disminuir el consumo eléctrico de las viviendas, diversos estudios y programas gubernamentales han identificado medidas de eficiencia energética (MEE), sin embargo, se desconoce en qué magnitud variará su desempeño a mediano y largo plazo por los efectos del cambio climático. Es por ello que este estudio evalúa el impacto de la aplicación de medidas de eficiencia energética en el consumo eléctrico del sector residencial en México para los años 2050 y 2080, considerando las variaciones climáticas. Se estimó el consumo eléctrico de una vivienda típica mexicana mediante el método de Horas Grado de Enfriamiento (HGE) con una temperatura de adaptación, y se generaron proyecciones climáticas con el software Future Weather Generator (FWG) bajo los escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 con el fin de analizar las tendencias futuras del consumo eléctrico doméstico. Los resultados indican que el cambio climático podría afectar principalmente las zonas cálidas, aumentando el consumo eléctrico doméstico significativamente. Sin embargo, las MEE podrían reducir el consumo hasta en un 36% del consumo proyectado. Este estudio identifica a las MEE más efectivas para reducir el consumo eléctrico según el tipo de clima de la localidad, proyecta su desempeño a largo plazo y establece alternativas para mitigar los efectos del cambio climático, especialmente en las regiones más vulnerables.

**Palabras clave:** Eficiencia Energética, Cambio Climático, Horas Grado de Enfriamiento, Simulación Energética, Escenarios SSP.

## Abstract

One of the manifestations of climate change is the increase in ambient temperatures, which leads to higher electricity consumption by home air conditioning systems, whose energy requirements have increased by 35% in Mexico over the last 25 years. To reduce electricity consumption in homes, various studies and government programs have identified energy efficiency measures (MEE). However, it is unknown to what extent their performance will vary in the medium and long term due to the effects of climate change. This study therefore assesses the impact of applying energy efficiency measures on electricity consumption in the residential sector in Mexico for the years 2050 and 2080, taking into account climate variations. The electricity consumption of a typical Mexican home was estimated using the Cooling Degree Hours (CDH) method with an adaptation temperature, and climate projections were generated using the Future Weather Generator (FWG) software under the SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, and SSP5-8.5 scenarios in order to analyze future trends in domestic electricity consumption. The results indicate that climate change could mainly affect warm areas, significantly increasing domestic electricity consumption. However, MEE could reduce consumption by up to 36% of projected consumption. This study identifies the most effective MEE for reducing electricity consumption according to the type of climate in the locality, projects their long-term performance, and establishes alternatives to mitigate the effects of climate change, especially in the most vulnerable regions.

**Keywords:** energy efficiency, climate change, cooling degree hours, residential electricity consumption, SSP scenarios, adaptive comfort.

## Lista de abreviaturas

Abreviatura	Significado
CDH	Cooling Degree Hours (Horas Grado de Enfriamiento)
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
BES	Building Energy Simulation (Simulación Energética de Edificios)
DD	Degree Days (Grados-Día)
OT	Operating Temperature (Temperatura Operativa)
DH	Degree Hours (Horas-Grado)
NREL	National Renewable Energy Laboratory (Laboratorio Nacional de Energías Renovables)
INEGI	Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática
SIE	Sistema de Información Energética
SENER	Secretaría de Energía
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers
OS	OpenStudio
kWh	Kilowatt-hora
AC	Air Conditioning (Aire Acondicionado)

## Contenido

<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>4</b>
<b>Contenido</b> .....	<b>6</b>
<b>Índice de figuras</b> .....	<b>9</b>
<b>Índice de tablas</b> .....	<b>13</b>
<b>Capítulo 1. Introducción</b> .....	<b>14</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Justificación de la investigación.....	19
1.3 Hipótesis.....	21
1.4 Objetivo general .....	21
1.5 Objetivos específicos.....	22
1.6 Alcances y limitaciones de la investigación.....	22
<b>Capítulo 2. Antecedentes</b> .....	<b>23</b>
2.1 Panorama energético del sector doméstico en México .....	23
2.1.1 Consumo eléctrico residencial.....	24
2.1.2 Esquema tarifario y demanda .....	30
2.2 Estrategias nacionales de eficiencia energética.....	31
2.2.1 Normatividad sector residencial .....	31
2.2.2 Programas y política de eficiencia energética en vivienda.....	33
2.3 Estado del arte .....	36
2.3.1 Métodos de cálculo para climatización en viviendas .....	37
2.3.2 Enfoques de simulación energética en vivienda.....	44
2.5.3 Estudios nacionales e internacionales relevantes .....	47
<b>Capítulo 3. Marco teórico</b> .....	<b>49</b>
3.1 Eficiencia energética en edificaciones residenciales.....	49
3.2 Clima y edificación .....	53
3.3 Escenarios de cambio climático (SSP-RCP).....	56
3.4 Horas Grado de Enfriamiento (HGE).....	58
3.5 Sistemas constructivos de viviendas .....	61
3.6 Método de simulación energética.....	63
<b>Capítulo 4. Materiales y métodos</b> .....	<b>65</b>

4.1 Características de la investigación .....	65
4.1.1 Enfoque y diseño de estudio .....	65
4.1.2 Población de estudio .....	66
4.1.3 Universo de estudio .....	66
4.1.4 Tamaño de muestra.....	67
4.2 Recopilación de información .....	70
4.2.1 Caracterización de la vivienda.....	71
4.2.2 Datos climáticos históricos.....	74
4.2.3 Proyecciones climáticas bajo escenarios de cambio climático SSP .....	74
4.3 Modelo de construcción de la vivienda.....	78
4.4 Temperatura adaptativa.....	79
4.5 Modelado energético basado en HGE.....	84
4.6 Validez y confiabilidad .....	88
4.7 Medidas de Eficiencia Energética.....	94
4.8 Escenarios de análisis.....	96
4.8.1 Escenario Base (sin eficiencia).....	96
4.8.2 Escenarios 2050 (corto plazo) .....	97
4.8.3 Escenarios 2080 (mediano plazo).....	97
4.8.4 Escenario con medidas de eficiencia energética.....	97
4.9 Elaboración de un artículo para publicación en revista de circulación internacional .....	98
<b>Capítulo 5. Resultados.....</b>	<b>99</b>
5.1 Distribución climática y localización geográfica de la muestra.....	100
5.2 Proyección de temperaturas a mediano y largo plazo (2050 y 2080) bajo diferentes escenarios SSP.....	104
5.3 Tendencias del consumo eléctrico a mediano y largo plazo bajo diferentes escenarios SSP .....	107
5.4 Porcentajes de aumento en el consumo eléctrico a mediano y largo plazo bajo escenarios SSP .....	110
5.5 Potencial de ahorro eléctrico a mediano y largo plazo (2050 y 2080) bajo distintos escenarios SSP .....	113
5.6 Potencial de ahorro eléctrico promedio a mediano y largo plazo (2050 y 2080).....	117
5.7 Potencial de ahorro a mediano y largo plazo para los distintos tipos de clima bajo escenarios SSP .....	120
<b>Capítulo 6. Discusión de resultados.....</b>	<b>125</b>

<b>Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>127</b>
7.1 Recomendaciones.....	130
8.3 Recomendaciones para futuras investigaciones .....	131
<b>Anexos .....</b>	<b>131</b>
<b>Referencias.....</b>	<b>132</b>

## Índice de figuras

Figura 1. Mapa de distribución del consumo eléctrico per cápita en México .....	24
Figura 2. Consumo de electricidad del sector doméstico por estado .....	26
Figura 3. Distintas trayectorias en la evolución del consumo de energía por clima templado y cálido.....	27
Figura 4. Porcentaje de ahorro eléctrico respecto a las acciones de eficiencia energética. ....	28
Figura 5. Línea de tiempo de programas de eficiencia energética gubernamentales en México..	35
Figura 6. Ahorros en la demanda de energía de calefacción para la carga de enfriamiento inducida bajo diferentes escenarios de cambio climático.....	38
Figura 7. Mejora de la intensidad energética primaria, 2011-2021. ....	50
Figura 8. Inversión en eficiencia energética, 2015-2021.....	51
Figura 9. Mapa tipo de climas en México.....	54
Figura 10. Mapa temperatura Media Anual, Escala 1:1.000 000, México .....	55
Figura 11. Método HGE, el efecto de la temperatura exterior local, la duración de esta temperatura durante un cierto período de tiempo. ....	59
Figura 12. Resumen gráfico de la metodología empleada en la investigación.....	66
Figura 13. Diagrama de caracterización de la vivienda.....	71
Figura 14. Future Weather Generator pantalla inicio .....	75
Figura 15. Diagrama software FWG.....	78
Figura 16. Modelo tridimensional de una vivienda típica mexicana en el software Open Studio. ....	79
Figura 17. Modificación de la estructura general del simulador térmico .....	81

Figura 18. Modificación a la metodología de horas grado empleada en el simulador energético, agregando una temperatura de adaptación.....	86
Figura 19. Representación del cálculo de CDH con cada función para los días del año 2019 de la ciudad de Monterrey .....	87
Figura 20. Correlación entre la temperatura media de cada tarifa y el tiempo de uso del A/C ....	90
Figura 21. Gráfica de consumos anuales reales vs obtenidos de simulación por localidad.....	92
Figura 22. Validación de simulación energética de la vivienda típica en 35 localidades, comparando consumos energéticos calculados y los consumos reales por usuario de cada ciudad. ....	93
Figura 23. Metodología propuesta para la realización del estudio. ....	95
Figura 24. Horas Grado de Enfriamiento históricas en Tuxtla Gutiérrez (clima cálido).....	102
Figura 25. Horas Grado de Enfriamiento históricas en Mexicali, Baja California (clima cálido seco/extremoso) .....	102
Figura 26. Horas Grado de Enfriamiento históricas en San Miguel de Allende, Guanajuato (clima templado) .....	103
Figura 27. Temperaturas a mediano plazo para la ciudad de Mexicali bajo los distintos escenarios de cambio climático .....	105
Figura 28. Temperaturas promedio anual futuras para Mexicali bajo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5. ....	106
Figura 29. Temperaturas promedio anual futuras para Cadereyta bajo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5. ....	107

Figura 30. Porcentajes de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5 para distintas localidades de México..... 111

Figura 31. Porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo el escenario SSP1-2.6 (Shared Socioeconomic Pathways) para distintas localidades de México..... 111

Figura 32. Porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo el escenario SSP2-4.5 (Shared Socioeconomic Pathways) para distintas localidades de México..... 112

Figura 33. Porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo el escenario SSP3-7.0 (Shared Socioeconomic Pathways) para distintas localidades de México..... 112

Figura 34. Porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo el escenario SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways) para distintas localidades de México..... 113

Figura 35. Promedio de porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5. .... 113

Figura 36. Porcentaje de ahorro en el consumo eléctrico a 2080 bajo los 4 escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) utilizando aislamiento térmico en muros para distintas localidades de México. .... 115

Figura 37. Porcentaje de ahorro en el consumo eléctrico a 2080 bajo los 4 escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) utilizando aislamiento térmico en techo para distintas localidades de México. .... 116

Figura 38. Porcentaje de ahorro en el consumo eléctrico a 2080 bajo los 4 escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) cambiando a mini Split de EER 15 para distintas localidades de México. .... 116

Figura 39. Porcentaje de ahorro en el consumo eléctrico a 2080 bajo los 4 escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) utilizando aislamiento térmico en techo y muros para distintas localidades de México.....	117
Figura 40. Potencial de ahorro eléctrico promedio por acción de mejora energética y escenario climático a mediano plazo .....	119
Figura 41. Potencial de ahorro eléctrico promedio por acción de mejora energética y escenario climático a largo plazo.....	120
Figura 42. Potencial de ahorro por acción de mejora energética y escenario climático a largo plazo para clima cálido.....	122
Figura 43. Potencial de ahorro por acción de mejora energética y escenario climático a largo plazo para clima seco.....	123
Figura 44. Potencial de ahorro por acción de mejora energética y escenario climático a largo plazo para clima templado.....	124
Figura 45. CCWorldWeatherGen pantalla inicio.....	132

## Índice de tablas

Tabla 1. Porcentaje de materiales de construcción presentes en las viviendas a nivel nacional. .	29
Tabla 2. Uso de aparatos en México. ....	30
Tabla 3. Tarifas eléctricas del sector doméstico existentes en México con base en la temperatura promedio exterior. ....	31
Tabla 4. Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética con efecto en el sector residencial en México. ....	32
Tabla 5. Ley y reglamento sobre edificaciones para Baja California, y su capital. ....	36
Tabla 6. Listado de localidades por tarifa. ....	69
Tabla 7. Características modelo de la vivienda típica mexicana . ....	71
Tabla 8. Electrodomésticos comunes y uso diario promedio en México . ....	72
Tabla 9. Umbrales de temperatura adaptativa (Tadap) por zona climática . ....	83
Tabla 10. Factor de uso del A/C respecto a la tarifa eléctrica . ....	89
Tabla 11. Coeficientes de simulación por municipio. ....	90
Tabla 12. Porcentajes de desviación estándar para cada modelo. ....	93
Tabla 13. Medidas de EE seleccionadas . ....	94
Tabla 14. Muestra de localidades y tipo de clima. ....	100
Tabla 15. Pronóstico de consumo eléctrico por escenario climático a mediano plazo. ....	108
Tabla 16. Pronóstico de consumo eléctrico por escenario climático a largo plazo. ....	109

## Capítulo 1. Introducción

Los edificios desempeñan un papel importante en la vida humana, influyendo de manera crucial en nuestra vida cotidiana, en la configuración de la sociedad y en el entorno en el que desarrollamos nuestras actividades laborales e interacciones diarias. Su influencia se extiende más allá de la simple estructura física, pues en la transición hacia una sociedad sostenible estos ocupan una posición destacada en el consumo de energía y surgen como uno de los principales contribuyentes a las emisiones de gases de efecto invernadero (UN Environment Programme, 2020).

De acuerdo con el Balance Nacional de Energía (SENER, 2018), el sector doméstico consumió alrededor del 26.1% de la electricidad total generada en el país en 2022, tomando la segunda posición como el sector con mayor consumo. Esto pone al sector residencial como uno de los puntos energéticos estratégicos para el desarrollo socioeconómico en México, debido a su creciente participación en el consumo eléctrico nacional y su alta vulnerabilidad frente a los efectos del cambio climático.

La problemática energética del sector doméstico se encuentra muy ligada a las condiciones climáticas y al desempeño térmico de las viviendas, aumentando cuando el calor es más severo en las zonas norte y sureste del país. En regiones áridas y semiáridas del norte de México las temperaturas exteriores pueden superar los 45 °C durante el verano, que es cuando ocurre la demanda máxima de energía eléctrica, entre mayo y septiembre, esto incrementa significativamente las cargas térmicas internas, lo que obliga a los usuarios a emplear sistemas de enfriamiento mecánico para mantener niveles aceptables de confort térmico y regular los valores necesarios para el buen funcionamiento de los aires acondicionados (CENACE, 2018)

Debido al calentamiento global, el sobrecalentamiento se ha convertido en la principal fuente de malestar al hablar del comportamiento termo energético de los edificios. Por un lado, el consumo de energía junto con el riesgo de sufrir un golpe de calor aumenta durante los períodos cálidos y en situaciones extremas como las olas de calor. Por otro lado, no existe un método ampliamente aceptado para medir el sobrecalentamiento (Zepeda-Rivas & Rodríguez-Álvarez, 2020).

El Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC AR6, 2021) establece que México se encuentra entre las regiones del mundo con mayor riesgo climático asociado al calor extremo debido a su ubicación geográfica. Bajo escenarios intermedios de cambio climático, se prevé un incremento entre 1.8 °C y 2.3 °C en la temperatura promedio hacia 2050, con incrementos aún mayores en regiones desérticas como el noroeste del país (IPCC, 2021). Este aumento térmico significaría un crecimiento proporcional en el uso de energía eléctrica para enfriamiento en el sector doméstico (IEA, 2021). Por ello identificar el perfil de consumo energético de las viviendas es un paso necesario para evaluar alternativas técnicas que ayuden a disminuir la demanda eléctrica residencial, entre las cuales destacan la implementación de medidas de eficiencia energética y el diseño de estrategias basadas en variables climáticas como las horas grado de enfriamiento (Cooling Degree Hours, CDH), que permiten modelar de forma precisa el comportamiento térmico de las viviendas considerando el clima.

El método de CDH permite cuantificar la carga de refrigeración de una vivienda en función de la diferencia acumulada entre la temperatura exterior y una temperatura base de confort, para estimar el consumo de energía de climatización (ASHRAE Standard 55, 2004; Pérez-Tello et al., 2018). El enfoque CDH representa una mejora metodológica respecto a los tradicionales grados día de enfriamiento (Cooling Degree Days, CDD), al trabajar con registros horarios y ofrecer

mayor precisión térmica, especialmente en zonas donde hay gran variación de la temperatura diaria como México.

En relación a la problemática expuesta, se busca analizar el consumo de energía de la vivienda representativa en México para mejorar su desempeño energético al implementar medidas de eficiencia energética. Esta representatividad se ha elegido a través de estudios previos e información gubernamental que caracteriza la vivienda del sector residencial de México. Entre las distintas medidas de eficiencia energética se incluyen la sustitución de equipos de aire acondicionado por unidades más eficientes, así como el aislamiento térmico como mejora en la envolvente térmica que han demostrado ser alternativas viables para reducir la demanda eléctrica residencial sin comprometer el confort térmico (de Buen R., 2020). En este contexto, resulta importante considerar el posible aumento futuro de las temperaturas al diseñar y aplicar estrategias de eficiencia energética en los edificios, de manera que estas mantengan su efectividad en escenarios climáticos más cálidos.

### **1.1 Planteamiento del problema**

El sector residencial es uno de los mayores consumidores de energía a nivel mundial (Hamilton & Rapf, 2020), representando casi una tercera parte del consumo final de energía global y el 26 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con su consumo (Al-Absi et al., 2024; IEA, 2023a). De acuerdo con el Balance Nacional de Energía (SENER, 2024), el sector doméstico en nuestro país representa el 26.3% del consumo de energía final del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), posicionándose como el tercer sector con mayor crecimiento. Este porcentaje ha mostrado una tendencia creciente en las últimas dos décadas, impulsado por factores como el aumento de la urbanización donde el efecto de isla de calor intensifica las necesidades de enfriamiento (Santamouris, 2020), el crecimiento poblacional y la mayor penetración de equipos

electrodomésticos y de climatización en los hogares (IEA, 2020; INEGI, 2020b) para mantener condiciones confortables en el interior de las viviendas (O. de Buen & Navarrete, 2019; IEA, 2023a; INEGI, 2018d; International Energy Agency, 2023; Kotharkar et al., 2022).

En México, la diversidad climática abarca desde zonas áridas hasta regiones templadas, cálidas y húmedas(INEGI, 2018b), lo que ocasiona variaciones en los patrones de consumo energético del sector residencial de una localidad a otra (O. de Buen & Navarrete, 2019). Estas variaciones en el consumo no solo están relacionadas con las condiciones climáticas predominantes, sino que también se deben a los hábitos de uso de aparatos eléctricos, los periodos de uso y el tipo de clima (CENACE, 2018).

En regiones con climas cálido y seco, como el noroeste y noreste del país, la demanda de energía eléctrica asociada al enfriamiento en las viviendas se ha intensificado significativamente (O. de Buen & Navarrete, 2019), debido al incremento sostenido de las temperaturas máximas y a la frecuencia de olas de calor extremas (Reyes, 2021; CONAGUA, 2022). Este fenómeno se verá agravado por las proyecciones de cambio climático realizadas por el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), donde se espera que en México el calentamiento supere los 1.5°C con respecto al periodo preindustrial en los próximos 3 a 5 años y los 2.0°C para el 2040 (Romero Moreno, 2002)(UNAM, 2022; IPCC, 2021). Dicho aumento térmico repercute directamente en la demanda eléctrica del sector doméstico, debido a la necesidad de mantener condiciones de confort térmico interior en las viviendas (CENACE, 2018).

Según el reporte anual de la vivienda 2021 por el Infonavit, en México, la población urbana que habita en localidades con más de 15 mil habitantes pasó de 61.0 % a 63.7 % en los últimos 20 años, contabilizando un total de 35 259 433 viviendas particulares habitadas estimadas (INEGI; INFONAVIT & SHF, 2020)(ENVI, 2020). Debido a esta urbanización, uno de los grandes retos

que enfrenta hoy en día el sector energético de México, es la creciente demanda de energía eléctrica para confort térmico de edificaciones residenciales en edificaciones residenciales (de Buen R., 2020).

La demanda de energía para confort térmico, que persiste a lo largo de la vida útil de las viviendas, depende de un factor muy importante que es el envolvente del edificio (de Buen R., 2020), es decir, el diseño y el tipo de materiales utilizados en muros, techos, ventanas y puertas son parte importante en la eficiencia energética de las construcciones. Una envolvente adecuada implica una protección efectiva contra las condiciones climáticas, especialmente en un país donde la mitad de los municipios se encuentran en zonas tropicales o de clima cálido extremo, con temperaturas elevadas durante todo el año y aumentos drásticos en verano en ecosistemas desérticos.

De acuerdo a la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), la demanda de energía para confort térmico en zonas de clima cálido representa aproximadamente el 35% del consumo total del sector residencial en el país. Este problema se agrava con el tiempo debido al incremento de viviendas que requieren de sistemas de aire acondicionado para mantener condiciones térmicas adecuadas al interior por sus habitantes. La instalación de sistemas de enfriamiento de espacios ha experimentado un crecimiento en aumento en los últimos años. Dicha tendencia es particularmente acentuada en las zonas cálidas extremas, donde el 48% de los hogares reporta el uso de al menos una unidad de aire acondicionado (INEGI, 2018c).

Uno de los principales factores que contribuyen a este alto consumo energético es la poca eficiencia en el diseño y construcción de las viviendas. La precariedad de materiales y el uso recurrente de métodos autoconstructivos, sobre todo cuando no se cuenta con la asesoría profesional adecuada, pueden estar relacionados con una mayor frecuencia de problemas

estructurales y energéticos en las viviendas reportadas en la Encuesta Nacional de Vivienda (INEGI; INFONAVIT & SHF, 2020). Estas deficiencias incrementan la dependencia de sistemas de climatización, lo que a su vez eleva el consumo de energía y los costos de operación para los hogares.

Frente al cambio climático, surge la necesidad de un ahorro energético integral en las edificaciones, desde su concepción y construcción, sin comprometer la habitabilidad ni la comodidad. Esto se logra mediante la implementación de medidas que disminuyen la demanda energética en el sector residencial. Un diseño eficiente de la envolvente de la vivienda reduce las ganancias de calor, lo que se traduce en un ahorro significativo en el consumo de energía y una mayor eficiencia en el uso de los equipos de climatización, además de reducir los costos de facturación eléctrica y las emisiones de carbono de la edificación.

Frente al desafío que representa el cambio climático, es importante realizar acciones a nivel nacional y global para disminuir el cambio y deterioro del medio ambiente. La eficiencia energética en las viviendas contribuye al desarrollo sostenible del planeta, y también ofrece una oportunidad para mejorar la calidad de vida de las personas, asegurando un futuro habitable y resiliente para todos.

## **1.2 Justificación de la investigación**

El sector residencial es uno de los mayores consumidores de energía a nivel mundial (Hamilton & Rapf, 2020), representando casi una tercera parte del consumo final de energía global y el 26 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> relacionadas con la energía (IEA, 2023; Al-Absi et al., 2024). Sin embargo, esta demanda energética varía significativamente entre regiones y países, dependiendo de factores climáticos, constructivos y socioeconómicos.

De acuerdo con el World Energy Outlook, la eficiencia energética y la descarbonización de la electricidad en edificios en América Latina bajo un Escenario de Desarrollo Sostenible podrían reducir las emisiones anuales del sector en aproximadamente 140 megatoneladas de dióxido de carbono (MtCO<sub>2</sub>) para 2040. Estas medidas podrían reducir las emisiones de los edificios en un 51% con respecto a los niveles de 2018, aun considerando un incremento del 6% en la demanda energética (IEA, 2020). Estas cifras subrayan la necesidad de implementar estrategias de eficiencia en las viviendas, especialmente en países como México, donde el consumo energético residencial está influenciado por la variabilidad climática y las condiciones constructivas.

La demanda energética de una vivienda depende en gran parte del clima local. No es posible establecer los mismos estándares para edificaciones en zonas cálidas que en regiones templadas o frías, ya que la demanda energética varía significativamente (Garnica, 2020). En este sentido, un diseño eficiente de la envolvente térmica puede reducir de manera significativa la demanda de climatización, mejorando la eficiencia energética y disminuyendo los costos de electricidad para los usuarios (O. de Buen R., 2020). No obstante, para maximizar estos beneficios, es necesario fortalecer la aplicación y regulación de las normas de eficiencia energética existentes en el sector residencial, tanto en el diseño y construcción de nuevas viviendas como en la rehabilitación de edificaciones existentes.

Debido a los aumentos proyectados en la temperatura, aumentará la vulnerabilidad de las viviendas al sobrecalentamiento, especialmente en verano que es probable que sigan en uso más allá de la década de 2050. Sin estrategias adecuadas de adaptación, mantener condiciones interiores confortables podría volverse cada vez más difícil (Shikder et al., 2012). Esta situación requiere soluciones que permitan mejorar el desempeño térmico de las viviendas.

Esta investigación busca realizar un análisis del comportamiento energético de las viviendas del sector residencial en México, considerando las características constructivas predominantes y los tipos de clima presentes en el país. Se busca evaluar el potencial de ahorro energético mediante la aplicación de medidas de eficiencia que reduzcan la vulnerabilidad de las viviendas ante el aumento de temperaturas futuras. A su vez, este estudio se alinea con el Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS) 11, que promueve ciudades y comunidades sostenibles, fomentando la construcción de edificaciones resilientes y la rehabilitación energética de viviendas existentes.

Además del impacto ambiental, la eficiencia energética en el sector residencial afecta directamente en la economía de los consumidores, debido a que un menor consumo de electricidad reduce el impacto del costo en energía eléctrica sobre el gasto familiar. En este sentido, el estudio busca identificar el potencial de ahorro energético al aplicar iniciativas de eficiencia energética en las viviendas de México ante la evidencia del aumento de temperaturas a futuro, proporcionando información para la optimización de normativas y políticas públicas que promuevan iniciativas de ahorro y eficiencia energética en las regiones climáticas del país.

### **1.3 Hipótesis**

El aislamiento térmico en techo y muros es, y continuará siendo hasta el año 2050, la estrategia de eficiencia energética con mayor potencial de ahorro eléctrico en cualquier tipo de clima y localidad geográfica de México.

### **1.4 Objetivo general**

Evaluar el impacto de la aplicación de medidas de eficiencia energética en el consumo eléctrico del sector doméstico a corto y mediano plazo, considerando las particularidades climáticas de las diferentes localidades de México.

## 1.5 Objetivos específicos

- Identificar y definir las características constructivas representativas de la vivienda típica en México.
- Obtener las HGE desde los años 2000 a 2020 y su pronóstico a 2050.
- Simular el consumo eléctrico de la vivienda típica de México en distintas localidades, mediante el uso de sistemas computacionales e información histórica de las HGE.
- Determinar el consumo eléctrico de una vivienda típica proyectado hasta el año 2050, utilizando los pronósticos de las HGE de una muestra representativa de localidades.
- Evaluar los consumos eléctricos por localidad aplicando acciones de eficiencia energética, comparando los resultados con el escenario base y cuantificando el porcentaje de la reducción.
- Evaluar el potencial de ahorro eléctrico en la vivienda típica de México al aplicar acciones de eficiencia energética. La evaluación proyectada hasta el año 2050 integrará la simulación de múltiples escenarios climáticos y de implementación de medidas de eficiencia energética.

## 1.6 Alcances y limitaciones de la investigación

El estudio tiene como alcance principal la caracterización de una vivienda promedio en México, considerando no solo los aspectos constructivos, sino también los hábitos de uso de los usuarios respecto a los equipos y luminarias, la cantidad de habitantes, el tamaño de los equipos de climatización y el tipo de clima de cada localidad. Esto permitirá simular el comportamiento energético de una vivienda típica a corto y mediano plazo, bajo diferentes escenarios de cambio climático (SSP) en cualquier localidad de México. Además, se analizan las medidas de eficiencia energética más adecuadas para cada región, con el objetivo de generar recomendaciones que

contribuyan a la reducción del consumo energético y al ahorro económico de los habitantes. Esta investigación también apoya la realización de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), en lo que respecta a la sostenibilidad urbana y la acción climática.

Las limitaciones que enfrenta el estudio son varias, entre ellas el acceso y la calidad de los datos. Específicamente, la falta de información en ciertas localidades podría limitar la precisión de las simulaciones realizadas. El cambio en los hábitos del consumo de la energía eléctrica en el sector residencial también representa un reto, ya que no todos los patrones pueden ser capturados por el modelo. Asimismo, las proyecciones climáticas a largo plazo están sujetas a los modelos climáticos del programa utilizado bajo los escenarios SSP, lo que puede afectar las estimaciones de ahorro energético y el impacto de las medidas de eficiencia.

## **Capítulo 2. Antecedentes**

### **2.1 Panorama energético del sector doméstico en México**

El sector doméstico constituye uno de los principales consumidores de energía a nivel global (Hamilton & Rapf, 2020) , al concentrar cerca de un tercio del consumo final de energía y generar aproximadamente el 26 % de las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas al uso de energía (Al-Absi et al., 2024; IEA, 2023b). En México, de acuerdo con el Programa de Desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional (PRODESEN), este sector representó para el año 2023 alrededor del 26.3 % del consumo final del Sistema Eléctrico Nacional (SEN), y se estima que para el año 2038 disminuya en un valor cerca del 25.6 %.

A nivel nacional, el consumo eléctrico promedio por vivienda fue de 1,852.2 kWh anuales en el año 2018, mientras que el consumo per cápita alcanzó 2,736 kWh en 2023 (Ember, 2024). Este consumo es particularmente más elevado en las regiones norte, peninsular y costera del país (Fig 1), donde las condiciones climáticas provocan un mayor uso de equipos eléctricos, como

sistemas de aire acondicionado y ventiladores, incrementando de manera significativa la demanda eléctrica por habitante.

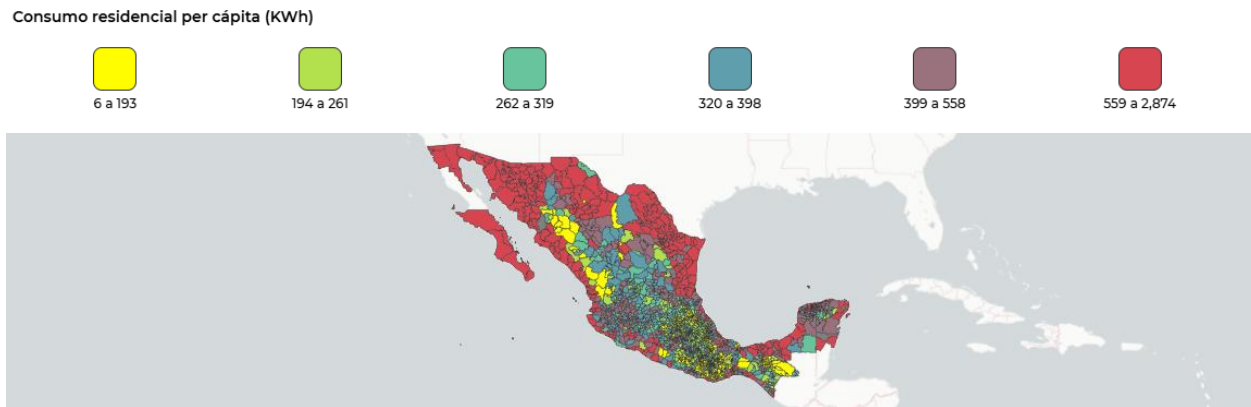


Figura 1. Mapa de distribución del consumo eléctrico per cápita en México

La Agencia Internacional de Energía advierte que, si no se implementan medidas para mejorar la eficiencia energética, la demanda eléctrica global destinada a equipos de climatización podría triplicarse para 2050, año en el que se estima que alrededor de dos tercios de los hogares del mundo dispondrán de un sistema de aire acondicionado (IEA, 2018). La incorporación de aires acondicionados más eficientes permitiría reducir la necesidad de nuevas centrales eléctricas para satisfacer la demanda máxima de energía, especialmente por la noche. En este sentido, México enfrenta un desafío significativo, dado que cerca del 60% de las viviendas no cuentan con condiciones óptimas de aislamiento térmico (de Buen R., 2020), lo que incrementa aún más su dependencia de la climatización mecánica y, con ello, el consumo energético asociado.

### 2.1.1 Consumo eléctrico residencial

La energía desempeña un papel fundamental en el desarrollo económico y social de un país, al influir directamente en los procesos productivos y en la calidad de vida de la población (Laureiro, 2018). En este sentido, el sector residencial ocupa un lugar destacado dentro del consumo final de energía, especialmente en lo referente al uso de electricidad, que constituye el principal recurso energético utilizado por los hogares para iluminación, electrodomésticos y

equipos de climatización que se ven reflejados en las facturas que reciben de forma mensual o bimestral. De manera complementaria, las viviendas también consumen combustibles, principalmente gas LP, leña o gas natural, destinados a la cocción de alimentos y al calentamiento de agua (Conuee, 2021).

Históricamente, la vivienda ha tenido la función de proporcionar protección frente a las condiciones ambientales, adaptándose a distintos entornos climáticos, incluidos aquellos de considerados extremos (Tejeda-Martínez et al., 2022). En México, las viviendas ubicadas en regiones de clima cálido seco, especialmente en el noroeste, requieren condiciones constructivas particulares para mantener niveles aceptables de confort térmico ([II-UNAM], 2009; Ovacen, 2016). En estas regiones, la necesidad de enfriamiento es particularmente alta, generando una fuerte dependencia del uso de sistemas de aire acondicionado mucho más frecuentes que los sistemas de calefacción (Curiel et al., 2021).

El consumo eléctrico residencial muestra un comportamiento heterogéneo a nivel nacional, determinado principalmente por factores climáticos, socioeconómicos, constructivos y tecnológicos. De acuerdo con el explorador de datos eléctricos de Ember, el consumo promedio por persona fue de 2, 736 kWh/año en 2023 y 1,858.24 kWh/vivienda en 2019 según la Semarnat (2021); sin embargo, esta cifra presenta grandes variaciones entre entidades (Ember, 2024). Los datos sobre el consumo de electricidad del sector doméstico por estado muestran que los valores más altos se alcanzaron especialmente en climas cálidos o cálido-secos como Sonora, Baja California, Sinaloa, Tamaulipas, Veracruz, y Yucatán, donde la climatización es indispensable para mantener el confort térmico (Fig. 2).

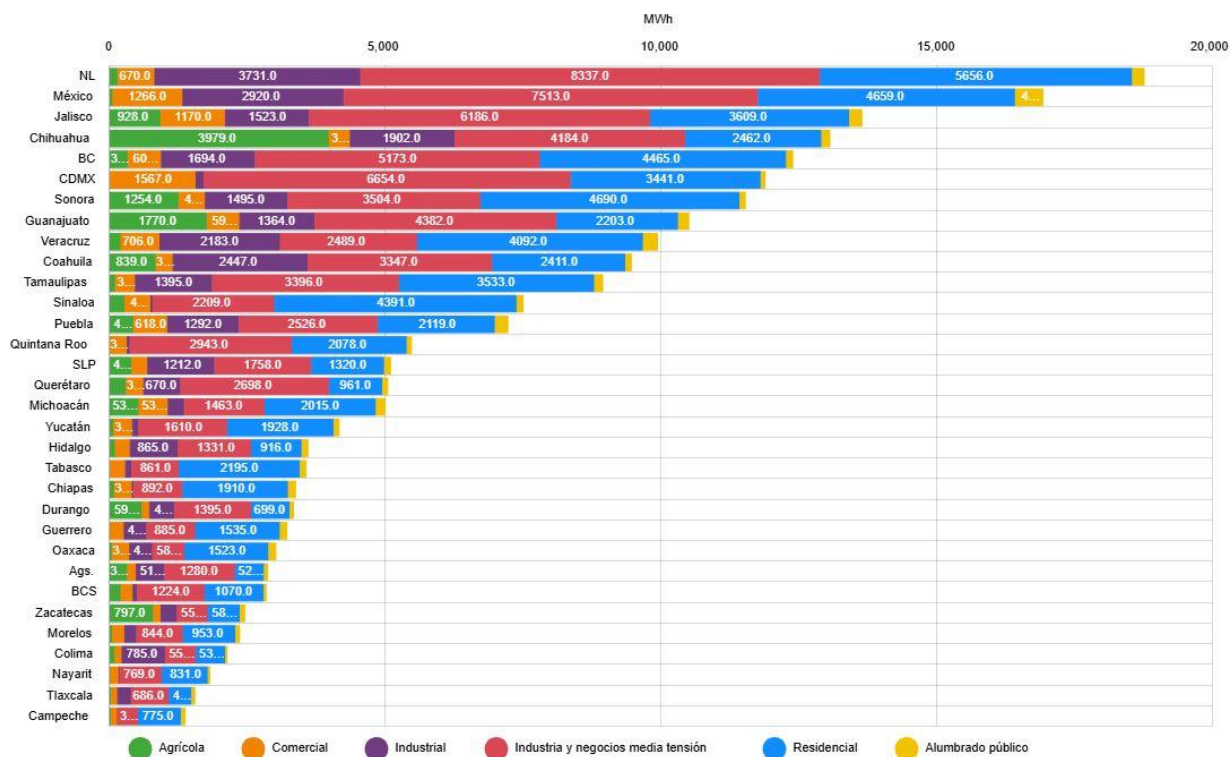


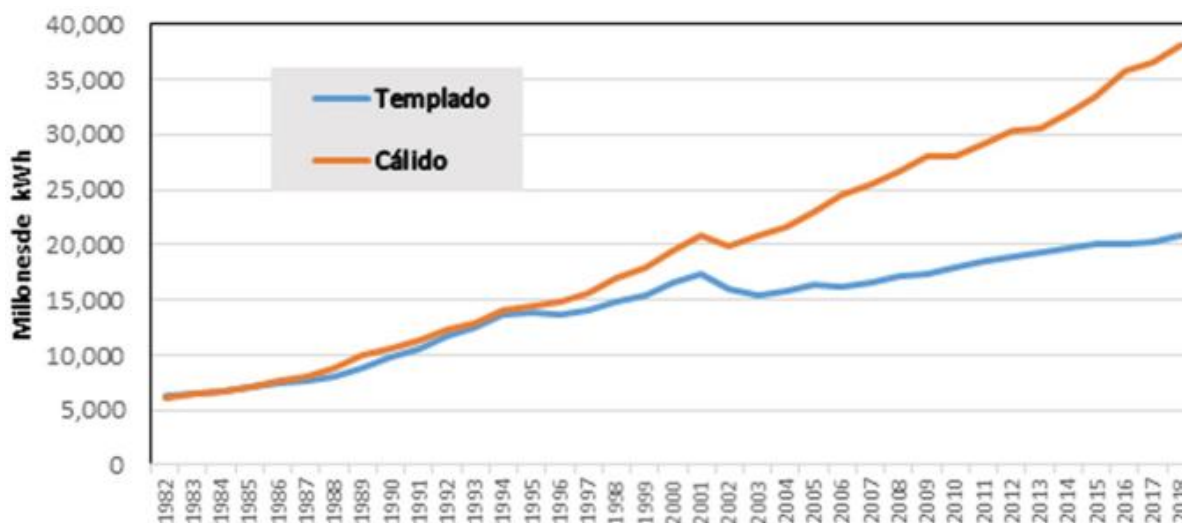
Figura 2. Consumo de electricidad del sector doméstico por estado

El uso de aire acondicionado constituye uno de los principales diferenciadores del consumo eléctrico. En las regiones cálidas extremas, aproximadamente 48% de las viviendas cuenta con al menos un equipo de aire acondicionado, lo que representa más de siete millones de unidades en operación a nivel nacional (INEGI, 2018d). Reducir la demanda asociada a estos equipos es estratégico no solo para disminuir el consumo eléctrico residencial, sino también para reducir la presión sobre la red eléctrica nacional. En zonas de rápido crecimiento urbano, se ha observado que un aumento del 1% en población urbana puede generar un incremento del 2.2% en demanda de energía, lo cual evidencia la estrecha relación entre urbanización y consumo energético (Sosa et al., 2016).

En 2024, México alcanzó 38.4 millones de viviendas, lo que representa un incremento de seis millones respecto a 2016, con un promedio de crecimiento del 2.1% anual. En el caso de Baja California, una de las entidades más representativas del clima cálido seco, se registraron 1,148,913

viviendas habitadas en 2020, de las cuales el 99% contaban con servicio de energía eléctrica. Esto ubica a la entidad dentro de las diez con mayor número de viviendas en el país (INEGI, 2015).

El incremento en el consumo residencial no ha sido uniforme. Como se observa en los consumos históricos como el de la Fig. 3, las regiones de clima cálido han incrementado su consumo 6.6 veces desde 1982, mientras que las templadas solo 3.2 veces (de Buen R., 2020). A partir de 1995, el consumo en zonas cálidas muestra un crecimiento acelerado debido a la combinación de dos factores: a) la entrada en vigor de normas de eficiencia energética que facilitaron la masificación de equipos de aire acondicionado; y b) la construcción intensiva de viviendas de interés social en regiones cálidas, usualmente equipadas desde origen con sistemas de enfriamiento (de Buen & Navarrete, 2019).



**Figura 3.** Distintas trayectorias en la evolución del consumo de energía por clima templado y cálido.

Fuente: de Buen y Navarrete, 2019.

Estudios específicos en regiones cálidas, como el realizado por (Suástegui Macías et al., (2018), han demostrado que implementar acciones de eficiencia energética como el aislamiento térmico en techos y muros, puede reducir de manera sustancial el consumo energético tanto anual como durante el verano, periodo en el que se presenta la mayor carga por enfriamiento (Figura 4).



**Figura 4.** Porcentaje de ahorro eléctrico respecto a las medidas de eficiencia energética.  
Fuente: Suástegui y cols., 2018.

Los resultados de la ENVI 2020, indica que el 97.7% de estas viviendas particulares habitadas cuentan con piso recubierto, 92.4% tiene paredes de materiales como tabique, ladrillo, block, cantera, cemento u otro, y 78.4% techo de concreto o de viguetas con bovedilla. El censo de población y vivienda 2020 muestra que, el 53 % de los pisos de las viviendas particulares habitadas son de cemento.

Algunas de las características que se pueden mencionar de las viviendas del país con base en datos del INEGI son que el 92% de las viviendas particulares habitadas las paredes se construyen de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto. El techo de las viviendas se compone de materiales diversos, sin embargo, a nivel nacional 79 % son de losa de concreto y sólo 6% de las viviendas en el país cuenta con aislamiento térmico.

En relación con la iluminación, el INEGI reporta que el 42% de las viviendas particulares habitadas con acceso a energía eléctrica cuentan con entre 6 y 10 focos; el 41% dispone de 1 a 5; el 10% de 11 a 15; y el 3% tiene entre 16 y 20. Asimismo, otro 3% de las viviendas posee 21 focos o más. Por su parte, el BIEE/CONUEE indicó que, en México, para 2014, el promedio fue de 7

focos por hogar, de los cuales el 72% correspondía a lámparas fluorescentes compactas (LFC) (INEGI, 2018a).

El cambio de una lámpara por otra con tecnología más eficiente podría generar ahorros de casi 50% de energía, considerando las pérdidas por la generación de energía eléctrica (INEGI, 2020a). Con base en los datos del INEGI, la televisión es el equipo más usado en la vivienda. Todo esto se presenta en la tabla 1 con la información obtenida sobre la presencia y el uso de aparatos a nivel nacional.

Tabla 1. Porcentaje de materiales de construcción presentes en las viviendas a nivel nacional. Elaboración propia con base en INEGI, 2021.

Pisos	El 53% son de cemento, 43% de madera o mosaico y el 4% el piso es de tierra
Paredes	El 92% se construyen de tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto, el 4 % de adobe, 3% de madera y 1% de lámina, carrizo, bambú, palma embarre o bajareque.
Techos	El 79% son de losa de concreto, 17% de lámina, 2% de madera o tejamanil y también 2% de material de desecho, palma, paja y teja.
Luminaria	El 42% de las viviendas con energía eléctrica cuentan entre 6 y 10 focos; el 41% dispone de 1 a 5; el 10% tiene de 11 a 15; y el 3% registra entre 16 y 20. Asimismo, otro 3% de las viviendas posee 21 focos o más.

Los datos del INEGI señalan que la televisión es el equipo más utilizado en las viviendas mexicanas. Esta información, presentada en la tabla 2, refleja la presencia y el uso de la energía eléctrica en el país y evidencia que el consumo residencial depende de manera crítica de tres factores: las condiciones climáticas, el equipamiento eléctrico (en particular el aire acondicionado) y las características físico-constructivas de la vivienda.

Tabla 2. Uso de aparatos en México.  
Fuente: Elaboración propia con datos de ENCEVI, 2018 e INEGI.

Electrodoméstico	Porcentaje de uso	Tiempo de uso
Estufa	85% de las viviendas usan una estufa para calentar o cocinar alimentos.	56.9%, 60.6% y 55.4% usan la estufa de 1 a 2 horas en región cálida extrema, templada y tropical respectivamente.
Refrigerador	El refrigerador de tamaño mediano lo utilizan al menos 4 de cada 10 viviendas (de 11 a 15 pies). Casi la mitad de estos tienen de 1 a 5 años de uso.	
Lavadora	El 71% de las viviendas utilizan al menos una.	El 75% de los hogares con lavadora la utilizan entre las 06:00 y las 12:00 hrs.
Televisor	91.5% presencia de televisión en las viviendas, y en promedio 46% son de LCD o plasma	Casi el 46% de las viviendas lo usan más de 2 a 5 horas en promedio al día.
Plancha	Con un 62% de presencia en las viviendas del país y específicamente plancha de vapor.	15 minutos al día.
Climatización	En uso poco más de 7 millones de equipos de aire acondicionado	42% lo utilizan de entre 5 a 9 horas, con la temperatura del termostato entre los 24 y 26 °C.
Calentador de agua	43.5% de presencia en las viviendas y de esto 46.3% eléctrico.	El 33.5% usa el calentador eléctrico de 2 a 5 horas, y el 30% lo usan de 1 a 2 horas.
Televisor	76.6% utiliza por lo menos una televisión. 46% tienen televisor LCD o plasma.	Entre 2 a 5 horas de uso al día.
Radio	Aproximadamente 35.1% de los habitantes tiene un radio en su vivienda, de 6 o más años.	2.57 horas diarias en promedio.
Ventilador	45% de las viviendas utilizan ventiladores.	
Iluminación	Lámparas Fluorescentes Compactas Autobalastadas (LFCA) y 72% de 25 W de potencia	

### 2.1.2 Esquema tarifario y demanda

Actualmente el esquema tarifario vigente para el sector doméstico del país por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) se compone de ocho tarifas: 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E, 1F y DAC. Las letras indican las diferentes regiones en México, pues cada una varía en cuanto a su temperatura mínima promedio mensual como se indica en la tabla 3, y dependiendo del tipo de tarifa será el subsidio aplicable a la misma. De acuerdo a datos de la CFE, en 2002 se estableció la tarifa Doméstica de Alto Consumo (DAC), aumentando el precio medio (Tabla 3).

El consumo de energía eléctrica presenta variaciones a lo largo del territorio mexicano debido a los efectos del tipo clima, pues las temperaturas y necesidad de climatización no son iguales para las regiones de clima templado con la tarifa doméstica 1, comparado a las de clima cálido con tarifas de 1A a 1F (CFE, 2025).

Tabla 3. Tarifas eléctricas del sector doméstico existentes en México con base en la temperatura promedio exterior.  
Elaboración propia con base en CFE, 2022.

<b>Tarifa</b>	<b>Descripción</b>
1	Esta tarifa se aplica a todos los servicios que destinen la energía para uso exclusivamente domésticos, para cargas que no sean consideradas de alto consumo de acuerdo a lo establecido en la tarifa DAC, conectadas individualmente a cada residencia, apartamento, apartamento en condominio o vivienda.
1A	temperatura media mínima en verano de 25 °C
1B	temperatura media mínima en verano de 28 °C
1C	temperatura media mínima en verano de 30 °C
1D	temperatura media mínima en verano de 31 °C
1E	temperatura media mínima en verano de 32 °C
1F	temperatura media mínima en verano de 33 °C

## 2.2 Estrategias nacionales de eficiencia energética

### 2.2.1 Normatividad sector residencial

Las propiedades de los materiales de construcción, así como la economía, tienen un papel muy importante a la hora de tomar las decisiones cuando se habla de confort térmico en una edificación. Por ello muchos países, incluyendo México, cuentan con reglamentos o normas de construcción sustentable, que a la vez contribuyan al ahorro energético y brinden comodidad térmica a sus ocupantes (Molina Fuertes et al., 2017).

Entre estas normas está la entrada en vigor de las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) con efecto en el sector residencial en México, específicamente la NOM-018-ENER-2011 y la NOM-020-ENER-2011 sobre aislantes térmicos y eficiencia energética en edificaciones. Estas son evidencia un avance en la eficiencia energética, mejorando el diseño térmico de las viviendas y

logrando una mayor comodidad de sus ocupantes consumiendo el mínimo de energía (DOF - Diario Oficial de La Federación, 2017).

Según la Norma Oficial Mexicana de eficiencia energética en edificaciones residenciales (NOM-020-ENER-2011), en México la adecuación térmica de las viviendas afecta considerablemente la demanda pico del sistema eléctrico. Principalmente en las zonas con mayor uso de equipos de climatización, como la región norte y costera del país. Por ello la norma busca mejorar desempeño térmico de la envolvente, logrando ahorrar en el consumo de energía al disminuir el uso de los equipos de climatización.

Asimismo, la NOM-018-ENER-2011 busca orientar al usuario en la selección de mejores materiales de aislamiento térmico para sus viviendas, buscando aumentar el ahorro y uso eficiente de la energía.

La CONUEE también elaboró y estableció otras normas mexicanas aplicables a aparatos y al acristalamiento en viviendas domésticas, con el propósito de reducir el consumo de energía en regiones de clima cálido. Las especificaciones correspondientes se presentan en la tabla 4.

Tabla 4. Normas Oficiales Mexicanas de eficiencia energética para el sector residencial en México.

Elaboración propia con base en el Diario Oficial de la Federación, 2021.

<b>Norma Mexicana</b>	<b>Nombre</b>	<b>Especificación</b>
NOM-018-ENER-2011	Aislantes térmicos para edificaciones.	Define características y métodos de prueba para evaluar aislantes térmicos homogéneos de venta en el país
NOM-020-ENER-2011	Eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios para uso habitacional	Disminuir la ganancia térmica de las viviendas a través de su envolvente, tanto para las nuevas construcciones como las ya existentes.
NOM-024-ENER2012	Características térmicas y ópticas del vidrio y sistemas vidriados para edificaciones	Regula las características ópticas y térmicas de los vidrios y sistemas vidriados.

NOM-011-ENER-2006	Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo central, paquete o dividido.	Establece el nivel mínimo de eficiencia energética que deben cumplir los distintos tipos de aire acondicionado que funcionan con energía eléctrica, por compresión mecánica y que incluyen un serpentín evaporador enfriador de aire, un compresor y un serpentín condensador enfriado por aire o por agua.
NOM-021-ENER/SCFI-2017	Eficiencia energética y requisitos de seguridad al usuario en acondicionadores de aire tipo cuarto.	Establece las características y los métodos de prueba de eficiencia energética para los aires acondicionados tipo cuarto nuevos, con condensador enfriado por aire.
NOM-023-ENER-2018	Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido, descarga libre y sin conductos de aire.	Especifica el nivel mínimo de eficiencia energética para los aires acondicionados tipo minisplit y multisplit; de ciclo simple (solo frío) o con ciclo reversible (bomba de calor).
NOM-026-ENER-2015	Eficiencia energética en acondicionadores de aire tipo dividido (Inverter) con flujo de refrigerante variable, descarga libre y sin ductos de aire.	Establece el nivel mínimo de eficiencia energética para los aires acondicionados tipo Inverter.

### 2.2.2 Programas y política de eficiencia energética en vivienda

De acuerdo con De Buen y Navarrete (2019), las políticas públicas dirigidas a promover la eficiencia energética en el sector doméstico de México han mostrado un gran impacto en la disminución del consumo de energía principalmente por el efecto de las NOM de eficiencia energética. Sin embargo, el efecto no es el mismo en las viviendas ubicadas en zonas de clima cálido que en aquellas situadas en regiones de clima templado.

En México, las estrategias más efectivas han sido las orientadas a mejorar la eficiencia energética de los equipos (incluidos los sistemas de aire acondicionado). Referente a la envolvente de las edificaciones el avance ha sido limitado, siendo uno de los factores de mayor influencia en el consumo de energía de las viviendas ubicadas sobre todo en regiones de clima cálido (de Buen

& Navarrete, 2019). Debido a los fenómenos diferenciados por el clima en distintas regiones, se justifica en gran medida la creación de políticas públicas de ahorro y uso eficiente de la energía orientadas a las edificaciones residenciales.

En 1990 se constituyó el fideicomiso FIPATERM por parte de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), impulsando las medidas para el ahorro y uso eficiente de energía eléctrica. Este fideicomiso ha tenido un impacto significativo principalmente en Mexicali, B.C. (FIPATERM, 2014).

Ese mismo año entró en disposición el Fideicomiso para el Aislamiento Térmico de la Vivienda y el Programa de apoyo a la economía familiar y de ahorro de energía eléctrica. De allí que surgiera la colaboración con la Universidad Autónoma de Baja California para la evaluación de aislamientos térmicos para las viviendas construidas de Mexicali B.C.

En el año 1996 se implementó en México el Horario de Verano, así como la aplicación de las primeras Normas Oficiales Mexicanas (NOM) para el sector residencial. Ese mismo año, ya se tenían dos programas a cargo de la Comisión Federal de Electricidad (CFE): el programa de aislamiento de viviendas en Mexicali B.C., y el proyecto Ilumex, para la iluminación residencial en Guadalajara y Monterrey (de Buen & Navarrete, 2019).

Debido a los resultados del programa de aislamiento, se ampliaron las acciones y en 1997 cambiaron el nombre del fideicomiso a Programa de Ahorro Sistemático Integral (ASI). En 2002 y 2003 se crearon los programas de Aislamiento Térmico y sustitución de Aire Acondicionado y el subprograma para cambio de refrigerador (FIPATERM, 2014).

En 2012 se inicia en México Las Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación (NAMA por sus siglas en inglés) que buscan reducir las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI)

en países en desarrollo. Dichas acciones son apoyadas y habilitadas por tecnología, financiamiento y construcción de capacidades (GIZ, 2022) (GIZ et al., 2016).

Se constituye la Ley de Impulso a la Eficiencia Energética para el estado de Baja California para fomentar y estimular acciones entre gobierno y sociedad a efecto de lograr la eficiencia energética mediante el impulso al aprovechamiento sustentable de la energía en el Estado y Municipios de Baja California (Periódico Oficial N°27, 2015) y al año siguiente se crea la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU). En 2014 se implementa la NAMA de Vivienda Existente (GIZ et al., 2016) y dos años después el Programa Mejoramiento Integral Sustentable de Vivienda surge en 2016 con el apoyo de la CONAVI, FIDE entre otros, vigentes hasta la actualidad (CONAVI, 2016). Lo descrito anteriormente se muestra en la Fig. 5.



**Figura 5.** Línea de tiempo de programas de eficiencia energética gubernamentales en México.

Cabe mencionar la creación de leyes y reglamentos para la región sobre las edificaciones, donde algunos de sus apartados instruyen sobre las condicionantes del diseño arquitectónico y materiales de construcción. En la tabla 5 se describen los aspectos relacionados a las edificaciones de uso habitacional en estas leyes, tanto para el estado de Baja California, como para el municipio de Mexicali.

**Tabla 5.** Ley y reglamento sobre edificaciones para Baja California, y su capital.  
Fuente: Elaboración propia, 2021.

<b>Ley / Reglamento</b>	<b>Apartado</b>	<b>Especificación</b>
Ley de edificaciones del estado de Baja California	<b>Título tercero:</b> Condicionantes del diseño arquitectónico	Dimensiones de anchos y alturas mínimas de edificaciones, iluminación y ventilación natural.
	<b>Título quinto:</b> Construcciones <b>Capítulo III:</b> Materiales de construcción	Materiales de construcción especificados en los planos, verificación de calidad. Artículo 50. Bienestar térmico y ahorro de energía eléctrica.
Reglamento de edificaciones para el municipio de Mexicali	<b>Capítulo cuarto:</b> Condicionantes de diseño <b>Sección III:</b> Índices de ocupación y dimensiones de espacios	Clasificación general dependiendo la función principal del edificio. Calcular perímetro y superficie construida. Clasificación y medidas mínimas de las edificaciones.

### 2.3 Estado del arte

El estado del arte se refiere a la historia y análisis general, de los estudios de investigación y publicaciones realizados sobre el tema de interés, que en este caso es los sistemas constructivos y consumo eléctrico del sector residencial. Se tomaron como referencia, los trabajos más recientes y destacados sobre materiales de construcción de edificaciones residenciales, así como publicaciones que involucran aspectos relacionados con el tema de investigación.

El análisis de este ensayo se estructuró a partir de aspectos principales, los cuales incluyen los métodos de simulación recientes para evaluar edificaciones residenciales, y posteriormente estudios existentes acerca de consumo eléctrico residencial y la eficiencia de la envolvente.

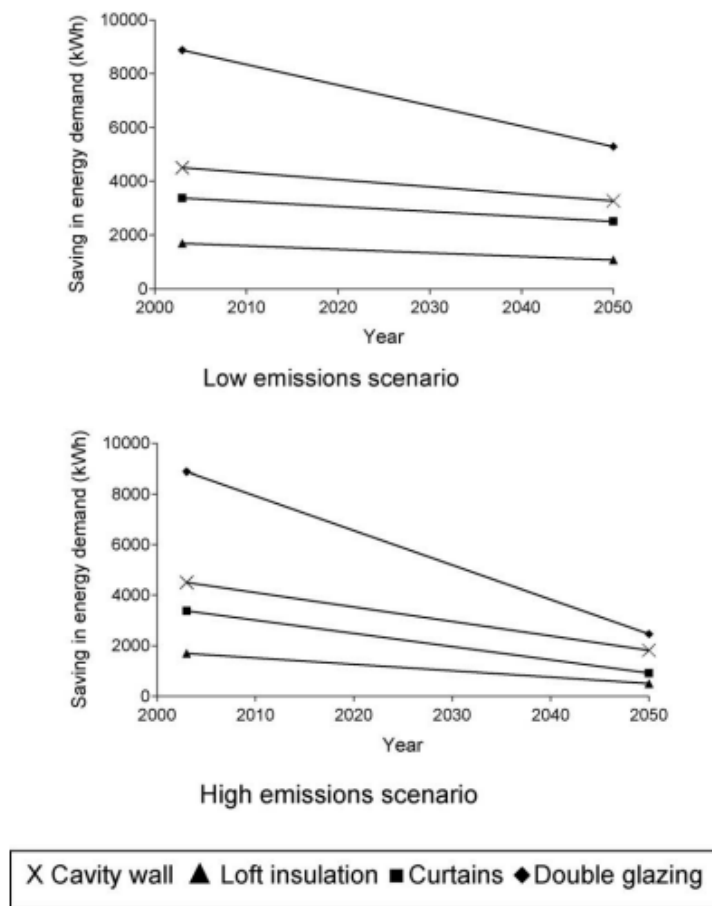
### *2.3.1 Métodos de cálculo para climatización en viviendas*

Los cambios en la temperatura ambiente, los sistemas de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) y la capacidad de mantener la temperatura interior dentro de rangos cómodos tienen un impacto directo en la demanda de energía de un edificio (Kotharkar et al., 2022). De acuerdo a (Gordillo et al., 2020) se han realizado muchos estudios sobre cómo mejorar el rendimiento energético de los edificios, cómo optimizar sus sistemas HVAC, así como el obtener soluciones de modernización rentables.

Los principales enfoques para calcular la influencia del clima en los requisitos de calefacción y refrigeración en edificaciones según (Kotharkar et al., 2022) son la técnica de simulación de energía de edificios (BES), el método de grados días (DD) y la temperatura operativa (OT). La simulación energética de edificios surge de la necesidad de herramientas computacionales que permitan analizar sistemas energéticos multivariables, específicamente los relacionados a las edificaciones (Castro Da Silva, 2017).

Sobre el primer método, investigaciones hacen uso de estos programas de simulación energética para cuantificar la importancia de los parámetros constructivos y de diseño de edificios, así como para su optimización, esto con el fin de evaluar el impacto en el consumo de energía en edificios residenciales. Como el caso de estudio realizado por (Gaterell & McEvoy, 2005) donde investigaron el desempeño de medidas de eficiencia energética aplicadas a una vivienda residencial existente en el Sudeste de Inglaterra, y cómo los diferentes escenarios climáticos influyen en la demanda de calefacción y refrigeración.

En dicho estudio se creó un modelo térmico de la vivienda utilizando el software TAS (Thermal Analysis Software) con el fin de simular el impacto de cada medida de aislamiento en el perfil de demanda de calor bajo dos escenarios de cambio climático desarrollados por el Departamento de Alimentación y Asuntos Rurales del Programa de Impactos Climáticos del Reino Unido (UKCIP), que representan las variaciones en los números proyectados de Grados Día de Calentamiento (HDD) y Grados Día de Enfriamiento (CDD). Los resultados mostraron que, aunque el doble acristalamiento es más sensible al cambio climático que las demás medidas, térmicamente es la mejor opción pues ofrece los mayores ahorros en la demanda de energía de calefacción para la carga de enfriamiento inducida más baja (Fig.6).



**Figura 6.** Ahorros en la demanda de energía de calefacción para la carga de enfriamiento inducida bajo diferentes escenarios de cambio climático

EnergyPlus y TRNSYS (Transient System Simulation Tool) son las principales herramientas de simulación utilizadas en el campo de la investigación de optimización de edificios, con valores del 37.2% y 35.3%, respectivamente (Aditya et al., 2017). También es posible acoplar a estos softwares herramientas de optimización del rendimiento de edificios (BPO) basadas en simulación como GenOpt y MATLAB (Gordillo et al., 2020).

Según Gordillo, MATLAB® es la herramienta más popular debido a que cuenta con una caja de herramientas de optimización que proporciona un amplio conjunto de algoritmos para minimizar o maximizar objetivos teniendo en cuenta diferentes restricciones, incluidos solucionadores para programación lineal y no lineal, con variables continuas y discretas, etc. Además, cuenta con herramientas que permiten al usuario analizar los resultados de la mejora.

Un análisis energético y de optimización se realizó para una casa típica en Salamanca, México, con clima templado, utilizando el programa Building Energy Optimization with Energyplus (BEOpt,E+) creado por el laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL), esto con el fin de estimar el ahorro anual de energía de diversas combinaciones de medidas de eficiencia energética y confort térmico (Griego et al., 2012). El confort térmico en ese estudio se evaluó utilizando el modelo de confort de Fanger para estimar el voto medio previsto (PMV) para cada hora del año, junto con el análisis de confort térmico PMV.

Los resultados sugieren que se requiere una combinación de mayor eficiencia de los electrodomésticos, mayores niveles de aislamiento térmico de techos y paredes para lograr un ahorro de energía anual aproximado del 52% para las nuevas construcciones de viviendas. Señalan la necesidad de expandir el estudio hacia otras zonas climáticas en México para el desarrollo de nuevas construcciones y mejoras de eficiencia energética en viviendas existentes.

El enfoque metodológico adoptado por (Ascione et al., 2016) combina el uso de la herramienta de simulación de energía dinámica EnergyPlus, basada en un método de solución de diferencias finitas de conducción unidimensional, y un algoritmo de optimización multiobjetivo restringido. El estudio compara para cuatro ciudades (Madrid, Niza, Nápoles, Atenas) varias estrategias pasivas, como propiedades térmicas de la envolvente del edificio, adopción de materiales de cambio de fase con diferentes temperaturas de fusión, soluciones de techo frío, varios valores de relación ventana/pared, y algunos sistemas de sombreado interior.

Con los métodos de un factor a la vez (O.F.A.T) y un análisis de sensibilidad basado en la varianza, (Delgarm et al., 2018) identificaron variables predominantes que afectan la eficiencia energética en la fase inicial de diseño de edificios en cuatro zonas climáticas principales de Irán utilizando jEPlus que es una herramienta paramétrica para usar en EnergyPlus y como interfaz entre MATLAB, también se utilizó el software de modelado 3D SketchUp para diseñar la geometría de la habitación y la zona térmica. Los resultados mostraron el tamaño de la ventana como el parámetro predominante en la refrigeración anual, la calefacción y la energía eléctrica total del edificio, mientras que la transmitancia visible del acristalamiento tuvo mayor influencia en la iluminación anual en todas las condiciones climáticas.

Con este nuevo método de acoplamiento es posible controlar completamente todas las propiedades de EnergyPlus a través del entorno MATLAB mediante jEPlus como interfaz. Logrando una herramienta para el análisis de sensibilidad del desempeño energético de los edificios sin ninguna restricción en la elección de los tipos de algoritmos de análisis de sensibilidad, variables de entrada (discretas, continuas y enteras mixtas, cadenas y variables numéricas), y el número de variables de salida.

Utilizando un algoritmo genético de optimización mediante el paquete MATLAB, (Alsaadi & Al-jabri, 2020) realizaron un análisis de sensibilidad con el objetivo de diseñar una envolvente óptimo y rentable para viviendas en climas representativos de la ciudad Omán, con clima cálido. El modelo de construcción del caso base lo generaron en el software DesignBuilder en conjunto con EnergyPlus, utilizando datos locales pertenecientes a las características físicas y térmicas del edificio,

El modelo de construcción verificado se utilizó para probar la sensibilidad de las variables de diseño con el fin de reducir el número de simulaciones innecesarias. Se compararon los diseños de envolvente con los requisitos enumerados en cuatro regulaciones térmicas regionales predominantes.

Comprobaron que los resultados del valor de EUI pronosticado por DesignBuilder estuviera dentro del rango de los EUI reales informados en la región. Los resultados indicaron que el sombreado de las ventanas es térmica y económicamente atractivo en todos los climas, además dependiendo del escenario de costos de energía, 2.5 a 5 cm más de aislamiento térmico es lo más rentable para los sistemas envolventes en climas cálidos en comparación con climas cálidos y húmedos.

En otro estudio realizado para clima cálido seco, se desarrolló un marco integral de optimización multiobjetivo basado en simulación computacional paralela mediante el acoplamiento de MATLAB aplicado a una residencia unifamiliar en Irán para abordar los aspectos económicos y ambientales de los proyectos de modernización energética de edificios (Tavakolan et al., 2022). Definieron el modelo de construcción de referencia mediante la incorporación de datos de auditoría energética en el software EnergyPlus para realizar una simulación energética de todo el edificio, recopilando información básica del edificio.

Para validar la simulación, se compararon los resultados de rendimiento energético con datos reales de consumo de energía. La optimización multiobjetivo se realizó mediante el algoritmo genético de clasificación no dominada (NSGA-II) en el software MATLAB. Este algoritmo mejora de manera continua el modelo de construcción en EnergyPlus hasta identificar un conjunto de soluciones óptimas de Pareto. Finalmente, se selecciona la combinación más adecuada de medidas sólidas, rentables y energéticamente eficientes para los edificios, incluyendo tanto medidas de adaptación sugeridas como estrategias de ahorro de energía y resultados económicos.

Al seleccionar las variables de decisión (sistemas HVAC, elementos envolventes de edificios, energías renovables), consideraron criterios de las partes interesadas, características del edificio, condiciones climáticas, disponibilidad de mercado para seleccionar las variables de decisión y así crearon un modelo paramétrico. Las funciones objetivo fueron la función de eficiencia energética (consumo de energía primaria) y funciones económicas como valor presente neto (VAN o NPV) y el período de recuperación descontado.

Otro estudio en el que se empleó la herramienta de optimización de MATLAB fue el realizado por Evin y Ucar (2019), con el objetivo de determinar los valores óptimos de grosor de aislamiento mediante la maximización de los ahorros netos de energía en calefacción, enfriamiento y ambos sistemas. Para ello, se efectuaron cálculos en cuatro ubicaciones climáticas distintas de Turquía, comparando cuatro materiales de aislamiento en 20 escenarios de demanda. Los resultados concluyeron que el material aislante RW (INS3-R), aplicado en la pared externa, es el más ecoeficiente; mientras que un techo aislado con XPS (INS1-R) reduce el costo de energía en un 77% respecto a un techo sin aislamiento.

La metodología se aplicó a cuatro edificios residenciales como casos de estudio. En primer lugar, se seleccionó el edificio a analizar y se determinaron las capas y conductividades térmicas de sus materiales. Posteriormente, se eligieron las ciudades de referencia y se establecieron temperaturas base de 18 °C para calefacción y 22 °C para enfriamiento, calculadas a partir de los grados-día anuales de cada localidad. Finalmente, se obtuvieron los valores de transmitancia térmica (“U”) correspondientes a cada región.

El método de grados día ha sido utilizado para medir la influencia de las condiciones climáticas en los requisitos de calefacción/refrigeración de edificios desde 1934. Es una de las herramientas más populares y sencillas para derivar las demandas de energía a nivel de ciudad/región que reflejan los efectos de las condiciones climáticas (Indraganti & Boussaa, 2016; Park et al., 2021; Rosa et al., 2014). Los grados-día de calefacción (HDD) y los grados-día de enfriamiento (CDD) son los dos indicadores involucrados en el cálculo de las demandas de energía de calefacción y refrigeración, respectivamente. De acuerdo con Kotharkar et al. (2022), los HDD se calculan sumando la diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura base. De manera similar, los CDD son esencialmente la suma de las diferencias de temperatura entre la temperatura base y la temperatura ambiente y se utilizan para predecir el consumo de energía cuando la temperatura exterior excede la temperatura base.

Los grados-día han sido la principal variable utilizada para correlacionar la energía y el clima. Antes de tener las ventajas que ofrece hoy la disponibilidad de las bases de datos meteorológicas en línea actuales, los grados-día de refrigeración o calefacción se calculaban simplemente considerando una simple suma o resta aritmética entre la temperatura exterior y una temperatura base estimada.

En lugar de trabajar con el método de grado-día, (Pérez-Tello et al., 2018) obtuvieron un nuevo modelo denominado horas-grado (HG). HG tiene en cuenta no sólo los grados de temperatura exterior por encima o por debajo de la temperatura de referencia, sino también la duración de estas variaciones a lo largo del día. Este método se puede realizar todos los días del año.

La temperatura operativa (OT) es un importante indicador de confort térmico interior que ilustra los efectos combinados de la temperatura del aire y la temperatura radiante media que reflejan la experiencia térmica humana en un espacio. Se define como una temperatura uniforme a la que un recinto negro imaginario intercambia la misma cantidad de calor por radiación y convección con un ocupante que en el entorno térmico real con temperatura no uniforme. También se conoce como 'temperatura resultante seca' o 'temperatura resultante' de acuerdo a Kotharkar et al., (2022).

### *2.3.2 Enfoques de simulación energética en vivienda*

La simulación es un método que ha demostrado ser una herramienta muy útil para el análisis y evaluación de proyectos, del sector residencial, público, gubernamental e industrial, relacionados con el ahorro y uso eficiente de la energía (Pérez-Tello y cols., 2018). En 2012, se realizó un estudio evaluando varias combinaciones de medidas de eficiencia energética y confort térmico para estimar un conjunto óptimo de recomendaciones para una casa típica en Salamanca, México, utilizando procedimientos detallados de simulación y optimización (Griego et al., 2012).

El confort térmico en ese estudio se evaluó utilizando el modelo de confort de Fanger para estimar el voto medio previsto (PMV) para cada hora del año, junto con el análisis de confort térmico PMV. El análisis energético y de optimización se realizó en una casa existente y un prototipo residencial de nueva construcción para estimar el ahorro energético anual de diversas

combinaciones de medidas de eficiencia energética y medidas de confort térmico, usando el programa Building Energy Optimization with Energyplus (BEOpt,E+) creado por el laboratorio Nacional de Energías Renovables (NREL).

Los resultados del análisis de optimización de dicho estudio sugieren que se requiere una combinación de mayor eficiencia de los electrodomésticos, mayores niveles de aislamiento térmico de techos y paredes para lograr un ahorro de energía anual de casi el 52% para las nuevas construcciones de viviendas. Señalan como algunas recomendaciones establecidas para zonas de clima templado como el del caso de estudio pueden aumentar el consumo de energía o discomfort térmico, y la necesidad de expandir el estudio hacia otras zonas climáticas en México para el desarrollo de nuevas construcciones y mejoras de eficiencia energética en viviendas existentes.

El enfoque metodológico adoptado por (Ascione et al., 2016) combina el uso de la herramienta de simulación de energía dinámica Energy Plus, basada en un método de solución de diferencias finitas de conducción unidimensional, y un algoritmo de optimización multiobjetivo restringido. El estudio compara para cuatro ciudades (Madrid, Niza, Nápoles, Atenas) en clima mediterráneo varias estrategias pasivas, como propiedades térmicas de la envolvente del edificio, adopción de materiales de cambio de fase con diferentes temperaturas de fusión, soluciones de techo frío, varios valores de relación ventana/pared, y algunos sistemas de sombreado interior. Entre sus hallazgos está la propuesta de aplicar una capa extra de PCM (Material de cambio de fase por sus siglas en inglés) con alta temperatura de fusión en el lado externo del edificio, se maximiza el ahorro de energía de enfriamiento, y que la temperatura de fusión óptima depende en gran medida de las condiciones exteriores de temperatura y radiación solar.

También se utilizó el programa de simulación energética BEOpt por (D'Agostino et al., 2019) para realizar simulaciones dinámicas, como parte de un estudio con enfoque multicriterio

basado en la teoría de la utilidad multiatributo. Evaluaron medidas alternativas de eficiencia energética, considerando explícitamente criterios tanto medioambientales como económicos aplicado al diseño de un nuevo edificio residencial en Milán (Italia), esto como estudio de caso de toma de decisiones relacionadas con la energía para un nuevo edificio residencial. La producción de energía renovable se evaluó mediante el programa de simulación transitoria TRNSYS. El método indicó que la tecnología más eficiente es el aislamiento de paredes huecas con construcción de madera y aislamiento de celulosa, y en conjunto con la importancia de implementar medidas integrales como son el aislamiento térmico, equipos de alta eficiencia, electrodomésticos y generación de energía renovable.

Un procedimiento para determinar el espesor óptimo de aislamiento térmico en la envolvente de edificios residenciales climatizados (calefacción-refrigeración) fue presentado por (Evin & Ucar, 2019) utilizando la caja de herramientas de optimización de MATLAB para obtener dicho valor. Se realizaron cálculos para cuatro ubicaciones climáticas diferentes de Turquía, y de los resultados se concluyó el tipo de material aislante en la pared externa más ecoeficiente y el aislamiento del techo con un material específico para el tipo de clima reducía el costo de energía en un 77% en comparación con el techo no aislado.

Ese mismo año, (Castro et al., 2019) desarrollaron una metodología teórica para construir una matriz de decisiones como herramienta para la rehabilitación energética de edificios existentes. En el estudio se consideraron como medidas de mejora la incorporación de aislamiento en la envolvente, la renovación de ventanas y la instalación de dispositivos de sombreado.

El núcleo técnico del método es un modelo dinámico de edificación que permite evaluar diferentes acciones de reacondicionamiento, así como las desviaciones energéticas producidas por las incertidumbres en las variables iniciales, utilizando la herramienta de simulación dinámica

Visual Doe 4.1. para modelar el caso base y las medidas de actualización. Este software ejecuta cálculos numéricos en un régimen transitorio hasta que se alcanza la convergencia en cada paso de tiempo (Castro Da Silva, 2017).

El primer intento de combinar el método de aprendizaje automático con el método Monte Carlo para cuantificar los impactos del clima, el edificio y las características relacionadas con los ocupantes que contribuyen más al uso final anual de energía de los edificios residenciales fue realizado por (Wang et al., 2021), utilizando los datos de la Encuesta de energía residencial de 2015. Proporciona referencias útiles a los responsables de la formulación de políticas para orientar el diseño, la construcción y la operación de edificios residenciales energéticamente eficientes para reducir el consumo de energía del sector doméstico.

Una investigación sobre el uso potencial del material de cambio de fase (PCM) para reducir el consumo de energía de refrigeración en edificios residenciales, se realizó utilizando el software Ansys Fluent para el análisis del rendimiento térmico. Se examinaron diferentes tipos de PCM, obteniendo resultados de mayor eficiencia para este material con una temperatura de fusión más alta en lugares con clima cálido, y recomendaron su uso en la capa exterior de la pared externa (Al-mudhafar et al., 2021).

### *2.5.3 Estudios nacionales e internacionales relevantes*

Los resultados de un estudio sobre el consumo eléctrico en las viviendas de bajos ingresos mediante un estudio de campo en la ciudad de Mexicali, mostraron que existe una variación entre el consumo estacional. Además, que el consumo de energía eléctrica de estas viviendas fue superior al promedio de las viviendas de Mexicali, debido a las características de diseño y construcción, así como a la percepción que tiene el ocupante de las condiciones de confort térmico

en este tipo de viviendas y, en particular, al comportamiento de los ocupantes (Romero et al., 2012).

Se evaluaron los materiales de construcción y los usos finales de la electricidad de una casa residencial colombiana ubicada en la ciudad de Pamplona por (Ortiz-Rodríguez et al., 2012). Los resultados mostraron que los mayores impactos ambientales durante el ciclo de vida de la vivienda ocurren durante la fase de operación de la vivienda, mientras que la fase de construcción genera alrededor del 7 al 28% del impacto.

Un estudio sobre la importancia de la envolvente de edificios residenciales de gran altura y el efecto en el consumo de energía mostró que la fachada del edificio con pasillo de aire reduce el consumo de energía en un 30% en comparación con los edificios del mismo tamaño. Los autores utilizaron el programa DesignBuilder con simulación en Energy Plus para el análisis energético (AYDIN & MIHLAYANLAR, 2020).

El impacto energético de los materiales de construcción en edificios residenciales en Turquía fue estudiado por (Usta & Zengin, 2021). Analizaron diferentes materiales considerando el consumo energético anual permitido, y según las diferentes zonas de calor y diferentes espesores de material aislante en relación a la demanda, y como resultado determinaron el material más adecuado en las regiones.

Respecto a medidas de eficiencia energética en edificaciones, (Aditya et al., 2017) realizaron una recopilación de desarrollos más recientes sobre los aislamientos térmicos de los edificios. Este artículo de revisión funciona como referencia para los desarrolladores en la aplicación de aislamiento de edificios y para que los responsables políticos implementen el aislamiento como una de las estrategias de conservación de energía, también para discutir sobre el

análisis del ciclo de vida y la reducción de emisiones potenciales mediante el uso de materiales de aislamiento adecuados.

Se revisaron cinco estrategias de refrigeración y calefacción pasivas (diseño de edificios pasivos, ventilación nocturna, refrigeración nocturna, PCM (Phase Change Material) e IEC (Indirect Evaporative Cooling), energía solar térmica), con el objetivo de evaluar cómo implementarlos mejor de manera rentable en casas nuevas y existentes. Confirmó la necesidad de una mayor investigación de los sistemas HVAC energéticamente eficientes con soluciones de estrategias pasivas para las viviendas residenciales contemporáneas (Rashad et al., 2021).

## **Capítulo 3. Marco teórico**

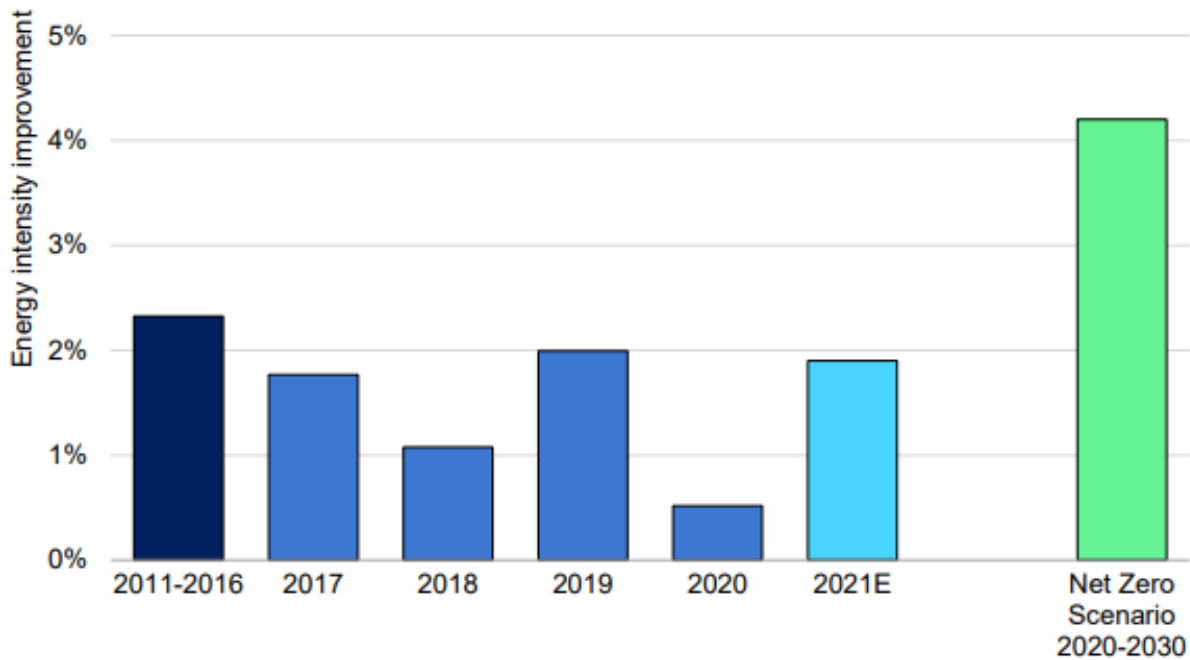
### **3.1 Eficiencia energética en edificaciones residenciales**

La crisis mundial de energía desde finales de los años 90, llevó a más de 350 expertos y líderes de 50 países a debatir sobre la necesidad de impulsar la eficiencia energética como posibilidad de mitigar esta situación y los problemas climáticos. Para esto se celebró la primera conferencia internacional sobre eficiencia energética en 1998 en Austria (SEMARNAT, 2021).

Desde entonces, la creciente demanda de energéticos ha acentuado el problema a escala global y plantea la exigencia de la gestión eficiente de la energía que a su vez constituye uno de los grandes desafíos de nuestros tiempos, por lo cual distintos sectores de la sociedad defienden la necesidad de un uso ecológico y sostenible de la energía. De acuerdo a la Agencia Internacional de Energía, después del peor año en décadas, el progreso de la eficiencia energética logró recuperarse en 2021, sin embargo, la tasa de mejora necesita incrementar al doble para poder alcanzar la meta descrita en el Escenario de Emisiones Netas Cero de la IEA para 2050.

En los últimos cinco años, la intensidad energética (una medida clave de la eficiencia energética de la economía) ha mejorado en promedio un 1.3% anual, frente al 2.3% entre 2011 y

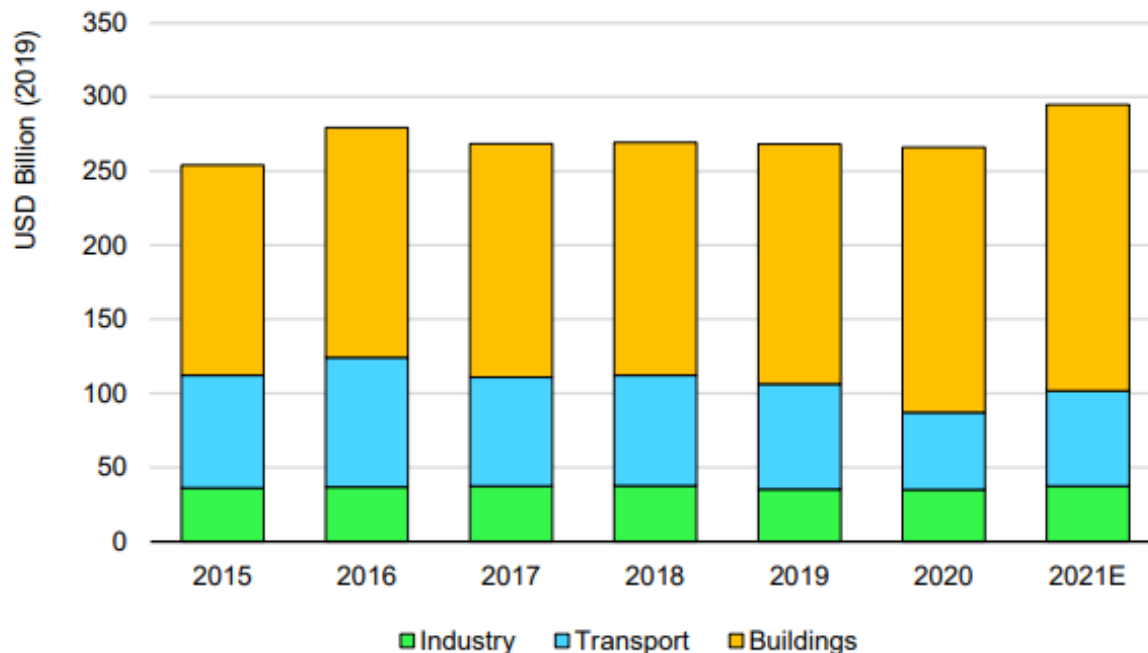
2016, y muy por debajo del 4% descrito en el escenario de emisiones netas cero para 2050 durante 2020-2030 (Fig. 7). Se espera que la demanda mundial de energía aumente en 4% aproximadamente para el año 2021, volviendo a los niveles anteriores a la pandemia (COVID-19) a medida que la actividad económica se recupere.



**Figura 7.** Mejora de la intensidad energética primaria, 2011-2021.  
Fuente: Agencia Internacional de Energía (IEA), 2021.

El informe de la IEA señala que las políticas gubernamentales han contribuido a impulsar la inversión en eficiencia dentro del sector de la construcción. Se estima que dichas políticas permitirán que la inversión en eficiencia energética aumente un 10% en 2021, alcanzando casi 300 mil millones de dólares (Fig. 8). No obstante, para alinearse con los niveles previstos en el escenario de emisiones netas cero de la IEA hacia 2050, la inversión anual total debería triplicarse antes de 2030.

El reciente crecimiento de la inversión se ha concentrado principalmente en Europa, lo que sugiere que se necesitan políticas en otras regiones para lograr los objetivos climáticos mundiales.



**Figura 8.** Inversión en eficiencia energética, 2015-2021.  
Fuente: Agencia Internacional de Energía (IEA), 2021.

Las inversiones en eficiencia del transporte ahora se están recuperando, mientras que las inversiones en edificios están alcanzando niveles récord. Esto como compensación a la disminución de los apoyos para el transporte debido al Covid-19 (IEA, 2021).

El sector de la construcción por sí solo representa alrededor del 35% del consumo de energía, ante esta situación, surge la necesidad de adoptar un enfoque de diseño de edificios con medidas sostenibles, que es la solución definitiva para reducir la demanda de energía del edificio. El uso excesivo de materiales de construcción convencionales no solo causa el calentamiento global, sino que también afecta los recursos naturales (Judkoff, 2011).

La sostenibilidad se ha vuelto cada vez más importante en la industria de la construcción en los últimos años. Se ha producido un movimiento para construir edificios de una manera más eficiente y sostenible reduciendo el uso de energía y los costos asociados en la operación y mantenimiento del edificio. Los edificios que se diseñan y utilizan en la actualidad consumen energía excesiva para calefacción y/o refrigeración (Ionescu et al., 2015).

Existe un potencial de ahorro de energía de entre un 30% y un 40% en la industria de la construcción, lo que no solo reducirá la carga en el sector eléctrico para satisfacer su demanda, sino que también ayudará a los habitantes a reducir sus facturas de energía (ECBC, 2007) (Judkoff, 2011).

Ante esto, la eficiencia energética de las viviendas y edificaciones residenciales es motivo de preocupación no solo en México sino en todo el mundo por su impacto en los requerimientos energéticos futuros, debido al crecimiento acelerado de nuestras ciudades modernas durante las próximas décadas (Pérez-Tello et al., 2018).

La eficiencia energética en una edificación, contempla la reducción de demanda de energía en la fase de operación, considerando que las localidades donde se requiere el uso de climatización artificial, como calefacción y refrigeración, son las que presentan mayor potencial de ahorro. Un edificio es energéticamente más eficiente a partir de la implementación de las técnicas de adecuación ambiental, lo que hace que se reduzca la capacidad instalada de los sistemas de climatización (Luna, 2008).

Al ser energéticamente eficiente, el edificio cumple dos importantes objetivos de desarrollo sostenible al tiempo que reduce la demanda de energía, y la reduce las emisiones al medio ambiente. Esta eficiencia en los edificios se relaciona principalmente con dos componentes: propiedades pasivas, que son las otorgadas por aislamiento térmico, radiación solar, ventilación natural, sombreado; y propiedades activas dadas por equipos de captura, conversión y uso de energía (energía renovable) (Ionescu et al., 2015).

La localización, orientación, distribución de espacios, así como el aprovechamiento de las propiedades térmicas y ópticas de los materiales de construcción son características que contribuirán a conformar la demanda energética del edificio. Los parámetros que alteran los

requerimientos energéticos del edificio son los parámetros medioambientales y los de diseño, clasificados como físicos y artificiales, respectivamente (Motawa y Oladokun, 2015). Dentro de los parámetros físicos se resalta la importancia de la temperatura horaria exterior, la radiación solar, así como la velocidad y dirección del viento; mientras que los artificiales se refieren a la forma del edificio, proporción de acristalado, orientación, propiedades de materiales y la distancia entre los edificios (Rodríguez y cols, 2018).

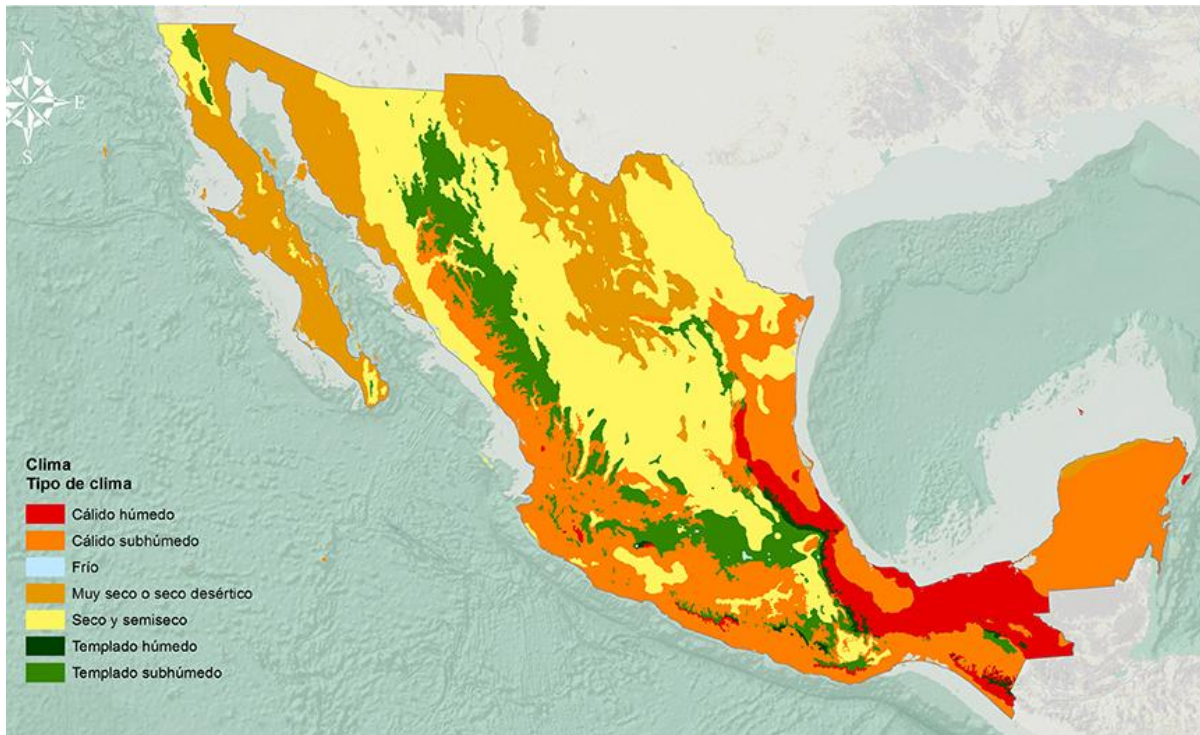
En climas cálidos y secos, la temperatura del aire comúnmente es superior a la de la piel, por ello es necesario favorecer construcciones de gran inercia térmica para acumular frío en las paredes durante la noche con el fin de restituir este durante el día. Cabe mencionar que la presencia de vegetación ayuda a alcanzar las exigencias de bienestar (Ugarte, 2018).

### **3.2 Clima y edificación**

Partimos de la definición de clima como el conjunto de condiciones características de la atmósfera, cuando se toma en cuenta un periodo largo de días, meses, estaciones y años, para un área determinada (INEGI, 2017). Este es uno de los principales factores que influye significativamente en la forma de vida de los seres humanos y en su interacción con el medio ambiente que lo rodea, lo cual determina el uso de energía para poder estar en condiciones de confort térmico en una región geográfica determinada (Luna, 2008).

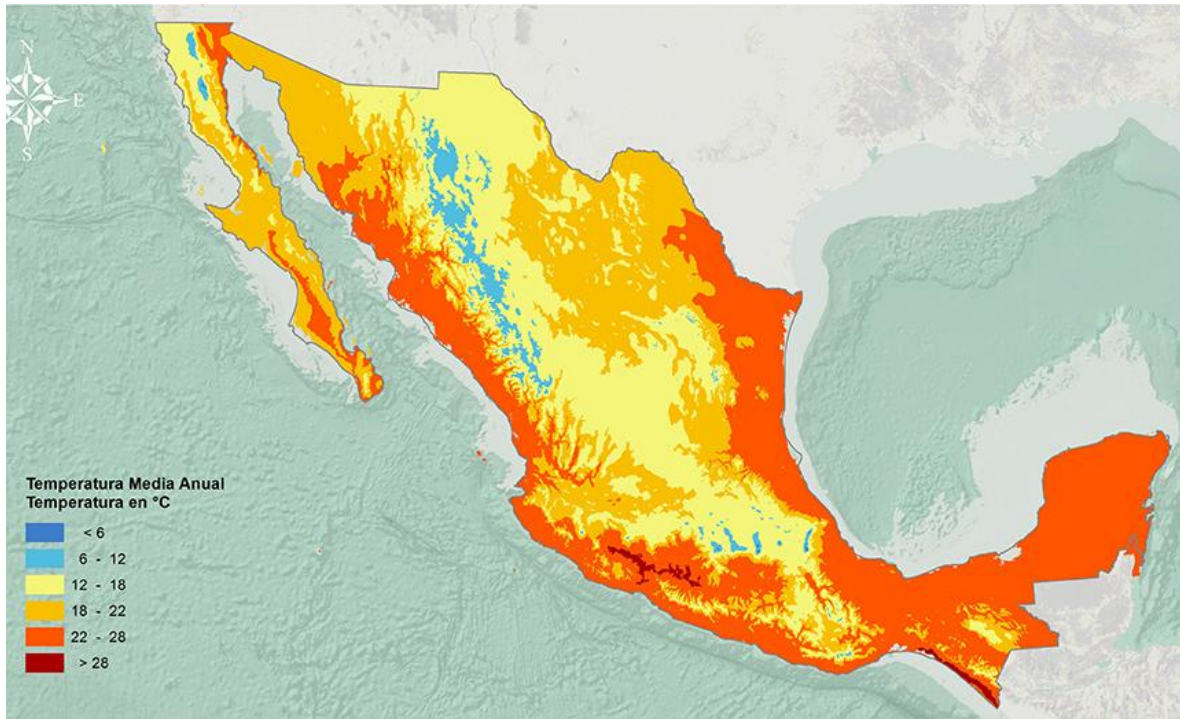
En México el clima está determinado por diversos factores, como la altitud, la latitud, entre otros. Como se puede ver en la figura 9, se identificaron 7 grandes tipos de clima en el territorio nacional, destacando con mayor extensión los climas cálido Subhúmedo con 28.67% del territorio, Seco y Semiseco representando 32.02%, y 21.09% corresponde a zonas con clima Muy Seco o Seco Desértico; con menor superficie los climas: Cálido Húmedo (6.94%), Templado subhúmedo

(10.36%), Templado Húmedo (0.69%) y Frío con la mínima superficie representando el 0.03% (SEMARNAT, 2015).



**Figura 9.** Mapa tipo de climas en México.  
Fuente: SEMARNAT, 2015.

Las temperaturas medias anuales oscilan entre los -6 hasta los 30°C. La mayor parte del territorio mexicano tiene temperaturas medias que se encuentran en el intervalo de 22 – 28 grados centígrados representando 35.42%, seguida por la de 18 a 22°C (32.42%) y 12 - 18°C (28.91%); entre las de menor incidencia están las de 6 -12 °C, < 6 y > 28 siendo 2.97%, 0.02% y 0.52% respectivamente, como se muestra en la figura 10.



**Figura 10.** Mapa temperatura Media Anual, Escala 1:1.000 000, México  
Fuente: SEMARNAT, 2015.

De acuerdo a Luna (2008), el calor y la sequedad extrema inciden en forma importante en las condiciones fisiológicas de los habitantes del sitio. Las personas que habitan en climas cálidos secos, se sienten en condiciones confortables cuando su cuerpo es capaz de disipar todo el calor que recibe, en el que se incluye el calor perdido por evaporación de la piel y del sistema respiratorio. El confort térmico en lugares cálidos secos, se puede encontrar cuando la temperatura media de la piel está por debajo de  $34^{\circ}\text{C}$  y sobre  $31^{\circ}\text{C}$ .

Una de las principales causas de la incomodidad dentro de los edificios en lugares cálidos secos es la energía del sol que incide en techos y muros, además de la que incide por ventanas para después aportar energía al edificio. Ante esto, es deseable y posible disminuir la temperatura al interior de la edificación por debajo de la temperatura exterior durante las horas de día, al minimizar las ganancias de calor provenientes del ambiente exterior durante el periodo de verano en clima cálido seco (Givoni, 1994).

La solución a este problema implica la búsqueda de elementos de protección, mediante los cuales se sombrean las construcciones que quedan expuestas al impacto de la radiación solar en el periodo cálido (Luna, 2008). Para esto, el diseñador y planificador de la edificación deberá tener un amplio conocimiento de los aspectos climáticos del lugar, pues los elementos pasivos de una fachada son altamente sensibles a factores meteorológicos (Rodríguez y cols., 2018).

En este tipo de clima el bienestar se asegura con una construcción aislada, masiva o ligera, en la que la ventilación sea importante y los huecos exteriores (puertas y ventanas) estén bien orientados y sombreados, pero para lograrlo se requiere un diseño cuidadoso y la planificación del sitio para la mejor orientación (De Ignacio y cols., 2018).

### **3.3 Escenarios de cambio climático (SSP-RCP)**

De acuerdo a la ONU, el cambio climático se refiere a los cambios a largo plazo de temperaturas y patrones climáticos. Estos pueden ser de origen natural, como erupciones volcánicas grandes o variaciones en la actividad solar, sin embargo, desde finales del siglo XIX las actividades humanas se han convertido en la principal causa de cambio climático debido principalmente a la quema de combustibles fósiles, como el carbón, el petróleo y el gas. Esto ha hecho que aumente la temperatura promedio de la superficie del planeta aproximadamente a 2 F (1 °C), y las emisiones de dióxido de carbono por los humanos.

Las trayectorias socioeconómicas compartidas (Shared Socioeconomic Pathways, SSP por sus siglas en inglés) son cinco escenarios que describen futuros alternativos de desarrollo socioeconómico para el mundo en el año 2100. Estos escenarios comprenden escenarios de alta prioridad para el Sexto Informe de Evaluación del IPCC, que es el grupo de cuatro escenarios de “Nivel 1” destacados en ScenarioMIP (Scenario Model Intercomparison Project).

La comunidad científica internacional ha definido cinco trayectorias: SSP1 (Desarrollo sostenible), SSP2 (Tendencia intermedia), SSP3 (Rivalidad regional), SSP4 (Desigualdad) y SSP5 (Desarrollo impulsado por combustibles fósiles). Cada una se distingue por el nivel de dificultad que plantea para mitigar o adaptarse al cambio climático. SSP1 plantea pocos desafíos en ambos ámbitos gracias al énfasis en el bienestar social y las energías limpias, mientras que SSP3 presenta grandes obstáculos debido a su dependencia de los combustibles fósiles y a un enfoque político centrado en intereses regionales. SSP4 combina pocas dificultades para mitigar, pero muchas para adaptarse, y SSP5 muestra el patrón inverso: altas barreras para mitigar por su uso intensivo de combustibles fósiles, pero pocas para adaptarse. SSP2 representa un camino intermedio con desafíos moderados.

Dentro de un mismo SSP pueden existir múltiples escenarios climáticos con diferentes niveles de forzamiento radiativo, dependiendo de la ambición de las políticas de mitigación. Los escenarios “base” o “de referencia” representan el desarrollo futuro sin políticas adicionales de mitigación, y a partir de ellos se generan escenarios orientados a cumplir metas específicas.

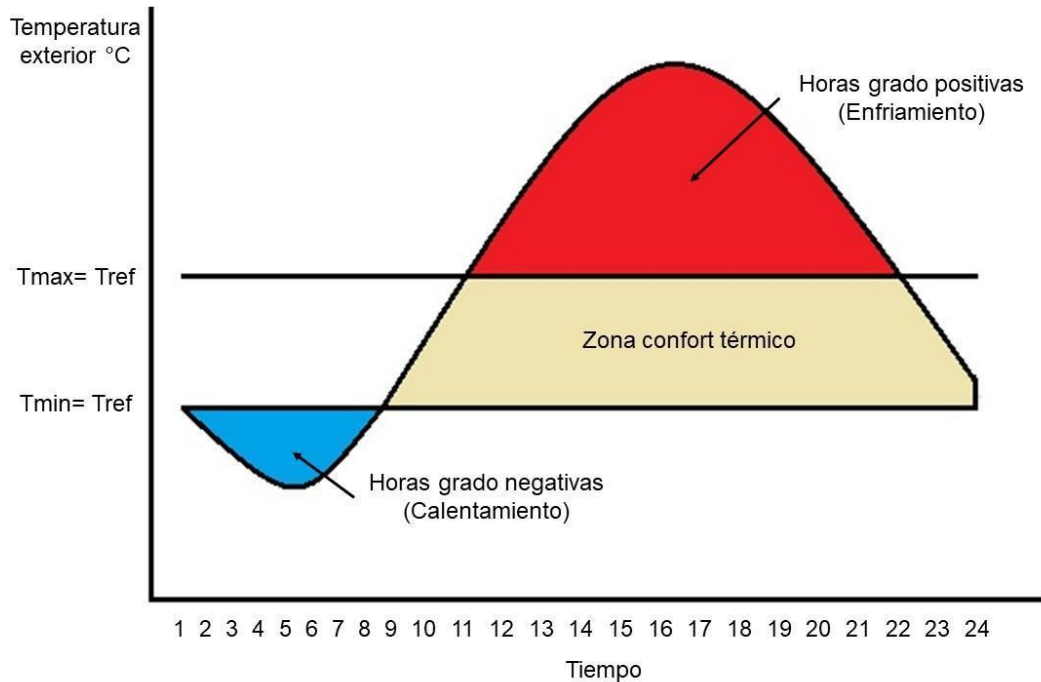
Los escenarios basados en SSP fueron empleados en los experimentos climáticos más recientes del proyecto CMIP6, que fundamentan las evaluaciones del Sexto Informe del IPCC (AR6). Entre los escenarios priorizados se encuentran SSP1-1.9 (cercano al objetivo de 1.5 °C del Acuerdo de París), SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, los cuales abarcan un amplio rango de futuros climáticos plausibles.

En concreto, estos escenarios de “alta prioridad” para el AR6 del IPCC son, en primer lugar, el escenario de 2 °C SSP1-2.6 de la familia socioeconómica SSP1 de “sostenibilidad”, cuyo nivel de forzamiento radiativo nominal en 2100 es de 2.6 W/m<sup>2</sup>. Este escenario SSP1-2.6 corresponde aproximadamente a la Vía de Concentración Representativa (RCP) 2.6 de la

generación anterior del escenario. En segundo lugar, el SSP2-4.5 de la familia socioeconómica “intermedia” SSP2 con un nivel de forzamiento radiativo nominal de  $4.5 \text{ W/m}^2$  para 2100, que corresponde aproximadamente al escenario RCP-4.5. En tercer lugar, el escenario SSP3-7.0 es un escenario de referencia medio-alto dentro de la familia socioeconómica de “rivalidad regional”, mientras que el escenario final de Nivel 1, SSP5-8.5, marca el borde superior del espectro de escenarios SSP con un escenario de referencia alto en Un mundo con alto desarrollo de combustibles fósiles a lo largo del siglo XXI (Meinshausen et al., 2020).

### **3.4 Horas Grado de Enfriamiento (HGE)**

El método HGE mide el efecto de la temperatura exterior local y su duración en un período de tiempo, estimando el impacto en el consumo eléctrico de edificios climatizados y la energía necesaria para mantener el confort interior cuando la temperatura supera un umbral base. Este tiene en cuenta tanto las desviaciones de temperatura como la duración de estas variaciones a lo largo del día, lo que lo convierte en un modelo más preciso para evaluar la temperatura ambiente por hora y las necesidades energéticas de los sistemas de aire acondicionado a lo largo del año (Fig. 11).



**Figura 11.** Método HGE, el efecto de la temperatura exterior local, la duración de esta temperatura durante un cierto período de tiempo.

En México, el método HG ha sido validado por Pérez Tello et al. (2018), quienes correlacionaron el método con registros históricos de temperatura ambiente exterior y consumo eléctrico, utilizando una función de Fourier expresada en la ecuación 1, donde  $T(t)$  representa la temperatura ambiente para la hora  $t$  del día (ecuación 2), con parámetros ajustados específicamente para cada municipio evaluado ( $\mu$ ,  $A$  y  $B$ ).

$$T(t) = \langle \mu \rangle + A \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) + B \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right); t=1, 2, 3 \dots 24 \quad (1)$$

Donde  $T(t)$  representa la temperatura exterior adimensional por hora para un día concreto definido en la ecuación (2),  $T_{max}$  y  $T_{min}$  son la temperatura máxima y mínima registradas y  $T(t)$  es el valor calculado de la temperatura para el tiempo  $t$ .

$$T(t) = \frac{T_{max} - T(t)}{T_{max} - T_{min}} \quad (2)$$

$\langle\mu\rangle$ , A y B son el valor promedio y los dos coeficientes de correlación dados por lo siguiente:

$$\langle\mu\rangle = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \mu(t) \quad (3)$$

$$\mu(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N T_n(t), \quad n=1,2, \dots, N \text{days} \quad (4)$$

$$A = \frac{2}{24} \sum_{t=1}^{24} [\mu(t) - \langle\mu\rangle] \cos\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \quad (5)$$

$$B = \frac{2}{24} \sum_{t=1}^{24} [\mu(t) - \langle\mu\rangle] \sin\left(\frac{2\pi t}{24}\right) \quad (6)$$

El modelo de tipo Fourier simplifica el cálculo de las HG al permitir que la integración se realice solo una vez, utilizando el modelo obtenido previamente y sustituyendo los valores apropiados de  $\langle\mu\rangle$ , A y B para la ubicación de interés, evitando así la necesidad de integrar los datos cada vez. Por lo tanto, las HG se define en la ecuación (7), donde  $T_0$  es la temperatura de referencia y T es la temperatura exterior.

$$DH = \int_{T_0}^T \int_0^{24} T(t) dt dT \quad (7)$$

Al sustituir las ecuaciones 1 y 2 en la ecuación 3 e integrar, se obtiene la ecuación 8.

$$DH = 24 \left[ (T_{\max} - T_0) - \langle\mu\rangle (T_{\max} - T_{\min}) \right] \quad (8)$$

Este método de HG se ha aplicado en varios proyectos centrados en el ahorro energético y el uso eficiente (Bolattürk, 2008; Lyu et al., 2021; Magaña Almaguer et al., 2016; Oktay et al., 2011; Park et al., 2021; Pérez-Tello et al., 2018; Salata et al., 2022; Suástegui Macías et al., 2018), estableciendo una metodología para determinar y caracterizar el rendimiento energético del sector residencial en determinadas regiones de México, en particular aquellas con un clima cálido y seco. Sin embargo, los modelos tradicionales, incluidos los basados en esta formulación, acumulan HGE cada vez que la temperatura ambiente supera un umbral fijo, sin tener en cuenta el intervalo de tiempo real durante el cual se utilizan realmente los sistemas de aire acondicionado. Este enfoque de acumulación continua puede dar lugar a sobreestimaciones de la demanda de refrigeración,

especialmente en climas con fuertes fluctuaciones diarias de temperatura o en los que los ocupantes adaptan su comportamiento de refrigeración en función de las diferentes necesidades de confort.

Para superar esta limitación, el presente estudio propone una formulación mejorada de las horas-grado de refrigeración (HGE) que introduce la integración de umbrales de temperatura de adaptación específicos para cada clima, derivados de estudios internacionales y nacionales sobre confort, y la introducción de un modelo de activación selectivo basado en el tiempo, que calcula las CDH solo durante el período real en el que la temperatura ambiente supera el umbral adaptativo. Esto se hace analíticamente resolviendo los puntos de intersección entre la curva de temperatura y el umbral adaptativo, definiendo así una ventana operativa diaria para el uso del aire acondicionado.

Esto permite simular la demanda de refrigeración con mayor realismo en cuanto al comportamiento y variabilidad climática. De este modo, se abordan las deficiencias de los modelos HG de umbral fijo, ofreciendo una alternativa para modelar el consumo eléctrico residencial en diversos municipios mexicanos.

### **3.5 Sistemas constructivos de viviendas**

Las fuerzas térmicas que actúan en el exterior de una edificación son una combinación de los impactos por convección y por radiación. La radiación actúa a través de la radiación solar directa y el intercambio de calor con la temperatura del aire del entorno, mientras que la convección actúa en función del intercambio con la temperatura circundante y puede acelerarse a través del movimiento del aire (Guimarães, 2008).

La capa externa de muros presenta una temperatura superficial mayor que la del aire a su alrededor debido a este asoleamiento directo. Es por ello que la envolvente de una edificación

funciona como barrera a los impactos caloríficos externos, evitando que estos impactos perjudiquen las condiciones de temperatura interior al traspasar los muros de la edificación.

Los muros representan un porcentaje significativo con respecto a la envolvente total en una vivienda, por lo que la selección inadecuada al clima de los sistemas constructivos afecta notoriamente en las condiciones de habitabilidad y el uso de equipos electromecánicos para tener condiciones de confort térmico (García y cols., 2017). Los recubrimientos de absorción y emisión selectivos constituyen una defensa eficaz contra dichos impactos en las superficies.

Los materiales selectivos fríos producen temperaturas más bajas dentro de la edificación al reflejar más radiación de la que absorben y expeler rápidamente la cantidad absorbida en forma de radiación térmica. Siempre que una superficie esté expuesta directamente a la radiación solar, la elección de superficies reflectoras ayuda en este sentido, los materiales blancos pueden reflejar el 90% o más de radiación recibida, mientras que los negros solamente 15% o menos, por esto la importancia de elegir colores claros para edificaciones en climas calurosos (Guimarães, 2008).

Existen indicadores que determinan el comportamiento térmico de los muros o paredes que protegen los espacios habitados, como la inercia térmica y la conductividad térmica (resistencia térmica). Esta última se refiere a la dificultad de un material al paso de calor, donde influyen el espesor y la conductividad térmica del material. A menor conductividad térmica de un material, mayor es su resistencia al paso del calor y se los conoce como aislantes térmicos (Muñoz Carrillo & Prado Pozo, 2019).

La inercia térmica, se puede decir que es la capacidad que tiene la masa de los materiales de conservar la energía térmica recibida y liberarla progresivamente. Se ha demostrado tener una relación con la densidad, el calor específico, la conductividad térmica y el espesor de los materiales

empleados en la construcción de edificaciones. Estas condiciones tienen efectos en los cambios en la temperatura en el interior de las viviendas.

El impacto de la inercia térmica es mediante el efecto de desfase en el tiempo, representando el tiempo de retardo entre las temperaturas máximas exteriores e interiores, es decir, es la medida del grado de rapidez o lentitud que ocurra un cambio de la temperatura exterior ocasionando un cambio de la temperatura interior.

También se debe al efecto de amortiguación, en qué medida disminuye la fluctuación de la temperatura interior en comparación con la temperatura exterior (Muñoz Carrillo & Prado Pozo, 2019).

Los materiales con considerable masa térmica se emplean para amortiguar las temperaturas exteriores y alcanzar temperaturas internas moderadas, lo cual mejora el nivel de habitabilidad y confort de la vivienda.

Los sistemas constructivos representativos de la ciudad según (García Haro et al., 2011) son: 1) Bloque de concreto común 0.12m, 2) Ladrillo común 0.13m, 3) Tridipanel 2" (0.0508m), 4) Insulpanel 2" (0.0508m), 5) Tablaroca ½" (0.0127m) con fibra de vidrio, 6) FoamBlock y 7) Adobe 0.40m.

### **3.6 Método de simulación energética**

La simulación energética es un método de cálculo computacional que permite evaluar el desempeño energético de los edificios, de acuerdo con sus propiedades arquitectónicas, sus condiciones de uso y las características climáticas del sitio (Sol-Arq, 2012). En ese sentido, estas pueden ser muy útiles para conocer el impacto del diseño respecto a variables como la forma, la orientación, la cantidad y tipo de acristalamiento, el uso de dispositivos de sombreado, el nivel de aislamiento o la configuración de los sistemas de climatización, etc.

La simulación energética de edificios surge de la necesidad de herramientas computacionales que permitan analizar sistemas energéticos multivariables, específicamente los relacionados a las edificaciones (Castro Da Silva, 2017). Investigaciones hacen uso de estos programas de simulación energética para cuantificar la importancia de los parámetros constructivos y de diseño de edificios, así como para su optimización.

El uso de herramientas de simulación que predigan el desempeño de los edificios es muy importante, pues ayudan a determinar la influencia de factores internos y externos. Los principales pasos a tomar en cuenta para el uso de simulación térmica son: la construcción del modelo a estudiar, especificar las características y propiedades de los materiales de construcción, establecer las condiciones a las que el modelo está sometido y especificar las variables de salida que se desean estudiar (Muñoz Carrillo & Prado Pozo, 2019).

Muchos de los programas de simulación fueron desarrollados con apoyos gubernamentales como es el caso de Energy Plus, TRNSYS, DOE-2, entre otros, y han sido evaluados en estudios. En un estudio realizado por (Crawley et al., 2008) se evaluó el desempeño de veinte programas de simulación energética, donde muestran una comparación de las características de cada uno.

Encontraron que el programa EnergyPlus es uno de los programas de simulación térmica más completos con herramientas útiles para el análisis del estado termo-físico de viviendas separadas por habitaciones o zonas, pues implementa un balance energético que incluye cálculos de conducción y convección dentro de los espacios. Este programa permite evaluar el confort térmico, masa térmica, convección en paredes internas, por mencionar algunos, además de ser un software de libre acceso creado por el departamento de energía de Estados Unidos (Muñoz Carrillo & Prado Pozo, 2019).

## Capítulo 4. Materiales y métodos

En este capítulo se describen con detalle las actividades, instrumentos, ecuaciones y criterios utilizados para el desarrollo de esta investigación, es decir, se establece el procedimiento para obtener, organizar y evaluar la información.

### 4.1 Características de la investigación

#### 4.1.1 Enfoque y diseño de estudio

La selección del enfoque de estudio se basa en los objetivos, la disponibilidad de datos y los recursos disponibles para la investigación. El proyecto de investigación cumple con las características de un estudio con enfoque cuantitativo, al recolectar datos para probar hipótesis con base en registros numéricos y análisis estadístico, con el fin de establecer pautas de comportamiento y teorías (Hernández Sampieri et al., 2014). Es un enfoque integral y multidisciplinario que combina análisis de datos y modelado, proporcionando una mejor comprensión de los efectos del aumento de temperatura global en el consumo eléctrico del sector residencial en México y la eficacia de las acciones de eficiencia energética para mitigar estos efectos.

Este trabajo sigue un proceso sistemático para lograr evaluar los efectos en el consumo eléctrico del sector doméstico de México al aplicar acciones de eficiencia energética. Inicialmente, se caracteriza la vivienda típica a partir de estadísticas nacionales, como censos, reportes e investigaciones previas sobre sistemas constructivos, equipamiento y hábitos de uso energéticos de este sector. Posteriormente, se ingresan las características en sistemas computacionales que reproducen el comportamiento termo eléctrico de las viviendas en distintas localidades del país y se proponen acciones de eficiencia energética. Finalmente, se determina el potencial de ahorro energético y económico de dichas acciones a corto y mediano plazo, considerando cambios de la

temperatura ambiental. A continuación, se presenta en la Fig.12 la metodología empleada durante la investigación.



**Figura 12.** Resumen gráfico de la metodología empleada en la investigación

#### 4.1.2 Población de estudio

Al tratarse de un proyecto de evaluación del desempeño en el consumo eléctrico aplicando distintas acciones de eficiencia energética en el sector doméstico de México, la población de estudio seleccionada para esta investigación son los usuarios domésticos del servicio eléctrico residencial ubicados en distintas localidades del país. El estudio se centra específicamente en los hogares o viviendas, explorando de qué manera las acciones de eficiencia energética influyen en el consumo eléctrico de este sector. Se consideran los usuarios que cuentan con las tarifas domésticas mencionadas en la sección 2.2 de este documento, según los registros nacionales de usuarios residenciales.

#### 4.1.3 Universo de estudio

Considerando los recursos disponibles, el campo de aplicación de la investigación es en el sector residencial de las localidades de México con 50,000 o más habitantes, utilizando datos del INEGI (2020), los cuales se clasifican como zonas urbanas según este organismo. Además, se

identifica el tipo de clima correspondiente a cada municipio (INEGI, 2018b). La selección de estos municipios busca áreas donde las variaciones en las condiciones climáticas puedan tener un impacto más significativo en el consumo de energía. Este estudio considera a los usuarios domésticos de 445 localidades de México con dichas características para cuantificar el impacto actual y futuro en el consumo de energía eléctrica de la implementación de estrategias de eficiencia energética en las viviendas. Estos usuarios pertenecen a las tarifas domésticas que como se mencionó en la sección 2.2 de antecedentes, son las tarifas 1 a la 1F dependiendo la temperatura promedio mínima en verano.

Una de estas regiones con clima seco es la ciudad de Mexicali, que según datos de la Comisión Federal de Electricidad (CFE), en 2019 contaba con un total 364,137 usuarios con servicio de energía para uso doméstico. De los cuales 91 en tarifa doméstica de alto consumo, conocida como la tarifa DAC, y 364,046 usuarios en tarifa (CFE, 2017).

Esta diversidad convierte a la población urbana en la unidad idónea para proyectar la demanda eléctrica futura y evaluar el impacto de las medidas de eficiencia energética. Además, los municipios urbanos son aquellos donde la climatización mecánica, especialmente el uso de aire acondicionado, tiene mayor presencia y crecimiento, lo cual es central para el análisis basado en HGE.

#### *4.1.4 Tamaño de muestra*

Determinar el tamaño de la muestra constituye el primer paso para garantizar la validez estadística de los resultados de este estudio. Se aplicó la ecuación (9) propuesta por Hernández Sampieri (2014) para poblaciones finitas. Este método garantiza la validez estadística al tener en cuenta el nivel de confianza, el margen de error y la proporción estimada de la población. La ecuación es la siguiente:

$$n = \frac{NZ^2p(1-p)}{Z^2p(1-p) + (\Delta - p^2)(N-1)} \quad (9)$$

donde  $n$  es el tamaño de la muestra requerida,  $N$  es el tamaño de la población finita (445 municipios de México clasificados como urbanos por el INEGI, cada uno con una población superior a 50,000 habitantes),  $Z$  es el nivel de confianza deseado (1.645 para el 90 %),  $p$  es la proporción estimada de municipios de interés (0.143, correspondiente a la presencia de las siete tarifas eléctricas residenciales actualmente vigentes en el país) y  $\Delta$  es el margen de error aceptado (0.10 o 10 %). Se seleccionó el nivel de confianza del 90 % como equilibrio entre el rigor estadístico y las limitaciones prácticas de disponibilidad de datos y recursos de modelización. Estos parámetros garantizaban que la muestra captara adecuadamente la diversidad de condiciones climáticas y normativas que afectan al consumo de electricidad en México.

Bajo estos criterios, se obtuvo una muestra representativa mínima de 31 municipios. Sin embargo, para garantizar una representación equilibrada en todas las zonas tarifarias eléctricas, la muestra se amplió a 35 municipios, seleccionando 5 por tipo de tarifa. Este enfoque de muestreo estratificado refuerza la diversidad geográfica y normativa del análisis, lo que permite realizar comparaciones de simulación más sólidas entre diferentes contextos climáticos y de precios de la electricidad (véase la tabla 6).

Sin embargo, para asegurar una representación equilibrada de las zonas tarifarias, la muestra fue ampliada a 35 municipios, seleccionando cinco localidades por cada una de las siete tarifas domésticas (1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F). Este diseño de muestreo estratificado por clima y tarifa eléctrica fortalece la diversidad regional del análisis y permite comparar el comportamiento energético entre distintas regiones del país bajo escenarios climáticos proyectados a 2050 y 2080.

La muestra final, por tanto, garantiza la representatividad de los tres tipos de clima presentes en el sector doméstico (cálido, seco y templado), las siete zonas tarifarias, las características constructivas y demográficas predominantes en la vivienda urbana mexicana.

Este enfoque metodológico asegura que los resultados obtenidos sean robustos, comparables y útiles para evaluar tanto la vulnerabilidad climática del consumo eléctrico residencial como el potencial de ahorro derivado de la implementación de acciones de eficiencia energética en el país.

Con el propósito de equilibrar el total de municipios, se consideran cinco por cada tarifa eléctrica dando como resultado una muestra de 35 municipios (véase Tabla 6). Como consumo base de la vivienda se considera un mínimo de 1,174 kWh/año, el cual representa la energía usada para abastecer electrodomésticos y luminarias que se consideran cargas base (sin incluir el A.A.) en las viviendas. Las localidades seleccionadas para cada tarifa doméstica se muestran en la Tabla 6. Lista de municipios por tarifa eléctrica con una población de al menos cien mil habitantes o más en 2020 (INEGI, 2020).

**Tabla 6.** Listado de localidades por tarifa  
Elaboración propia con base en (INEGI, 2020)

Municipio	Tarifa	Habitantes	Municipio	Tarifa	Habitantes
Aguascalientes, Ags.	1	948,990	Cadereyta Jiménez, N.L.	1C	122,337
Cuauhtémoc, Chih.	1	180,638	Monterrey, N.L.	1C	1,142,994
Durango, Dgo.	1	688,697	Victoria, Tamps.	1D	349,688
Morelia, Mich.	1	849,053	Navolato, Sin.	1D	149,122
San Miguel de Allende, Gto.	1	174,615	Mazatlán, Sin.	1D	501,441
Hidalgo del Parral, Chih.	1A	116,662	Mérida, Yuc.	1D	995,129
Cuautla, Mor.	1A	187,118	Matamoros, Tamps.	1D	541,979
Rioverde, S.L.P.	1A	97,943	Macuspana, Tab.	1E	158,601
Matehuala, S.L.P.	1A	102,199	Acuña, Coah.	1E	163,058
San Andrés Tuxtla, Ver.	1A	162,428	Navojoa, Son.	1E	164,387
Puerto Vallarta, Jal.	1B	291,839	Río Bravo, Tamps.	1E	132,484
Villa de Alvarez, Col.	1B	149,762	Guasave, Sin.	1E	289,370
Chihuahua, Chih.	1B	937,674	Nuevo Laredo, Tamps.	1F	425,058

Colima, Col.	1B	157,048	Ahome, Sin.	1F	459,310
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	1B	604,147	Hermosillo, Son.	1F	936,263
San Nicolás de los Garza, N.L.	1C	412,199	Cájeme, Son.	1F	436,484
Juárez, Chih.	1C	1,512,450	Mexicali, B.C.	1F	1,049,792
San Luis Río Colorado, Son.	1C	199,021			

## 4.2 Recopilación de información

Se lleva a cabo una revisión inicial de la literatura sobre ahorro y uso eficiente de energía, cambio climático y acciones de eficiencia energética aplicadas al sector residencial en clima cálido, seco y templado como apoyo al planteamiento del problema de este proyecto. Las principales referencias utilizadas para esta etapa fueron artículos científicos publicados, así como libros, tesis, disertaciones, reportes y registros nacionales.

El enfoque cuantitativo implica la recopilación de datos numéricos, su análisis y la generación de conclusiones basadas en evidencia cuantificable. En este estudio, se utilizan registros de mediciones de consumo de electricidad para los usuarios del sector doméstico, estadísticas sobre las características constructivas y de los equipos eléctricos en las viviendas del país, así como de la implementación de acciones de eficiencia energética, proyecciones basadas en modelos climáticos y análisis de datos cuantitativos para evaluar el desempeño y prever el impacto en el consumo eléctrico. Este enfoque es típico en estudios que buscan obtener resultados numéricos sólidos para respaldar las conclusiones y recomendaciones. Se identificaron municipios de México con más de 50,000 habitantes y el tipo de clima para cada uno de ellos utilizando datos de INEGI. Los datos climáticos de las distintas localidades se recopilaron a partir de registros históricos de la base de datos del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) para obtener las temperaturas horarias del año 2019 de cada una, así como registros nacionales del total de usuarios domésticos y consumo de energía mensual, los cuales se obtuvieron de la plataforma del Sistema de Información Energética (SIE) con el fin de actualizar la información en el simulador energético y clasificar por tipo de tarifa cada localidad.

#### 4.2.1 Caracterización de la vivienda

Las características constructivas de la vivienda mexicana promedio se definieron utilizando datos de dos importantes fuentes nacionales: el Censo de Población y Vivienda (CPV) 2020 y la Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) 2020 (INEGI; INFONAVIT & SHF, 2020), ambas realizadas por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). Estas encuestas implicaron visitas presenciales a hogares en los casi dos millones de kilómetros cuadrados de México, recopilando información actualizada y representativa sobre los materiales de construcción, el tamaño de los hogares y las condiciones de vida (Fig. 13).

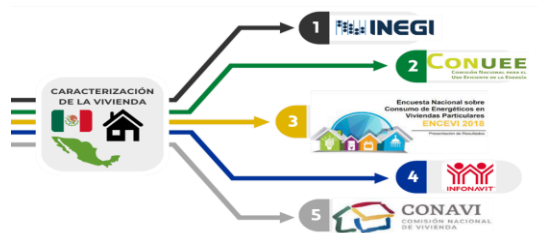


Figura 13. Diagrama de caracterización de la vivienda

Según el censo de 2020, el 92 % de las viviendas tienen paredes de ladrillo, bloque o hormigón, y el 79 % tienen techos de losa o hormigón. La mayoría de las viviendas tienen una superficie construida de entre 56 y 100 m<sup>2</sup>, dos habitaciones (42 %) y más de 11 años de antigüedad (75 %). Además, solo el 1.5 % de las viviendas cuentan con algún tipo de aislamiento térmico. Estos resultados respaldan la selección de tipologías representativas para la simulación energética, incluidas las viviendas de una planta y 60 m<sup>2</sup> con envolventes de ladrillo y hormigón, que se ajustan a los patrones de construcción predominantes en las viviendas con aire acondicionado de todo el país (Tabla 7).

**Tabla 7.** Características modelo de la vivienda típica mexicana

Características	Vivienda en México
Superficie total climatizada	60 m <sup>2</sup>
Material de muros	Bloque de concreto de 15 cm de espesor, con acabado interior y exterior

Material del techo	Losa de concreto de 10 cm de espesor, con acabado interior y pintura reflectiva exterior
Área de ventanas	4.7 m <sup>2</sup>
Área de puertas	4 m <sup>2</sup>
Potencia de iluminación	190 W
Equipo de aire acondicionado	Mini Split de 2 ton
EER	10
Temperatura de termostato	23 °C
Ocupación de habitantes	3 personas, 24 h/día

La información recopilada sobre la presencia y el uso de electrodomésticos en los hogares a nivel nacional se obtuvo de la Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018(INEGI, 2018a), que muestra que el televisor es el dispositivo más utilizado en el hogar. En cuanto a la iluminación, se consideró la tecnología más utilizada en el momento de la encuesta (lámparas fluorescentes de bajo consumo). Los tiempos de funcionamiento de los electrodomésticos se determinaron en función de los patrones de distribución de uso más representativos. En algunos casos, la encuesta identificó la tecnología específica más utilizada para un determinado electrodoméstico (por ejemplo, televisores LCD), junto con los perfiles de uso típicos por hora diferenciados por región climática. La tabla 8 resume los principales electrodomésticos y sus tiempos medios de funcionamiento diario en un hogar mexicano típico. Con base en los datos mencionados en el apartado 2.1.1, se consideran los aparatos, materiales y tiempos de uso con mayor porcentaje de presencia en el país para definir las características del modelo de la vivienda típica en México a utilizar en esta investigación. Dichas características se describen en la tabla 8.

Tabla 8. Electrodomésticos comunes y uso diario promedio en México

Equipo	Potencia (W)	Horas de uso diario (h/day)	Factor de uso
Refrigerador (chico, nuevo)	128	24	0.3
Televisión	105	2	1
Ventilador de pedestal	65	5	0.45
Radio	40	2	0.4
Plancha	1000	36 min (en uso)	0.06
Lavadora	400	3 (en uso)	0.05

Para definir el consumo eléctrico básico de las viviendas residenciales, se estimó una carga diaria de 3.14 kWh/día, lo que corresponde a un total anual de 1,146 kWh/año para los electrodomésticos generales. Este valor se obtuvo a partir de un cálculo detallado utilizando la potencia nominal, el tiempo de uso y factores de uso realistas para aparatos domésticos comunes, como refrigeradores, televisores, radios, planchas, lavadoras y sistemas de iluminación (Tabla 3). Estas estimaciones se basan en datos a nivel nacional del INEGI, la CONUEE y la ENCEVI (O. de Buen, 2019; O. (Conuee) de Buen & Navarrete, 2018; INEGI, 2018d, 2020a). Se incluyeron 0.146 kWh/día, adicionales de un ventilador de pedestal solo para los meses de la temporada cálida (de mayo a octubre, 184 días), lo que supone 27 kWh/año. Esto da como resultado un consumo eléctrico base total de 1,174 kWh/año, que se utilizó como valor predeterminado para todas las simulaciones sin uso del aire acondicionado.

El simulador de cargas térmicas se actualiza con la información necesaria para cada municipio (datos climáticos y coeficientes  $m$ ,  $A$  y  $B$ ), y se registran las características de la vivienda típica que se indican en la tabla 2 y la tabla 3. Utilizando el simulador de carga térmica que ha sido validado durante más de 35 años según Suástegui Macías (2014), se reproduce el comportamiento energético de la vivienda, aplicando el método de la función de transferencia propuesto por la Sociedad Americana de Ingenieros de Calefacción, Refrigeración y Aire Acondicionado (ASHRAE), así como los criterios HG para determinar la capacidad de refrigeración, la tasa de eliminación de calor y el consumo eléctrico de un recinto acondicionado.

Este estudio se realizó en una vivienda típica de México; sin embargo, es necesario señalar que la función HGE puede utilizarse en cualquier tipo de edificio que requiera el uso de equipos de aire acondicionado para la refrigeración. Solo se requieren las temperaturas máximas y mínimas diarias y los coeficientes ( $\mu$ ,  $A$  y  $B$ ) del lugar donde se utiliza.

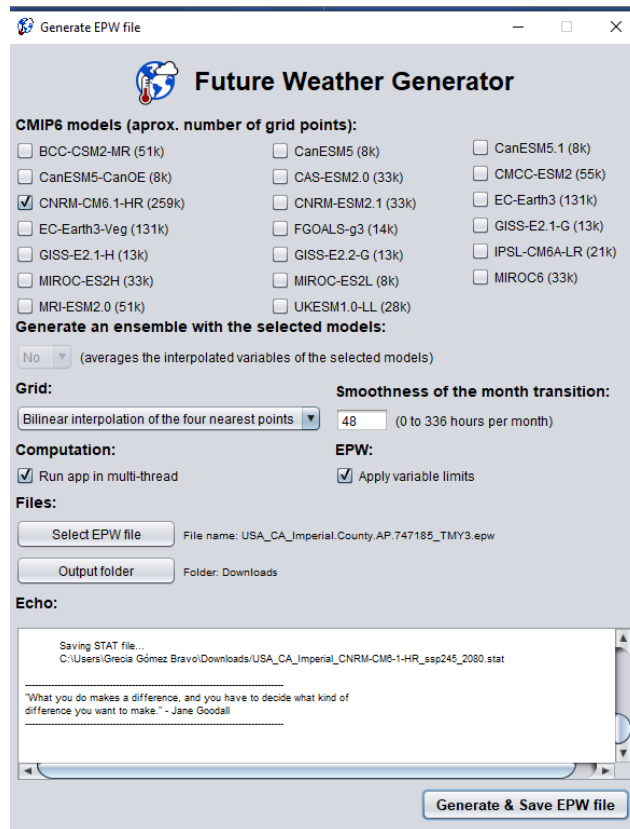
#### *4.2.2 Datos climáticos históricos*

La recopilación de datos climáticos históricos se hace utilizando la base de datos del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL) para las localidades seleccionadas, específicamente temperaturas horarias de un periodo de tiempo de 20 años (2000-2020), así como registros nacionales de usuarios residenciales y consumo de energía de cada localidad encontrada en la plataforma del Sistema de Información Energética (SIE). La información se distribuye para las 35 localidades, ubicadas en las tres zonas climáticas mencionadas de la república mexicana.

Los registros históricos de temperaturas se utilizan para calcular las HGE y realizar proyecciones de temperaturas futuras utilizando estadística. Con estos datos también se actualiza el simulador energético de (Pérez Tello et al., 2018) estimando los parámetros térmicos  $\mu$ , A y B de cada localidad, y para evaluar la variabilidad climática por localidad.

#### *4.2.3 Proyecciones climáticas bajo escenarios de cambio climático SSP*

Para crear datos meteorológicos futuros y poder evaluar el rendimiento energético futuro de la vivienda base en México, se utiliza el software Future Weather Generator Es una aplicación Java para investigadores y profesionales del diseño de edificios. La aplicación transforma archivos EPW cada hora para que coincidan con escenarios futuros de cambio climático utilizados en programas de simulación dinámica como EnergyPlus. La aplicación es gratuita, de código abierto y multiplataforma. Los investigadores pueden utilizar la aplicación como herramienta independiente o integrarse en su código de investigación. Los profesionales del diseño de edificios también pueden utilizar esta aplicación para crear datos meteorológicos futuros para evaluar el rendimiento energético futuro de un edificio (Rodrigues et al., 2023). Se muestra la pantalla de inicio en la figura 14.



**Figura 14.** Future Weather Generator pantalla inicio

Es una herramienta de transformación para investigadores con datos numéricos climáticos de última generación, una resolución de cuadrícula más fina, un mejor método de interpolación espacial, una mayor cantidad de variables de transformación y una mayor cantidad de cambios climáticos actualizados, escenarios y períodos de tiempo (incluidos los años más cálidos y más fríos, además del año típico).

Este utiliza los datos GCM (modelo de circulación general) más recientes y de última generación, lo que se traduce en una mayor precisión y una resolución de cuadrícula más fina, además de utilizar el método morphing. Este método morphing transforma matemáticamente el clima actual para que coincida con las variables proyectadas de un escenario de cambio climático a partir de modelos numéricos que representan los procesos físicos en la atmósfera, el océano, la criosfera y la superficie terrestre (GCM, RCM-modelo climático regional.) (Fig. 15)

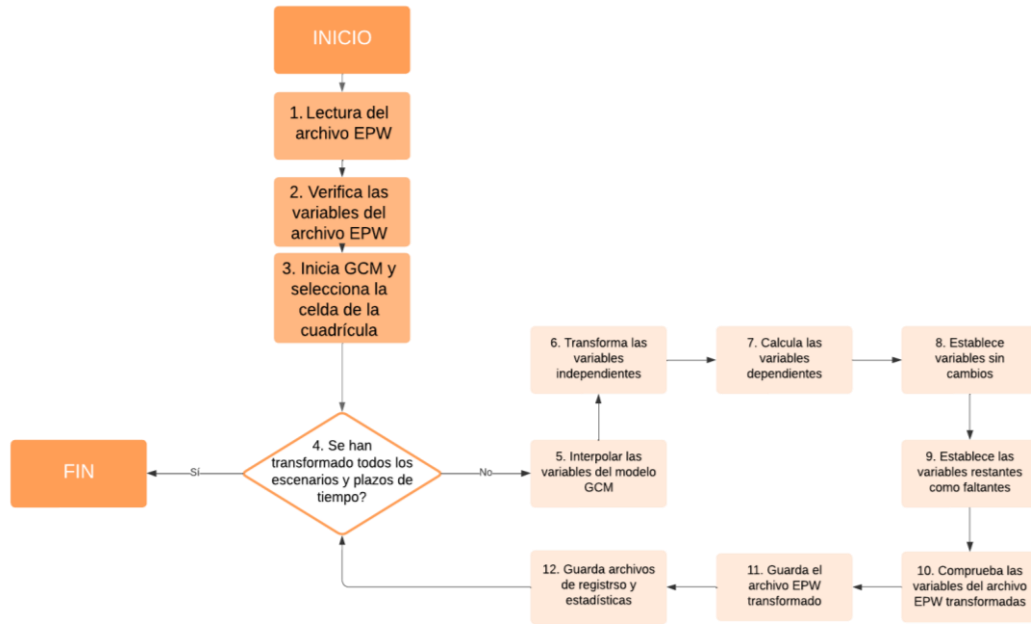
Para garantizar la precisión del método, el período de los registros actuales y la línea de base de los cambios deben coincidir. Dado que transforma los registros actuales, la transformación preserva las características climáticas locales y supone que los patrones climáticos actuales serán los mismos en el futuro.

El procedimiento de transformación requiere que el usuario proporcione un archivo EnergyPlus Weather (EPW). El archivo EPW contiene la ubicación de la estación meteorológica, las condiciones de diseño, los períodos típicos/extremos, las temperaturas del suelo, los días festivos/horario de luz diurna, el período de ejecución, los comentarios, los períodos de datos opcionales y los datos meteorológicos reales. Cada entrada de datos meteorológicos consta de 34 variables numéricas y una cadena con fuente de datos e indicadores de incertidumbre.

Después de leer el archivo EPW (paso 1) y seguido de una verificación de integridad (paso 2), se leen las variables GCM para cada período de tiempo y escenario (paso 3). A continuación, la herramienta utiliza la latitud y longitud especificadas en el archivo EPW para determinar los cuatro puntos más cercanos en la cuadrícula mundial GCM. Posteriormente, la herramienta interpola los cambios mensuales del GCM (paso 5) para todos los marcos temporales y escenarios utilizando un método de interpolación bilineal (el usuario también puede elegir el punto más cercano o el promedio de los cuatro puntos más cercanos) para reducir la escala de los datos climáticos a la ubicación deseada. El software supone que los cuatro puntos más cercanos definen una superficie paraboloidal hiperbólica para cada variable GCM, y el método ajustará cada variable GCM a la ubicación del EPW en esa superficie. El sexto paso se refiere a transformar las variables "independientes" del EPW. A estas variables las llamamos "independientes" porque no necesitan que otras variables EPW se calculen previamente para transformarse. El proceso se muestra en la Figura 15.

El procedimiento de transformación se basa en tres transformaciones estadísticas principales: "desplazamiento", "estiramiento" y la combinación de ambas. El paso 7 determina las variables "dependientes" a partir de las variables futuras transformadas en el paso 6. Las variables "dependientes" futuras se calculan a partir de funciones psicrométricas y ecuaciones del modelo solar. En el paso 8, se calculan las variables de irradiancia e iluminancia. Al final de los cálculos, algunas variables no cambian en el archivo EPW generado. Por ejemplo, los valores de la variable "dirección del viento" se conservan ya que no se pueden transformar ni calcular de ninguna otra manera.

Finalmente, la aplicación establece que faltan las variables restantes, ya que no se utilizan en EnergyPlus (paso 9). Una vez configuradas las variables, se verifica su integridad y límites (paso 10). Luego, se guarda el nuevo archivo EPW para el período y escenario actualmente procesados (paso 11). El último paso de este bucle (12) es guardar la tabla de comparación entre el EPW original y los archivos EPW generados, los cambios mensuales de las variables de GCM y el archivo de registro de advertencias. Cuando se procesan todos los plazos y escenarios, la herramienta se detiene.



**Figura 15.** Diagrama software FWG

Es importante ser consciente de que las predicciones de los modelos climáticos siempre están sujetas a incertidumbre debido a las limitaciones de nuestro conocimiento sobre el sistema climático y el desarrollo de las emisiones y sobre los recursos informáticos disponibles (METEONORM, 2014).

Las temperaturas futuras se obtienen para un total de cinco escenarios SSP: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5.

### 4.3 Modelo de construcción de la vivienda

Se realizaron simulaciones energéticas utilizando el software OpenStudio 3.9.0 (OS), incorporando las mismas características típicas de las viviendas definidas en las secciones 2.3 y 2.4. Se creó un modelo 3D de la vivienda típica mexicana utilizando SketchUp y se importó a OpenStudio para su simulación. Los ajustes de control de la climatización en OS se establecieron con un punto de consigna de refrigeración fijo de 23 °C, en concordancia con la temperatura del termostato indicada en las estadísticas nacionales de vivienda, en lugar de los umbrales adaptativos

utilizados en los cálculos de refrigeración de las HG. Los horarios de ocupación y uso de los equipos se definieron basándose en los patrones de uso diario representativos recogidos en la Encuesta Nacional de Consumo de Energía en Viviendas Particulares (ENCEVI) 2018 y la Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) 2020, lo que garantiza unas cargas internas por hora realistas y coherentes con el comportamiento medio de los hogares en México.

El factor del coeficiente global de transferencia de calor  $U$  calculado para el conjunto fue de aproximadamente  $2.49 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  para las paredes exteriores y de  $3.36 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  para el techo, lo que se ajusta bastante a los valores  $U$  de  $2.58 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$  y  $3.28 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ , respectivamente, utilizados en el simulador de carga térmica. Estas propiedades térmicas consistentes garantizaron la comparabilidad entre Open Studio y las simulaciones de carga térmica, lo que permitió una evaluación directa de las discrepancias basándose únicamente en las metodologías de cálculo. En la figura 16 se muestra un modelo 3D de una vivienda típica generado con SketchUp e importado a OS.

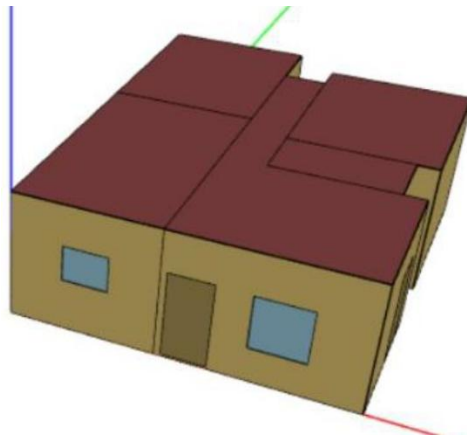


Figura 16. Modelo tridimensional de una vivienda típica mexicana en el software Open Studio.

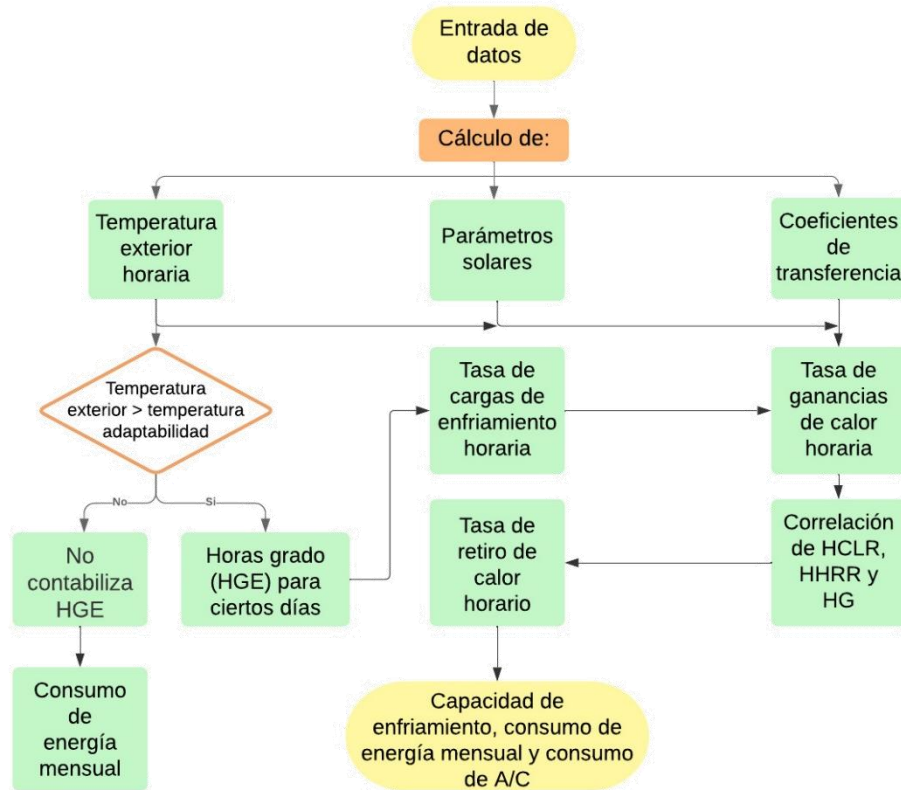
#### **4.4 Temperatura adaptativa**

Con el fin de reproducir con precisión el comportamiento energético térmico de una vivienda típica en los diferentes municipios de México, se incorporaron al simulador de carga

térmica los coeficientes  $\mu$ , A y B correspondientes a cada municipio, junto con las características constructivas del edificio y el sistema de aire acondicionado. Además, se incluyeron las horas diarias medias de uso del aire acondicionado, la potencia de iluminación y otras cargas internas para reflejar los patrones energéticos reales de los hogares.

Una vez capturada la información se realiza la simulación de cada localidad. Se compara el modelo base con datos de mediciones de consumos eléctricos reales de usuarios residenciales para los meses de enero a diciembre del año 2019 en las localidades a evaluar, para validar los resultados de la simulación. Las simulaciones se ajustan hasta que los valores calculados y los reales no difirieran en más de un  $\pm 10\%$  para el acumulado anual, garantizando la confiabilidad y reproducibilidad de los resultados al compararlos con los valores reales de consumo eléctrico. Al mismo tiempo se prueba la sensibilidad de las variables de diseño para reducir el número de simulaciones innecesarias.

Al no obtener este porcentaje de error en las pruebas iniciales, se realizaron modificaciones a la estructura general del simulador térmico para lograr una reproducción del comportamiento termo eléctrico de las viviendas en distintas localidades del país. Se establece una temperatura de adaptación como referencia para el consumo eléctrico del equipo de aire acondicionado de cada zona climática con base en una búsqueda literaria de estudios previos que se muestra en el apartado 4.4 (Fig. 17).



**Figura 17.** Modificación de la estructura general del simulador térmico

Para determinar el umbral de activación del sistema de aire acondicionado, se introdujo en el simulador un parámetro de temperatura adaptativa, basado en los rangos de confort reportados en estudios internacionales sobre la respuesta térmica de los ocupantes, incluyendo (Fang et al., 2021; Indraganti, 2010; Kim et al., 2017; Song et al., 2018; Yang et al., 2020), así como estudios nacionales como Sánchez-Montes et al., (2025) y Oropeza-Perez et al., (2017). Estas fuentes proporcionaron rangos de temperatura de confort según el tipo de clima, que sirvieron como referencia inicial para los climas cálidos, secos y templados de México.

A partir de esta información, se definieron rangos de temperatura de adaptación para climas cálidos, secos y templados en México. Utilizando estos valores, se llevaron a cabo simulaciones energéticas iterativas para cada ubicación, ajustando las temperaturas adaptativas para evaluar su impacto en el consumo de energía y comparando los resultados con los registros reales de consumo

eléctrico. En cada simulación, la temperatura adaptativa se definió según el tipo de clima, determinando el momento en que se activa el aire acondicionado en el cálculo de refrigeración DH.

Finalmente, se seleccionaron los valores que se encontraban dentro de los rangos de confort identificados en los estudios internacionales para cada tipo de clima y que también daban lugar a simulaciones de energía térmica que se ajustaban mejor al consumo real de electricidad de cada ubicación, minimizando el margen de error en las estimaciones del consumo energético anual. Como resultado, se determinó que las temperaturas adaptativas eran de 32 °C para climas cálidos, 29.2 °C para climas secos y 32.9 °C para climas templados. Esto mejoró la precisión de las simulaciones al tener en cuenta la capacidad de los ocupantes para tolerar temperaturas más altas antes de recurrir al aire acondicionado.

Para definir el umbral de temperatura de adaptación (Tadap) de cada zona climática, se utilizó una combinación de estudios internacionales y nacionales sobre confort. En concreto, se tuvieron en cuenta los rangos de temperatura indicados en estudios realizados tanto en México como en países con climas similares o con la misma clasificación de Köppen-García. Estos rangos se utilizaron como referencia inicial para cada zona. A continuación, los valores finales se calibraron localmente para cada municipio comparando la demanda energética simulada con el consumo eléctrico residencial real y ajustando los umbrales para minimizar el error entre ambos. Este enfoque permitió una calibración específica para cada contexto, sin dejar de basarse en rangos de confort validados científicamente.

En la tabla 9 se enumeran las temperaturas de adaptación utilizadas, las clasificaciones climáticas correspondientes, las referencias de apoyo y una indicación de si el umbral se adoptó directamente o se ajustó (localizó). Esta clasificación permitió al simulador alinear la activación

de los sistemas de refrigeración con la tolerancia térmica regional, al tiempo que se mantenía la flexibilidad para implementar umbrales dinámicos en futuras investigaciones o escenarios de cambio climático.

Tabla 9. Umbrales de temperatura de adaptación (Tadap) por zona climática

Tipo de clima	Localidad	Tadap (°C)	Fuente
A. Arid	Cuatla, San Andrés Tuxtla, Puerto Vallarta, Villa de Alvarez, Colima, Tuxtla Gutiérrez, Mérida y Macuspana	32 °C, 35°C, 24.7°C, 20.4°C, 29.5°C	(Hwang et al., 2009; Oropeza-Perez et al., 2017; Sánchez-Montes et al., 2025)
B. Dry	Aguascalientes, Cuauhtemoc, Hidalgo del Parral, Rioverde, Matehuala, Chihuahua, San Nicolas de los Garza, Juárez, Monterrey, Navolato, Mazatlan, Acuña, Navojoa, Guasave, Nuevo Laredo, Ahome, Hermosillo, Cájeme, Mexicali, San Luis Rio Colorado	26 y 32.45°C, 23.8 °C a 34.2 °C, 30.2 °C.	(Indraganti, 2010; Indraganti & Rao, 2010; Oropeza-Perez et al., 2017; Yang et al., 2020)
C. Temperate	Durango, Morelia, San Miguel de Allende, Cadereyta Jiménez, Victoria, Matamoros, Rio Bravo	24 a 37.5°C, 27.3 a 33.1°C, 35 °C	(Fang et al., 2021; Kim et al., 2017; Song et al., 2018)
Todos	Todas	Menos de 33.5 °C	ANSI/ASHRAE 55-2010

Aunque los umbrales de temperatura de adaptación definidos en este estudio se basaron inicialmente en rangos de confort procedentes de investigaciones internacionales y nacionales, los estudios de campo exhaustivos que abarquen toda la diversidad de climas y tipos de viviendas en México siguen siendo limitados. Esto representa una importante laguna que las investigaciones futuras deberían abordar para validar y perfeccionar aún más los umbrales de temperatura adaptativos propuestos.

#### 4.5 Modelado energético basado en HGE

Para mejorar la precisión en la estimación de la demandad de energía para refrigeración en diversas zonas climáticas, este estudio propone una función matemática mejorada del método de HGE incorporando un umbral de temperatura de adaptación. Mientras que el modelo tradicional considera que la demanda de refrigeración surge siempre que la temperatura exterior diaria supera una temperatura de referencia (temperatura de termostato), la función propuesta (denominada Función 2) mejora el cálculo al tener en cuenta las horas de funcionamiento reales de los sistemas de aire acondicionado. Esta función se basa en la metodología original del HGE para reproducir los patrones de consumo de energía eléctrica en los municipios mexicanos seleccionados. Integra una temperatura de adaptación específica para cada clima y calcula el número total de HGE en un período de 24 horas entre dos puntos temporales específicos en los que la temperatura ambiente supera el umbral de temperatura de adaptación.

La función propuesta se basa en el modelo original basado en Fourier presentado en el marco teórico (ecuación (1)) para representar las variaciones horarias de la temperatura exterior. Para determinar cuándo se requiere refrigeración, se incorpora un umbral de temperatura de adaptación como ecuación (10):

$$C = \frac{T_{\max} - T(t)}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (10)$$

Los puntos de intersección entre la función de temperatura ambiente  $T(t)$  y la temperatura de adaptación  $C$  determinan las horas de activación y desactivación del sistema de aire acondicionado. Estos puntos temporales,  $t_1$  y  $t_2$ , se obtienen analíticamente resolviendo la condición  $T(t) = C$ , que representa la intersección entre la curva de temperatura ambiente y la temperatura de adaptación, lo que da lugar a las ecuaciones (11) y (12):

$$t_2 = 24 \frac{\tan^{-1} \left( \frac{-B + \sqrt{(B^2 + A^2 - (\mu - C)^2)}}{\mu - A - C} \right)}{\pi} \quad (10)$$

$$t_1 = 24 \frac{\tan^{-1} \left( \frac{-B - \sqrt{(B^2 + A^2 - (\mu - C)^2)}}{\mu - A - C} \right)}{\pi} \quad (11)$$

Para calcular el CDH solo durante el período de enfriamiento efectivo, la función 2 (ecuación (13)) se define como la integral definida de la función de temperatura en el intervalo  $[t_1, t_2]$ :

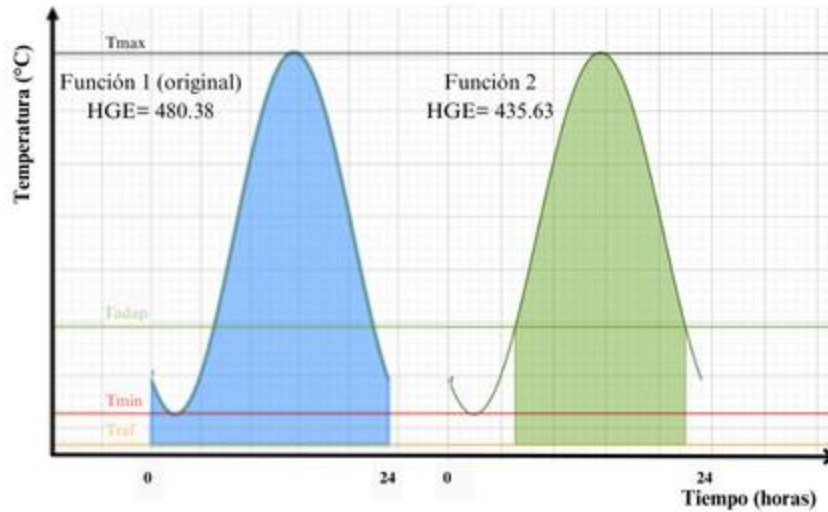
$$HG_{\text{enfriamiento}} = \int_{t_1}^{t_2} T(t) dt \quad (12)$$

Sustituyendo la ecuación (1) en la integral y resolviendo analíticamente se obtiene lo siguiente:

$$HG_{\text{enfriamiento}} = [(T_{\max} - T_0) - \mu(T_{\max} - T_{\min})] (t_2 - t_1) + \frac{12(T_{\max} - T_{\min})}{\pi} \left[ A \left( \sin \left( \frac{2\pi t_2}{24} \right) - \sin \left( \frac{2\pi t_1}{24} \right) \right) + B \left( \cos \left( \frac{2\pi t_1}{24} \right) - \cos \left( \frac{2\pi t_2}{24} \right) \right) \right] \quad (13)$$

El término dentro de la raíz cuadrada en las expresiones para  $t_1$  y  $t_2$ ,  $(B^2 + A^2 - (\mu - C)^2)$ , no debe ser negativo para garantizar soluciones reales. Este requisito impone la condición  $(\mu - C)^2 \leq (B^2 + A^2)$ , lo que garantiza que la temperatura adaptativa se encuentre dentro del rango de la oscilación térmica diaria. Si no se cumple esta condición, significa que la temperatura ambiente nunca superó el umbral y, por lo tanto, no fue necesario refrigerar, lo que da como resultado HGE = 0 para ese día.

Se tomaron los datos del día 10 de junio de 2019 de la ciudad de Mexicali como referencia para representar el comportamiento de cada función en la Figura 18. El gráfico con el área bajo la curva azul representa la función original sin modificar y la función 2 se ilustra con el color verde. Se toman las 24 horas de un día como el periodo de tiempo, donde  $T_{\max}$  es la temperatura ambiental máxima,  $T_{\text{adap}}$  representa la temperatura de adaptabilidad,  $T_{\min}$  la temperatura ambiental mínima y  $T_{\text{ref}}$  la temperatura de referencia del termostato. En este último se considera únicamente la cantidad de HGE requeridas por el periodo de tiempo en el que se supera la temperatura de adaptabilidad dependiendo el tipo de clima de la localidad.



**Figura 18.** Modificación a la metodología de horas grado empleada en el simulador energético, agregando una temperatura de adaptación.

En la mayoría de los casos,  $T_{amb}$  supera  $T_{adap}$  una sola vez al día, generando un intervalo continuo de integración. Sin embargo, en ciertos días del año y en algunas localidades, la  $T_{amb}$  fluctúa de manera que cruza  $T_{adap}$  más de una vez en un mismo día, lo que da lugar a tres puntos de intersección: un primer cruce donde la  $T_{amb}$  sube y supera la  $T_{adap}$  por primera vez, iniciando la integración; un segundo cruce donde la  $T_{amb}$  cae temporalmente por debajo de  $T_{adap}$ , interrumpiendo el cálculo de CDH; y un tercer cruce donde la  $T_{amb}$  vuelve a subir y supera la  $T_{adap}$ , reiniciando la integración hasta que finalmente desciende por debajo del umbral. Este comportamiento divide la integración en dos intervalos más cortos, reduciendo el cálculo total de CDH en comparación con la ecuación original, que no considera estas intersecciones. Esto ocurre principalmente en localidades donde la  $T_{amb}$  oscila cerca de  $T_{adap}$ , sin mantenerse constante por encima de este umbral durante todo el día, sino que sube y baja varias veces. Como resultado, la función 2 tiende a estimar un menor valor de CDH en estos casos.

De manera de ejemplo, en la figura 19 se muestra la variación de las CDH a lo largo del año para la ciudad de Monterrey, calculadas con la metodología original y la nueva función

propuesta. Se observa que durante los meses cálidos las CDH aumentan considerablemente, lo que indica una mayor demanda de enfriamiento en esas fechas. También se aprecia que la función 2 calcula una menor cantidad de CDH respecto a la función original, debido a las diferencias en la forma en que cada función responde a las condiciones climáticas mencionadas anteriormente.

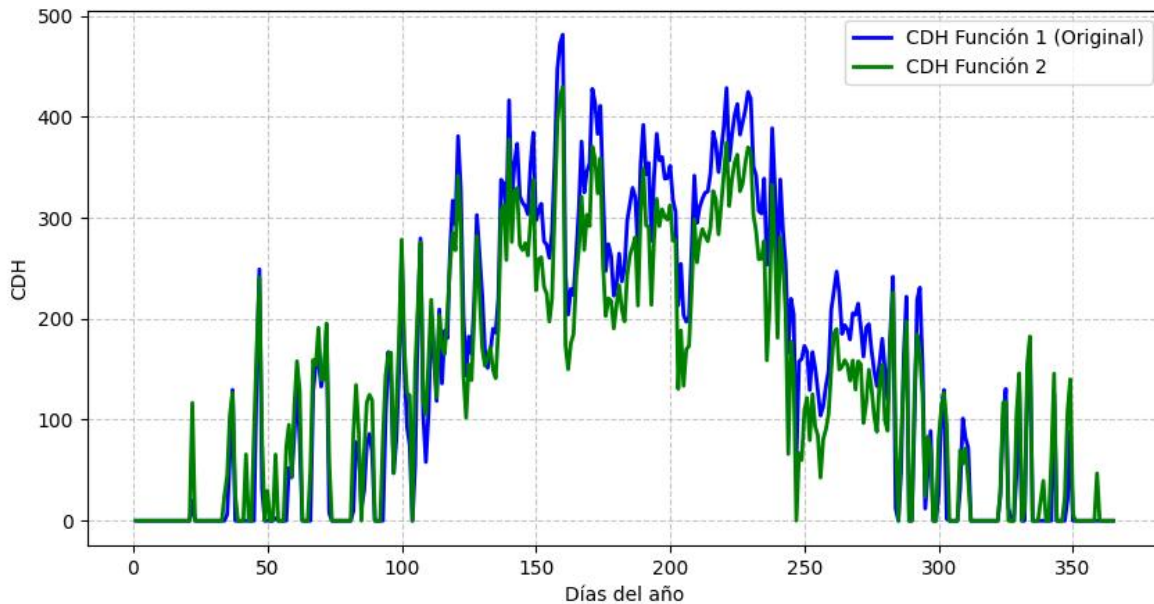


Figura 19. Representación del cálculo de CDH con cada función para los días del año 2019 de la ciudad de Monterrey

Se actualiza el simulador energético de Pérez Tello et al. (2018) con la información necesaria de cada localidad (datos climáticos y coeficientes  $m$ ,  $A$  y  $B$ ), y se utiliza para construir el modelo del caso base al ingresar las características de la vivienda. El simulador reproduce el comportamiento energético de las viviendas, el cual emplea la metodología de funciones de transferencia propuesta por la Sociedad Americana de Aire Acondicionado y Refrigeración (ASHRAE), así como el criterio de horas-grado para determinar potencia de enfriamiento, rapidez de retiro de calor y consumo eléctrico de un recinto acondicionado de acuerdo a Suástegui Macías (2014).

#### 4.6 Validez y confiabilidad

Para reproducir correctamente el comportamiento térmico de la vivienda típica en las distintas localidades se ingresan como datos de entrada al simulador de cargas térmicas, los coeficientes  $m$ ,  $A$  y  $B$  de cada localidad, las características constructivas de la edificación típica de México y del sistema de climatización, así como el porcentaje de horas que se usa el aire acondicionado por día (Tabla 9), siguiendo con la potencia de iluminación y demás aparatos.

Se propusieron factores de uso del aire acondicionado para cada tipo de tarifa eléctrica, que se ajustaron de forma iterativa en las simulaciones del consumo eléctrico de un hogar típico, utilizando las dos funciones descritas anteriormente para calcular las HGE de los diferentes municipios. Este proceso permitió identificar el factor de uso que mejor reproducía el consumo eléctrico medio por hogar en cada municipio, seleccionando el valor más representativo como referencia para cada tarifa.

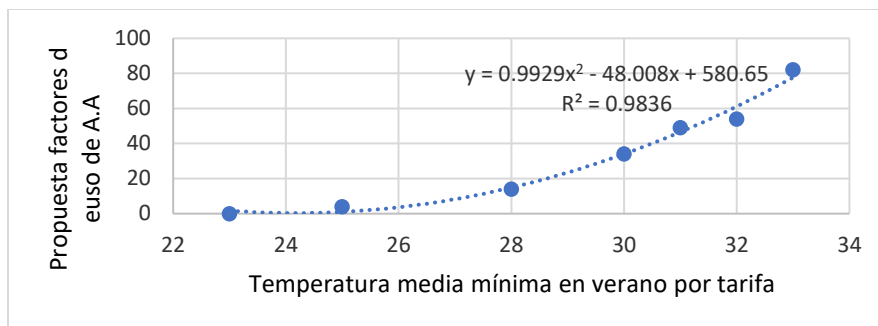
Para estos factores de uso del aire acondicionado propuestos, se realiza una revisión al comportamiento de las tarifas eléctricas del país. Se identifica un efecto escalonado de menor a mayor consumo y cantidad de HG respecto a las tarifas 1 a 1F, pues para los usuarios en tarifas 1F y 1E con clima cálido en verano, el consumo en los meses de verano puede ser más elevado que en invierno comparado con las tarifas 1 a 1C (O. (CONUEE) de Buen R., 2020). Con base a lo anterior se aplica un método de proporcionalidad para asignar valores sobre la cantidad de horas de uso del A/C dependiendo el tipo de tarifa como se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10.** Factor de uso del A/C respecto a la tarifa eléctrica

<b>Tarifa</b>	<b>Propuesta factor de uso A/C</b>
1	0.0
1A	0.04
1B	0.14
1C	0.34
1D	0.49
1E	0.54
1F	0.82

Posteriormente, se analizó la correlación entre los factores propuestos y la temperatura mínima promedio en verano asociada a cada tarifa, aceptando aquellos con una correlación superior al 90 %. Cabe mencionar que, en México, las tarifas eléctricas domésticas, determinadas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se clasifican en función de los niveles de consumo y la temperatura media de la región, en los tipos 1, 1A, 1B, 1C, 1D, 1E y 1F, que corresponden a zonas con diferentes rangos de temperatura mínima en verano (CFE, 2025). Esta clasificación afecta directamente a los umbrales de consumo y al coste por kilovatio-hora (kWh), lo que influye en los patrones de uso del aire acondicionado en los hogares.

Los resultados de estos valores indican una correlación muy alta respecto a las temperaturas promedio en verano de cada tarifa como se muestra en la figura 20, validando la propuesta para determinar el tiempo de uso de equipos de enfriamiento para cada tarifa del sector doméstico en México.



**Figura 20.** Correlación entre la temperatura media de cada tarifa y el tiempo de uso del A/C

Una vez capturados los datos, se realizaron simulaciones para cada municipio, teniendo en cuenta únicamente aquellos resultados en los que la diferencia con respecto a los registros de consumo eléctrico anual de 2019, obtenidos a partir de una base de datos de usuarios residenciales, se mantenía dentro de un margen de  $\pm 10\%$ . Este criterio garantiza la fiabilidad y reproducibilidad de los resultados cuando se comparan con los valores de consumo eléctrico medidos, al tiempo que permite comprobar la sensibilidad de las variables de diseño para reducir el número de simulaciones innecesarias.

A partir de los datos climatológicos publicados en la página web del NREL en 2019 de cada municipio seleccionado, se calcularon los coeficientes utilizados en el simulador de energía térmica (Tabla 11), así como el CDH sustituyendo las variables de las tres funciones aplicadas. Los resultados muestran coeficientes constantes por municipio y diferentes CDH al aplicar cada función.

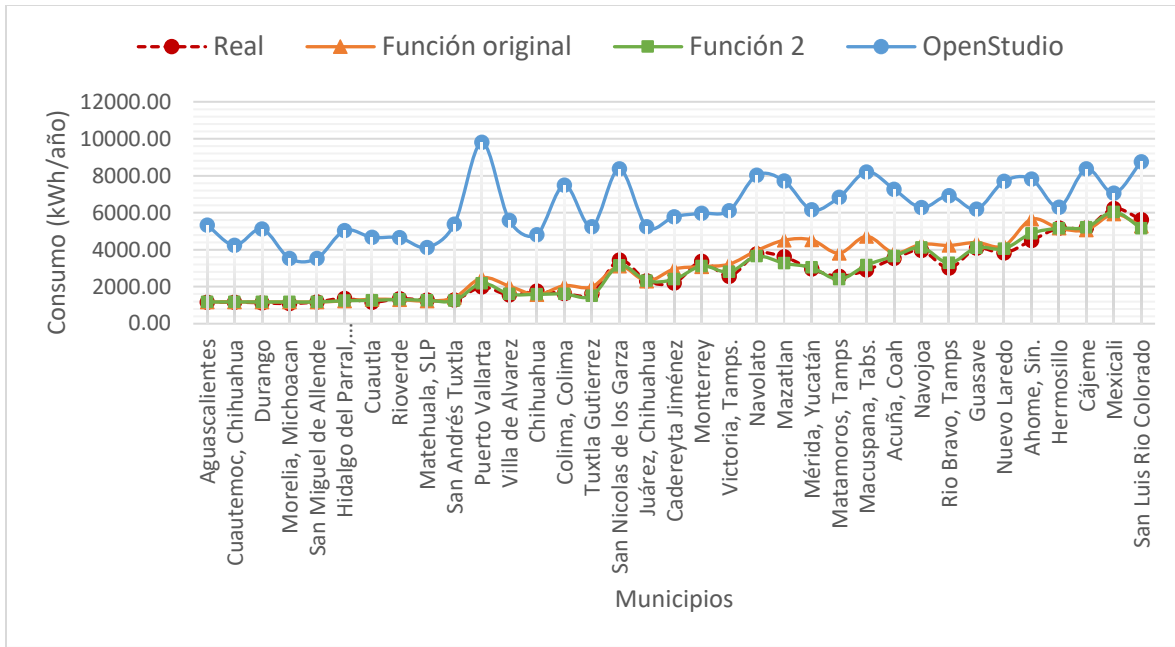
Tabla 11. Coeficientes de simulación por municipio.

Localidad	A	B	m	Localidad	A	B	m
Aguascalientes, Ags.	0.300	0.380	0.53	Monterrey, N.L.	0.340	0.350	0.52
Cauhtémoc, Chih.	0.370	0.300	0.51	Victoria, Tamps.	0.410	0.280	0.55
Durango, Dgo.	0.300	0.360	0.52	Navolato, Sin.	0.390	0.290	0.56
Morelia, Mich.	0.340	0.340	0.55	Mazatlán, Sin.	0.440	0.210	0.56
San Miguel de Allende, Gto.	0.340	0.350	0.55	Mérida, Yuc.	0.330	0.320	0.55
Hidalgo del Parral, Chih.	0.400	0.260	0.51	Matamoros, Tamps.	0.440	0.210	0.58
Cuatla, Mor.	0.330	0.340	0.53	Macuspana, Tab.	0.370	0.280	0.55
Rioverde, S.L.P.	0.360	0.340	0.57	Acuña, Coah.	0.250	0.410	0.51

Matehuala, S.L.P.	0.340.370.55	Navojoa, Son.	0.370.310.55
San Andrés Tuxtla, Ver.	0.370.300.56	Rio Bravo, Tamps.	0.360.330.57
Puerto Vallarta, Jal.	0.340.330.59	Guasave, Sin.	0.370.310.55
Villa de Alvarez, Col.	0.370.320.59	Nuevo Laredo, Tamps.	0.280.400.53
Chihuahua, Chih.	0.360.320.50	Ahome, Sin.	0.400.280.54
Colima, Col.	0.370.310.59	Hermosillo, Son.	0.340.360.53
Tuxtla Gutiérrez, Chis.	0.380.260.57	Cájeme, Son.	0.370.330.54
San Nicolás de los Garza, N.L.	0.380.320.52	Mexicali, B.C.	0.400.290.52
Juárez, Chih.	0.330.350.48	San Luis Río Colorado, Son.	0.290.390.52
Cadereyta Jiménez, N.L.	0.340.350.52		

Se obtuvieron los perfiles termo energéticos para cada modelo propuesto ajustando el valor de uso de uso del aire acondicionado por tarifa eléctrica para cada localidad como se muestra en el apartado anterior, donde los mayores consumos eléctricos se encuentran en la tarifa 1F como se muestra en la Fig. 21, debido a que son ciudades con clima extremo. Se hace notar que el perfil de consumo simulado utilizando la función 2 representa una mejora significativa en la precisión de las predicciones en comparación a la función original de CDH.

Al comparar los consumos energéticos simulados con los valores reales de consumo eléctrico las localidades analizadas, se identificó que el software Open Studio (OS) tiende a sobrestimar el consumo eléctrico en la mayoría de los casos. En cambio, la función basada en el método de CDH muestra una mejora notable a la función original que presenta desviaciones significativas en comparación con los valores reales, pero los ajustes realizados en la función 2 ha mejorado la precisión, siendo la que mejor refleja el consumo medido en la mayoría de los municipios.

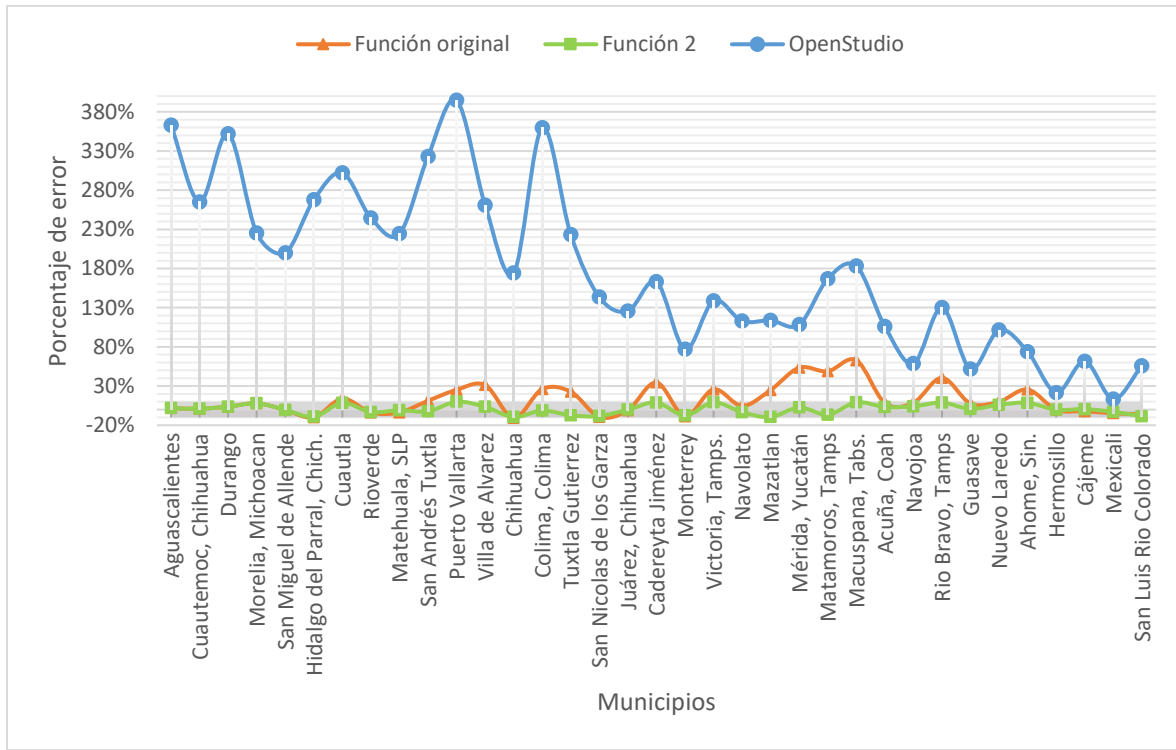


**Figura 21.** Gráfica de consumos anuales reales vs obtenidos de simulación por localidad

Para validar la simulación energética de la vivienda típica en 35 localidades, se compararon los consumos energéticos calculados con los registros anuales de consumo por usuario en cada localidad. Factores como las temperaturas máximas y mínimas horarias, los coeficientes de transferencia de calor y los patrones de uso del aire acondicionado, pueden aumentar o disminuir el consumo eléctrico. Los resultados al aplicar la función 2 mostraron un margen de error dentro del rango de  $\pm 10\%$ , mejorando la precisión en comparación con la función original y el software OS, como se ilustra en la Figura 18. Esto confirma que la función 2 es la que mejor reproduce el comportamiento energético de las viviendas en México.

En las simulaciones energéticas de la vivienda típica para los 35 municipios, se compararon los consumos energéticos calculados con los registros anuales de consumo por usuario en cada localidad. Factores como las temperaturas máximas y mínimas horarias, los coeficientes de transferencia de calor y los patrones de uso del aire acondicionado, pueden aumentar o disminuir el consumo eléctrico. Los resultados al aplicar la función 2 mostraron un margen de error dentro

del rango de  $\pm 10\%$ , mejorando la precisión en comparación con la función original y el software OS, como se ilustra en la Figura 22. Esto confirma que la función 2 es la que mejor reproduce el comportamiento energético de las viviendas en México.



**Figura 22.** Validación de simulación energética de la vivienda típica en 35 localidades, comparando consumos energéticos calculados y los consumos reales por usuario de cada ciudad.

Se realiza el cálculo de la desviación estándar de los consumos eléctricos anuales obtenidos de las simulaciones energéticas para cada método evaluado, mostrando que la función 2 obtuvo el mejor desempeño con un valor de 6.2%, en comparación con el 19% de la función original y el 105% del software OS, como se muestra en la tabla 5. Asimismo, los coeficientes de correlación refuerzan esta tendencia, con valores de 0.99 para la función 2, 0.93 para la función original y 0.66 para OS. De manera similar, los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) confirman la superioridad de la función 2 con 0.98, frente a los valores de 0.87 y 0.43 para la función original y OS, respectivamente, los resultados se muestran en la tabla 12.

Tabla 12. Porcentajes de desviación estándar para cada modelo

Método estadístico	Función Original	Función 2	Open Studio
Desviación estándar	19%	6%	105%
Promedio de porcentaje de errores	13%	0.2%	177%
Coefficiente de correlación	0.93	0.99	0.66
Coefficiente R <sup>2</sup>	0.87	0.98	0.43

#### 4.7 Medidas de Eficiencia Energética

Una vez seleccionados los modelos a utilizar, la tarea de evaluación se lleva a cabo para seleccionar el diseño de envolvente óptimo para las localidades seleccionadas aplicando distintas acciones de eficiencia energética. Se analizaron cinco escenarios principales como se muestra en la tabla 13.

Tabla 13. Medidas de EE seleccionadas para el estudio

Medida de eficiencia energética	Descripción
Sin acciones de eficiencia	Sin aislamiento térmico en techo ni en muros Eficiencia del aire acondicionado minisplit con grado de eficiencia de la electricidad (EER) 10 Refrigerador viejo
Aislamiento térmico en muros	Con poliestireno de 2" de espesor en superficie exterior
Aislamiento térmico en techo	Con poliuretano de 2" de espesor
Aislamiento en techo y muros	Con poliestireno de 2" de espesor en superficie exterior Con poliuretano de 2" de espesor
Sustitución del aire acondicionado	Con aire acondicionado tipo minisplit con EER de 15
Sustitución del refrigerador	Refrigerador nuevo de la misma capacidad volumétrica dada en pies cúbicos.

La reducción del consumo se estimó modificando los parámetros térmicos de la vivienda y ajustando la carga sensible y latente, lo que se traduce en una disminución proporcional de las HGE. Posteriormente cada medida se aplicó en los escenarios 2050 y 2080 para evaluar su

efectividad frente al aumento térmico. Esto realizando pronósticos a corto y mediano del consumo eléctrico de las distintas localidades seleccionadas del sector doméstico y calculando el potencial de ahorro tanto eléctrico como económico de los programas de eficiencia energética a evaluar considerando cambios de la temperatura ambiental.

Se comparan los consumos eléctricos de las viviendas con y sin acciones de eficiencia energética para cuantificar el ahorro eléctrico anual en cada localidad, y así mediante un diseño de experimentos se identifican las acciones de eficiencia energética con mayores efectos en el pronóstico de consumo eléctrico según el tipo de clima. Se muestra con mayor detalle la metodología propuesta en la figura 23.

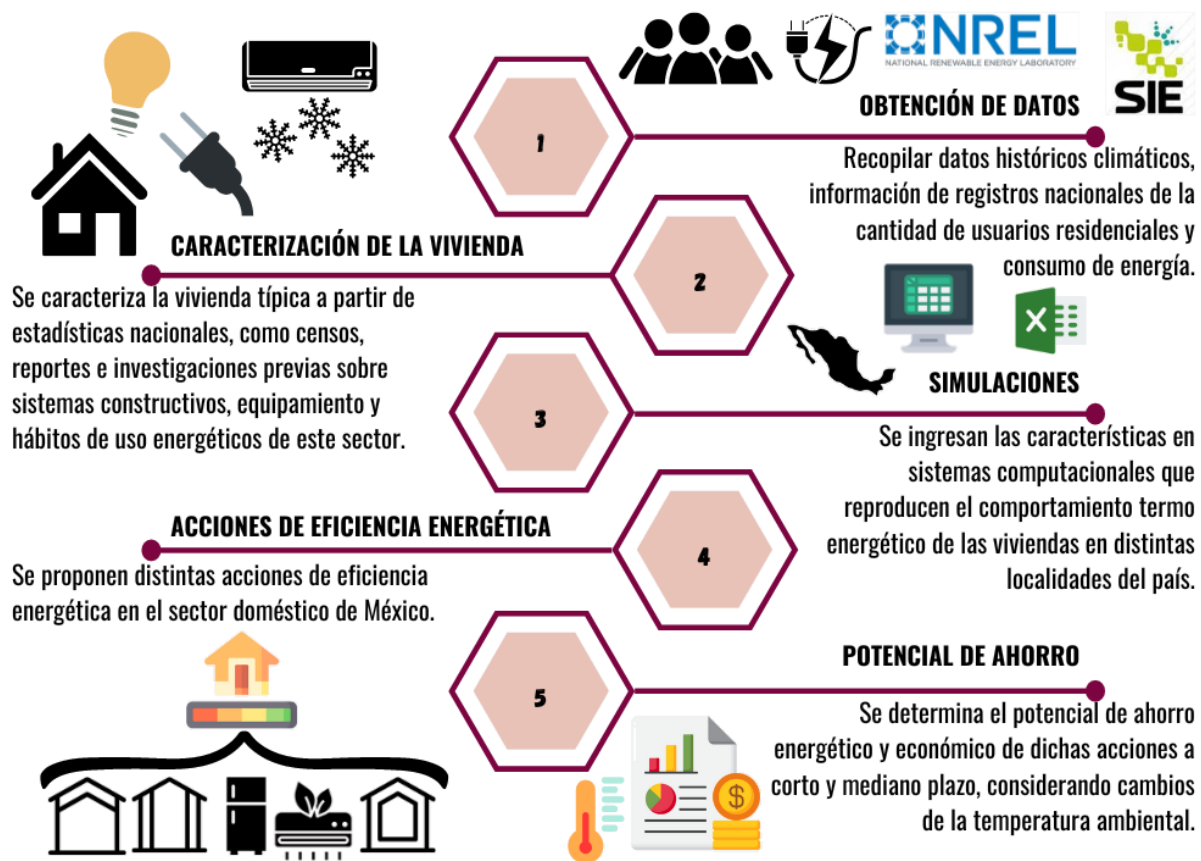


Figura 23. Metodología propuesta para la realización del estudio.

## 4.8 Escenarios de análisis

El presente apartado describe los escenarios utilizados en este estudio para evaluar el impacto del cambio climático y de las medidas de eficiencia energética en el consumo eléctrico del sector residencial en México. El primer escenario considera las condiciones climáticas actuales sin aplicar medidas de eficiencia energética, el segundo y tercer escenario incluye condiciones climáticas futuras bajo diferentes trayectorias de emisiones (SSP) sin medidas de EE, y el último escenario implica la aplicación de medidas de eficiencia energética a mediano y largo plazo.

Se llevaron a cabo aproximadamente 1,580 simulaciones energéticas, distribuidas entre escenarios base, escenarios futuros con y sin medidas de EE. Esta estructura permite comparar, de forma ordenada, el desempeño energético de las viviendas ante los cambios de temperatura actual y futuros, así como cuantificar el potencial ahorro de diversas acciones de eficiencia energética.

Estos escenarios permiten comparar el desempeño energético del sector doméstico en distintos contextos climáticos y tecnológicos, integrando tanto la variabilidad térmica proyectada por los modelos SSP como las posibles mejoras derivadas de intervenciones técnicas en la vivienda. Estos escenarios incluyen: 1) Escenario base actual sin medidas de eficiencia energética (2019); 2) Escenarios SSP sin medidas (2050); 3) Escenarios SSP sin medidas (2080) y 4) Escenarios SSP con medidas de eficiencia energética (2050 y 2080).

### 4.8.1 Escenario Base (sin eficiencia)

El escenario base representa las condiciones climáticas actuales, tomando como referencia el año 2019. En este escenario no se aplica ninguna medida de eficiencia energética, de acuerdo a la información previa para la caracterización de la vivienda, y se emplean los valores climáticos históricos para cada una de las 35 localidades seleccionadas en el estudio. Se consideran las características constructivas típicas de la vivienda mexicana, eficiencia promedio del equipo de

aire acondicionado existente, comportamiento térmico real reflejado en los consumos de energía históricos, patrones de uso de usuarios residenciales documentados por INEGI y CONUEE.

En total se realizaron 35 simulaciones energéticas, una por cada localidad, para establecer el desempeño energético actual de la vivienda de referencia antes de evaluar los escenarios futuros.

#### *4.8.2 Escenarios 2050 (mediano plazo)*

El Escenario 2050 incluye los aumentos de temperatura proyectados mediante el software FWG bajo cuatro trayectorias de emisión: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Estas rutas representan un amplio rango de futuros climáticos cercanos para México. En este escenario no se aplican medidas de eficiencia energética, lo que permite analizar el efecto aislado del cambio climático sobre el consumo eléctrico residencial.

Para este escenario se llevaron a cabo aproximadamente 140 simulaciones energéticas, derivadas de las 35 localidades bajo los cuatro escenarios climáticos sin intervención.

#### *4.8.3 Escenarios 2080 (largo plazo)*

En este escenario se utilizan las proyecciones de las temperaturas bajo las mismas cuatro trayectorias de cambio climático: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 para analizar el impacto del clima extremo proyectado en el consumo eléctrico residencial hacia el año 2080.

Nuevamente se realizaron 140 simulaciones energéticas, correspondientes a las 35 localidades bajo los cuatro escenarios climáticos, sin aplicar medidas de eficiencia energética.

#### *4.8.4 Escenario con medidas de eficiencia energética*

Con el objetivo de identificar el potencial de ahorro frente al cambio climático, se desarrollaron escenarios adicionales que incorporan las cinco medidas de eficiencia energética propuestas en este estudio, evaluadas de manera independiente. Estas medidas se aplicaron en los horizontes 2050 y 2080, combinándose con las cuatro trayectorias de cambio climático (SSP1-2.6,

SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5). En total, cada caso tiene 20 configuraciones de simulación (4 escenarios climáticos  $\times$  5 medidas de EE).

Para el escenario 2050 con medidas se llevaron a cabo 700 simulaciones energéticas, resultado de evaluar las 35 localidades bajo las 20 combinaciones de cambio climático y medidas de eficiencia energética. Asimismo, para el escenario 2080 con medidas se realizaron otras 700 simulaciones energéticas, aplicadas a las mismas 35 localidades bajo las mismas combinaciones de escenarios climáticos y medidas de eficiencia energética.

Esto dando un total general de 1,580 simulaciones energéticas. De esta manera se puede identificar no solo el impacto individual de cada medida, sino también su desempeño bajo diferentes escenarios futuros de cambio climático.

#### **4.9 Elaboración de un artículo para publicación en revista de circulación internacional**

Durante los primeros semestres del desarrollo de esta investigación se identificaron diversas limitaciones en la aplicación de la metodología tradicional de Horas Grado de Enfriamiento (HGE) en los distintos climas de México. Estas limitaciones se hicieron evidentes al analizar la respuesta térmica de la vivienda típica mexicana en climas muy contrastantes, desde templados hasta cálidos extremos, donde la función convencional de HGE presentaba inconsistencias al estimar la demanda real de enfriamiento.

Como resultado de lo anterior, durante la etapa de análisis y procesamiento de los datos climáticos y energéticos empleados en el presente estudio, surgió la necesidad de formular una propuesta metodológica que corrigiera dichas limitaciones. Esta iniciativa derivó en la elaboración y publicación del artículo titulado “A New Proposal for the Use of Cooling Degree Hours for the Energy Simulation of Residential Buildings in Mexico”, en el cual se presenta una función mejorada para el cálculo de HGE.

La nueva formulación introduce una función de HGE ajustada que incrementa la precisión en la estimación de la demanda de refrigeración residencial mediante el uso de una temperatura de adaptación de confort térmico específica para cada tipo de clima, lo que permite que la función refleje mejor la percepción térmica y el comportamiento real de los ocupantes, estableciendo así un mecanismo de activación selectiva en el tiempo, que determina la carga climática únicamente durante las horas en las que la temperatura ambiente supera la temperatura de adaptación correspondiente, evitando sobreestimaciones comunes en la función tradicional.

Gracias a estos ajustes, la función propuesta permite obtener una estimación más precisa de la carga térmica de enfriamiento, reduciendo sesgos y mejorando la coherencia entre las condiciones climáticas proyectadas y la demanda energética simulada. Esta formulación fue completamente integrada en la metodología del presente estudio y se utilizó para el cálculo de las HGE históricas (2000–2020), así como para las proyecciones a 2050 y 2080 bajo los escenarios climáticos SSP.

El artículo resultante de esta contribución metodológica fue sometido a consideración de la revista *Energies*, de la editorial MDPI, en mayo de 2025, siendo aceptado para su publicación en julio del mismo año y publicado en agosto de 2025 gom (Gómez, G., Soto, S., Suástegui, J. A., Acuña, A., & Magaña, H. D., 2025), (Gómez et al., 2025).

## **Capítulo 5. Resultados**

Se presentan los resultados obtenidos a partir de 1,580 simulaciones energéticas realizadas para 35 localidades de México, considerando escenarios climáticos tanto actuales como futuros, con y sin la implementación de medidas de eficiencia energética. La organización del capítulo es la siguiente: en primer lugar, se analiza la distribución climática de la muestra y la evolución histórica de las Horas Grado de Enfriamiento (HGE); posteriormente, se presentan las

proyecciones de temperatura hacia los años 2050 y 2080 bajo los escenarios SSP; enseguida, se muestran los resultados de consumo eléctrico correspondientes a cada escenario de cambio climático; y finalmente, se analiza el potencial de ahorro energético según medida, tipo de clima y escenario de cambio climático.

Los climas cálidos registran valores elevados de Horas Grado de Enfriamiento (HGE), con una tendencia en aumento en los últimos años. En los climas secos/extremos como el caso de Mexicali, se observan los valores más altos (22,000–31,000 HGE), debido a las condiciones térmicas severas y de una elevada necesidad de enfriamiento. En contraste, los climas templados presentan valores considerablemente menores (500–2,500 HGE), caracterizados por variaciones estacionales más marcadas.

Este análisis confirma la pertinencia de clasificar los resultados por tipo de clima y justifica la importancia de evaluar temperaturas de adaptación específicas para cada región.

### 5.1 Distribución climática y localización geográfica de la muestra

La muestra de 35 localidades seleccionadas en este estudio representa una diversidad climática de México (Tabla 14), abarcando climas cálidos húmedos, cálidos secos/extremos y templados. Para caracterizar esta variabilidad, se analizaron las series históricas de Horas Grado de Enfriamiento (HGE), que constituyen el principal indicador climático para el modelado energético de la demanda de enfriamiento.

Tabla 14. Muestra de localidades y tipo de clima

Clima	Localidad	Clima	Localidad
Cálido	Cuautla	Seco	Mazatlán
Cálido	San Andrés Tuxtla	Seco	Acuña, Coahuila
Cálido	Puerto Vallarta	Seco	Navojoa
Cálido	Villa de Álvarez	Seco	Guasave
Cálido	Colima, Colima	Seco	Nuevo Laredo
Cálido	Tuxtla Gutiérrez	Seco	Ahome, Sin.
Cálido	Mérida	Seco	Hermosillo

Cálido	Macuspana, Tabs.	Seco	Cájeme
Seco	Aguascalientes	Seco	Mexicali
Seco	Cuauhtémoc, Chihuahua	Seco	San Luis Rio Colorado
Seco	Hidalgo del Parral, Chih.	Templado	Durango
Seco	Rioverde	Templado	Morelia, Michoacán
Seco	Matehuala, SLP	Templado	San Miguel de Allende
Seco	Chihuahua	Templado	Cadereyta Jiménez
Seco	San Nicolás de los Garza	Templado	Victoria, Tamps.
Seco	Juárez, Chihuahua	Templado	Matamoros, Tamps
Seco	Monterrey	Templado	Rio Bravo, Tamps
Seco	Navolato		

Las Figuras 24, 25 y 26 muestran las series temporales de HGE para tres localidades representativas de cada tipo de clima: Tuxtla Gutiérrez (cálido), Mexicali (cálido seco/extremo) y San Miguel de Allende (templado). Los resultados muestran que los climas cálidos presentan valores altos y sostenidos de HGE, como una tendencia creciente en los últimos años, que los climas cálidos secos/extremos, como Mexicali, registran los valores más elevados (22,000–31,000 HGE), reflejo de condiciones térmicas extremas y de una elevada demanda de enfriamiento. Los climas templados presentan valores considerablemente menores (500–2,500 HGE), con variaciones estacionales más pronunciadas.

La serie temporal de Tuxtla Gutiérrez muestra valores de HGE relativamente estables entre 3,000 y 8,000 a lo largo de las dos primeras décadas analizadas, con incrementos evidentes después de 2017. Este comportamiento indica una mayor frecuencia e intensidad de periodos cálidos, coherente con la tendencia al alza en temperaturas máximas registrada en la región del sureste. La magnitud de las HGE confirma que esta localidad presenta una demanda importante de enfriamiento, característica distintiva de los climas cálidos.

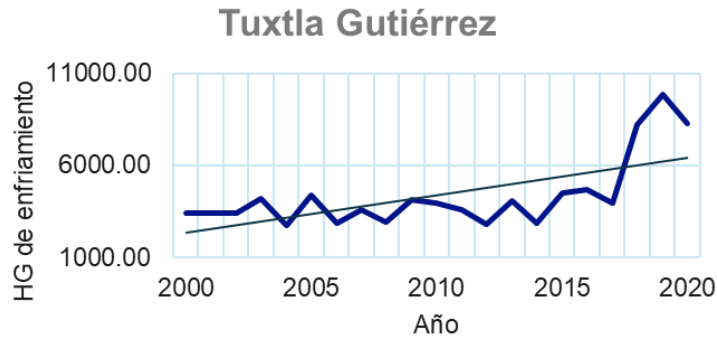


Figura 24. Horas Grado de Enfriamiento históricas en Tuxtla Gutiérrez (clima cálido).

Mexicali registra los valores de HGE más altos entre las localidades analizadas, con rangos entre 22,000 y 31,000 HGE. La variabilidad observada se asocia a fluctuaciones extremas en la temperatura máxima diaria, típicas de los climas áridos del noroeste. A partir de 2019 se observa una tendencia en aumento más pronunciada, reflejando tanto la prolongación de los periodos de calor como el aumento de la intensidad térmica. Estas características confirman su clasificación como localidad de clima cálido seco extremo, donde la demanda de climatización es particularmente elevada.

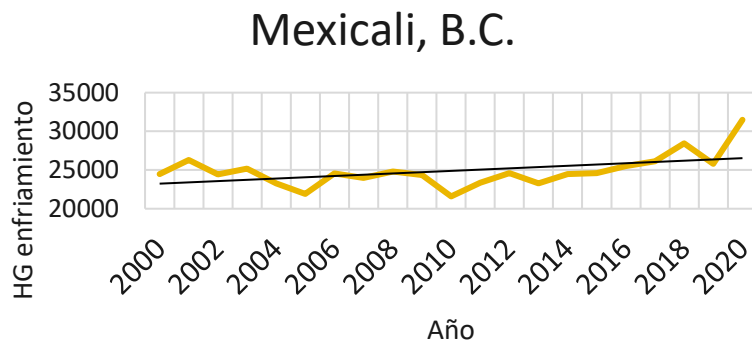


Figura 25. Horas Grado de Enfriamiento históricas en Mexicali, Baja California (clima cálido seco/extremoso)

En contraste, las localidades templadas presentan menores HGE, con temporadas cálidas más cortas y menores intensidades térmicas. Las zonas secas exhiben alta variabilidad térmica diaria, lo que se refleja en fluctuaciones significativas de HGE a lo largo del año. San Miguel de

Allende presenta una serie de HGE notablemente inferior en comparación con las localidades de climas cálidos, con valores que oscilan entre 500 y 2,500 HGE. La variabilidad anual refleja cambios estacionales y eventos climáticos aislados, donde se percibe un incremento a partir de 2015, lo que confirma un requerimiento estacional y moderado de sistemas de acondicionamiento ambiental. Estas diferencias fundamentan la necesidad de modelar los impactos climáticos diferenciados por tipo de clima.

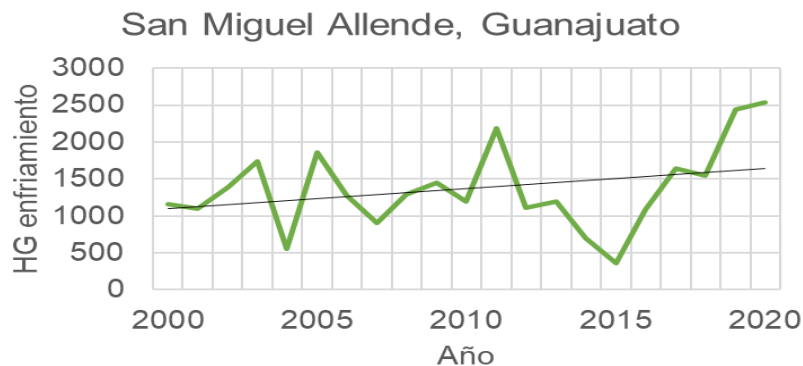


Figura 26. Horas Grado de Enfriamiento históricas en San Miguel de Allende, Guanajuato (clima templado)

Esta distribución climática constituye la base para el análisis comparativo de los efectos del cambio climático y la efectividad de medidas de eficiencia energética. Las figuras anteriores permiten visualizar de forma clara cómo la severidad climática varía entre los tipos de clima representados en la muestra. Los climas cálidos y cálidos secos presentan valores de HGE significativamente superiores a los climas templados, lo que anticipa diferencias importantes en la demanda eléctrica residencial por enfriamiento. Este análisis confirma la pertinencia de estratificar los resultados por tipo de clima y justifica la importancia de evaluar medidas de adaptación específicas para cada región.

## 5.2 Proyección de temperaturas a mediano y largo plazo (2050 y 2080) bajo diferentes escenarios SSP

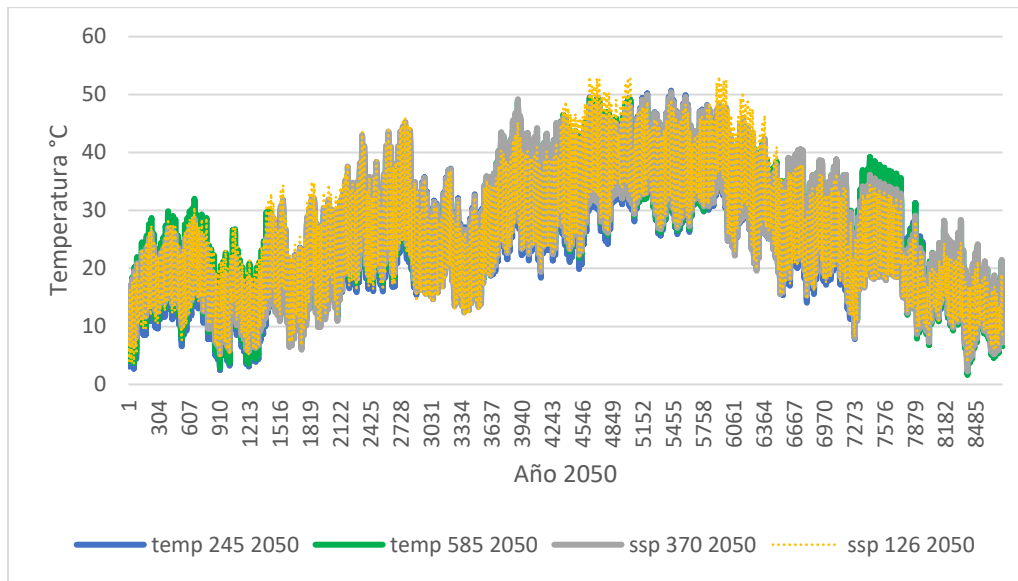
Para proyectar la evolución térmica futura, se utilizaron archivos climáticos generados mediante Future Weather Generator con base en los modelos CMIP6 y cuatro trayectorias socioeconómicas compartidas (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5). Estas trayectorias representan futuros divergentes en cuanto a emisiones, desde escenarios de mitigación profunda (SSP1-2.6) hasta escenarios de uso intensivo de combustibles fósiles (SSP5-8.5). En particular, se obtuvieron proyecciones de temperaturas máximas, mínimas y medias para los años 2050 y 2080 en 35 localidades clave de México.

Estas proyecciones se realizaron considerando los cuatro escenarios SSP principales:

- SSP1-2.6: Un escenario optimista con bajas emisiones, enfocado en el desarrollo sostenible y esfuerzos globales significativos para mitigar el cambio climático.
- SSP2-4.5: Un escenario intermedio donde se mantienen políticas moderadas de mitigación y adaptación.
- SSP3-7.0: Un escenario pesimista caracterizado por altas emisiones debido a un desarrollo desigual y limitado enfoque en la sostenibilidad.
- SSP5-8.5: El escenario más crítico, caracterizado por emisiones muy elevadas, resultado de un uso intensivo de combustibles fósiles y de un desarrollo económico sin control.

En la Figura 27, se presenta un ejemplo de las proyecciones de temperatura para el año 2050 en la localidad de Mexicali, Baja California, una región particularmente vulnerable debido a su clima seco y altas temperaturas registradas históricamente. Este análisis es crucial para diseñar

estrategias de adaptación y mitigación específicas para cada región, considerando los impactos potenciales en el consumo energético y bienestar de la población.



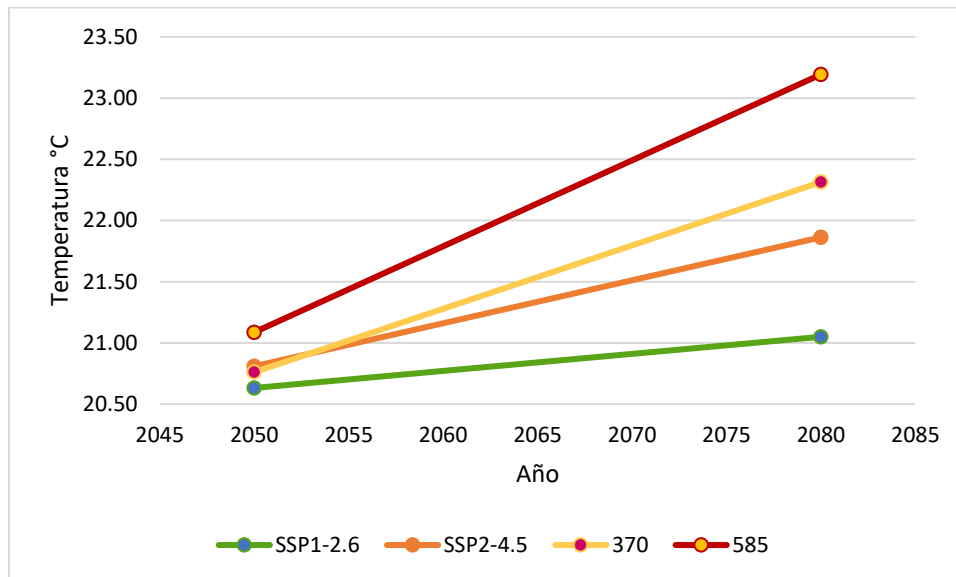
**Figura 27.** Temperaturas a mediano plazo para la ciudad de Mexicali bajo los distintos escenarios de cambio climático

Como parte del análisis del impacto del cambio climático, se calcularon las temperaturas promedio anuales para periodos a mediano (2050) y largo plazo (2080). Este cálculo se realizó para todas las localidades incluidas en el estudio y bajo los cuatro escenarios climáticos definidos por los SSP (Shared Socioeconomic Pathways): SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Cada uno de estos escenarios representa diferentes trayectorias de desarrollo humano, uso de recursos y niveles de emisiones de gases de efecto invernadero.

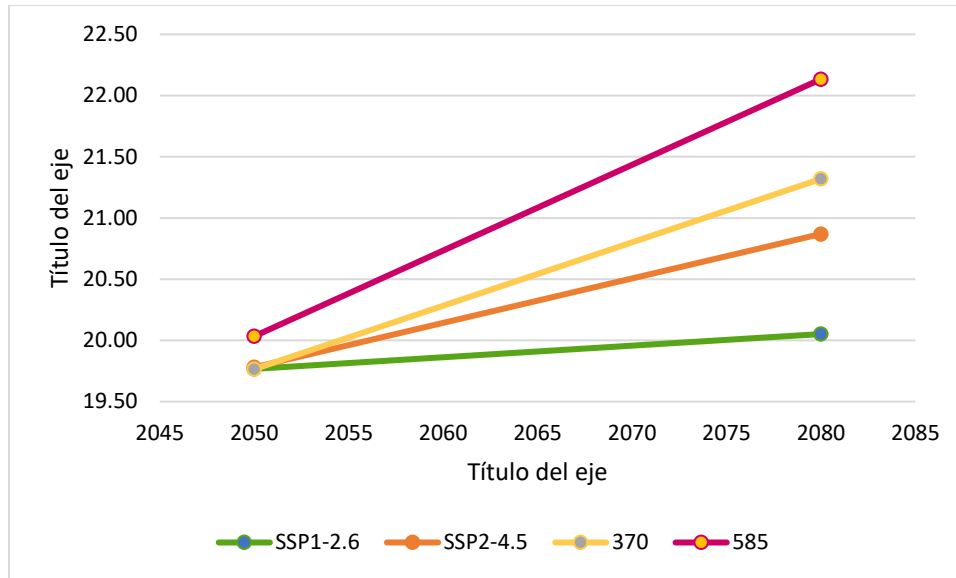
Las gráficas presentadas en las Figuras 28 y 29 ilustran la variación de las temperaturas promedio anuales en Mexicali y Cadereyta bajo distintos escenarios climáticos. El escenario SSP1-2.6 proyecta un futuro de bajas emisiones, resultado de esfuerzos globales de mitigación del cambio climático, como la adopción de energías renovables y la reducción en el uso de combustibles fósiles, lo que limita de manera significativa el incremento de las temperaturas. En contraste, el escenario SSP5-8.5 describe un contexto de altas emisiones, impulsado por un

crecimiento económico intensivo y el uso extensivo de combustibles fósiles, que conduce a aumentos drásticos en las temperaturas promedio.

Las gráficas muestran una tendencia en la que, bajo los escenarios más extremos (SSP3-7.0 y SSP5-8.5), las temperaturas promedio anuales de ambas localidades aumentan de manera significativa, con un incremento particularmente marcado hacia el año 2080. Por ejemplo, en Mexicali, caracterizado por un clima seco y altas temperaturas, el aumento proyectado podría tener implicaciones críticas para el consumo energético. Esto subraya la importancia de adoptar medidas de adaptación y mitigación adecuadas, considerando que el impacto del cambio climático varía significativamente según la región y el escenario. Las gráficas presentadas no solo sirven como evidencia visual de las proyecciones, sino que también ayudan a destacar la urgencia de implementar políticas orientadas a un desarrollo sostenible y resiliente al clima.



**Figura 28.** Temperaturas promedio anual futuras para Mexicali bajo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5.



**Figura 29.** Temperaturas promedio anual futuras para Cadereyta bajo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5.

### 5.3 Tendencias del consumo eléctrico a mediano y largo plazo bajo diferentes escenarios SSP

Para poder realizar las simulaciones del consumo eléctrico futuro de cada localidad, se utilizaron las temperaturas proyectadas para los periodos a mediano plazo (2050) y largo plazo (2080) para calcular las temperaturas máximas y mínimas bajo cada escenario climático, y posteriormente se introdujeron en el simulador energético. Los resultados del pronóstico del consumo eléctrico para el sector doméstico se presentan en la Tabla 10, la cual proporciona un resumen numérico del consumo proyectado en diferentes localidades de México bajo los cuatro escenarios climáticos principales (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5). Esta tabla permite analizar cómo los aumentos de temperatura afectan la demanda energética, con un enfoque particular en el uso de electricidad para sistemas de enfriamiento, que se intensifica en regiones cálidas y secas.

En Mexicali, Baja California, un municipio conocido por su clima extremadamente caluroso, el consumo eléctrico promedio por hogar aumenta significativamente. Bajo el escenario más severo (SSP5-8.5), el consumo eléctrico proyectado pasa de 7800.41 kWh en 2050 a 8789.83

kWh en 2080, reflejando un incremento considerable atribuible al incremento en temperaturas máximas y la mayor necesidad de climatización. De manera similar, localidades como Cadereyta Jiménez con clima templado y Monterrey con clima seco, presentan una tendencia de aumento en el consumo eléctrico, lo que muestra la sensibilidad de estas zonas al cambio climático.

En términos generales, los resultados de las Tablas 15 y 16 permiten visualizar de manera cuantitativa cómo el cambio climático puede transformar los patrones de consumo eléctrico en el sector doméstico de México, destacando la importancia de considerar las proyecciones climáticas en la planificación energética de mediano y largo plazo.

**Tabla 15.** Pronóstico de consumo eléctrico por escenario climático a mediano plazo.

Localidad	Escenario SSP1-2.6	Escenario SSP2-4.5	Escenario SSP3-7.0	Escenario SSP5-8.5
Aguascalientes	1173.680318	1123.553899	3444.186666	3443.033428
Cuauhtémoc, Chihuahua	1173.680318	887.5398618	1173.680318	1173.680318
Durango	1042.741859	997.5237459	3433.934981	3434.512468
Morelia, Michoacán	1105.654252	1029.908784	3236.881547	3237.630265
San Miguel de Allende	1173.680318	1011.443011	1173.680318	1173.680318
Hidalgo del Parral, Chih.	1311.37381	1222.673453	3471.558531	3469.418035
Cuautla	1283.424376	682.4228472	1283.424376	1283.424376
Rioverde	1356.397894	1299.058045	3202.833979	3202.64573
Matehuala, SLP	1295.08673	1266.663141	1295.08673	1295.08673
San Andrés Tuxtla	1267.487825	767.1467122	1267.487825	1267.487825
Puerto Vallarta	1795.543098	2386.932013	3490.636677	3483.667842
Villa de Álvarez	1731.147864	1750.966781	1731.147864	1731.147864
Chihuahua	1716.460145	1697.917571	3535.339134	3534.044754
Colima, Colima	2174.139572	1758.617839	3322.31045	3306.188777
Tuxtla Gutiérrez	2080.752959	1744.366368	3017.735472	3025.816358
Cadereyta Jiménez	2719.173301	2980.599525	2719.173301	2719.173301
Monterrey	3596.435192	3559.525535	3516.7972	3515.511382
Victoria, Tamps.	3115.678885	3088.282282	3593.507989	3593.435708
Navolato	3706.977735	4263.906145	3706.977735	3706.977735
Mazatlán	4168.049047	4161.45837	3519.147932	3518.059875
Mérida	5040.015034	4260.003999	3160.119435	3158.591285
Matamoros, Tamps	3019.960712	3098.705653	3521.514868	3519.533855
Macuspana, Tabs.	3469.407996	3858.216293	3469.407996	3469.407996
Acuña, Coah	3645.228576	4360.177687	3645.228576	3645.228576

Navojoa	4114.087735	5085.206	4114.087735	4114.087735
Rio Bravo, Tamps	3532.174979	4140.882687	3532.174979	3532.174979
Guasave	4054.644988	5169.881289	4054.644988	4054.644988
Ahome, Sin.	5008.549193	5776.236719	5008.549193	5008.549193
Hermosillo	6561.853562	6408.602892	3507.253793	3505.376305
Cájeme	5241.32943	5752.954985	5241.32943	5241.32943
Mexicali	7492.470893	7334.195008	3732.154088	3733.818721
San Luis Río Colorado	5536.29104	6273.934317	5536.29104	5536.29104

**Tabla 16.** Pronóstico de consumo eléctrico por escenario climático a largo plazo.  
Elaboración propia (2024).

Localidad	Escenario SSP1-2.6	Escenario SSP2-4.5	Escenario SSP3-7.0	Escenario SSP5-8.5
Aguascalientes	1173.68	1173.68	1173.68	1173.68
Cuautemoc, Chihuahua	1173.68	1173.68	1173.68	1173.68
Durango	1173.68	1173.68	1173.68	1173.68
Morelia, Michoacan	1173.68	1173.68	1173.68	1173.68
San Miguel de Allende	1173.68	1173.68	1173.68	1173.68
Hidalgo del Parral, Chich.	1275.21	1290.64	1309.68	1323.16
Cuautla	1307.98	1332.00	1366.38	1415.91
Rioverde	1275.89	1389.60	1399.60	1430.09
Matehuala, SLP	1327.19	1348.10	1365.70	1388.92
San Andrés Tuxtla	1301.55	1314.34	1350.62	1390.09
Puerto Vallarta	2504.26	2594.64	2710.92	2782.40
Villa de Alvarez	1866.03	1986.19	2108.05	2276.61
Chihuahua	1756.53	1839.85	1895.58	1947.14
Colima, Colima	1883.44	1997.72	2130.15	2299.95
Tuxtla Gutierrez	1794.32	1916.42	2017.66	2202.71
Juárez, Chihuahua	2135.22	2169.81	2214.35	2235.33
Cadereyta Jiménez	3119.57	3375.41	3500.47	3691.12
Monterrey	3711.82	3929.85	4026.15	4206.32
Victoria, Tamps.	3264.88	3464.08	3595.84	3839.53
Navolato	4492.35	4883.53	5173.58	5618.56
Mazatlan	4461.23	4850.65	5260.40	5674.86
Mérida	4369.65	4834.80	5024.11	5436.71
Matamoros, Tamps	3307.00	3579.85	3831.17	4046.78
Macuspana, Tabs.	3977.06	4487.90	4815.07	5190.39
Acuña, Coah	4293.66	4708.16	4837.60	5430.00
Navojoa	4675.85	5426.04	5760.41	6541.37
Rio Bravo, Tamps	4294.04	4526.54	4768.53	5072.95
Guasave	5184.63	5363.88	5779.99	6444.10
Ahome, Sin.	6030.33	6797.38	7338.15	8058.57
Hermosillo	6513.55	7000.67	7411.03	7907.59
Cájeme	6037.24	7006.42	7736.72	8394.68
Mexicali	7800.41	8126.80	8554.96	8789.83
San Luis Rio Colorado	6725.80	7171.95	7444.40	7203.56

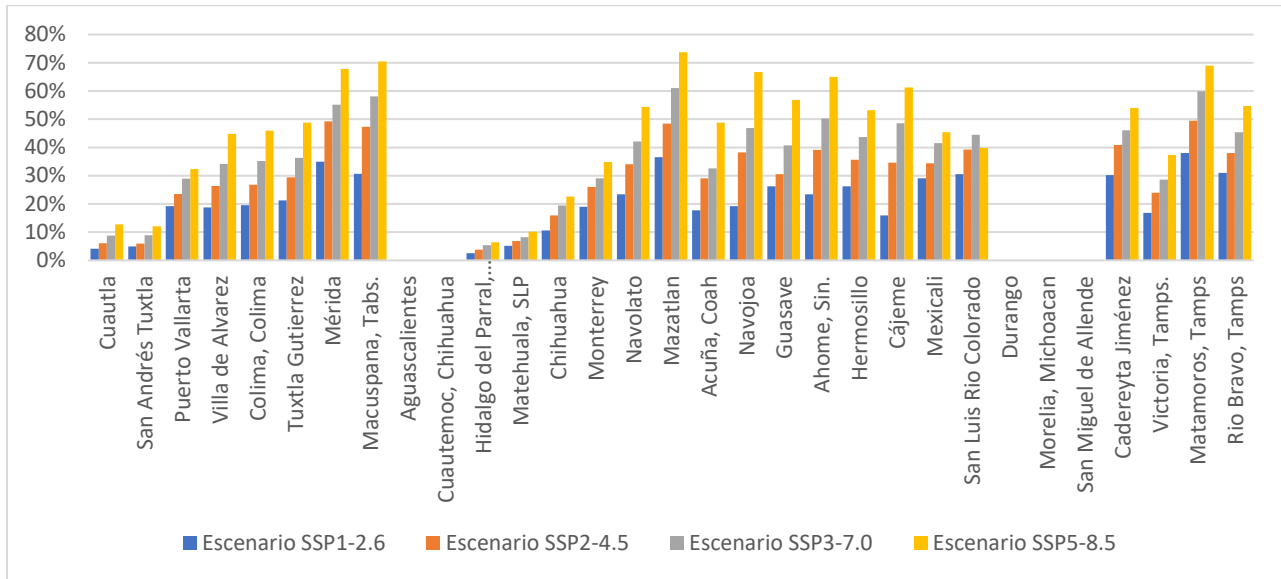
Esto nos permite cuantificar el porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a largo plazo para cada uno de los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways). Dichos escenarios SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5 representan diferentes trayectorias socioeconómicas y climáticas. En términos generales, el consumo eléctrico a largo plazo (hasta 2080) se proyecta que aumentará en todas las localidades estudiadas, con mayor aumento bajo los escenarios más severos de emisiones (como SSP5-8.5).

#### **5.4 Porcentajes de aumento en el consumo eléctrico a mediano y largo plazo bajo escenarios SSP**

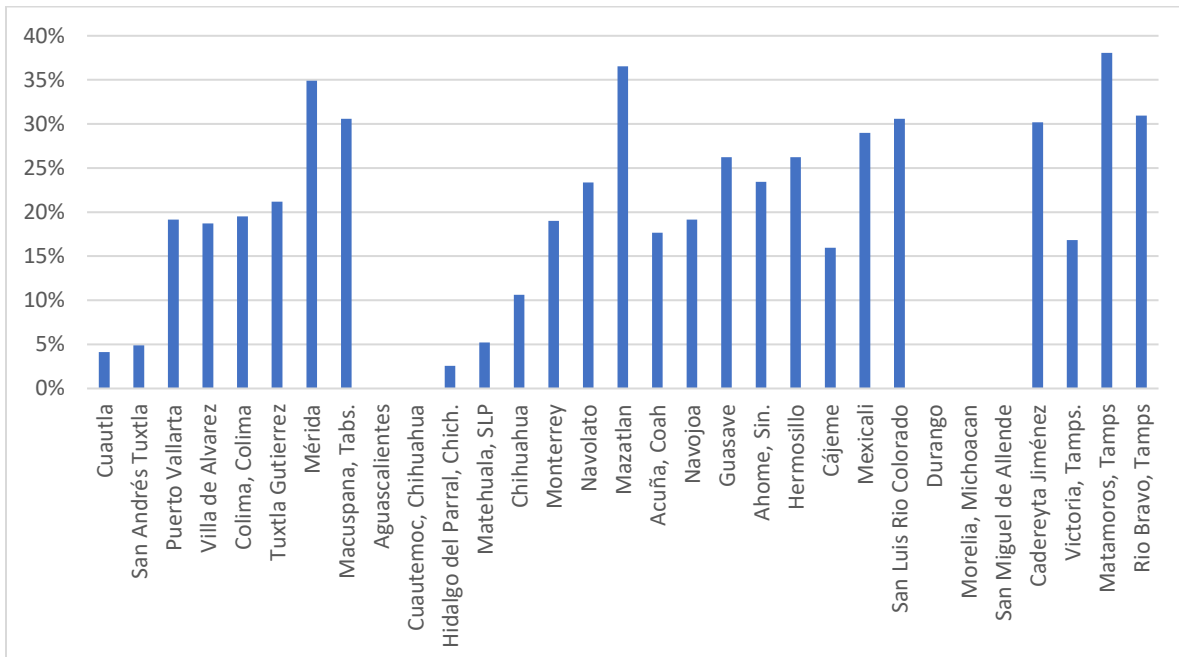
Las Figuras 30, 31, 32 y 33 presentan una representación visual del aumento proyectado en el consumo eléctrico en diversas localidades mexicanas para los años 2050 y 2080, tomando en cuenta los escenarios climáticos definidos por los SSP. Estas figuras permiten comprender la relación directa entre los niveles de emisiones de gases de efecto invernadero y el incremento en la demanda de energía eléctrica, particularmente en el sector doméstico.

De manera general, los incrementos más pronunciados en el consumo eléctrico se observan bajo los escenarios más extremos, como el SSP5-8.5. Este escenario muestra cómo las temperaturas crecientes intensifican la necesidad de utilizar sistemas de refrigeración, especialmente en regiones cálidas y secas. Como ejemplo, en localidades de Mexicali y Cadereyta Jiménez, el consumo eléctrico proyectado aumenta significativamente en todos los escenarios. Sin embargo, la magnitud del aumento es notablemente mayor en los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5. Estos resultados subrayan la vulnerabilidad de estas localidades a los efectos del cambio climático y la dependencia creciente de la climatización artificial para mantener condiciones de confort térmico. No solo proporcionan una visión clara de los posibles futuros energéticos de México, sino que también sirven como herramienta para sensibilizar a las personas con poder de decisión sobre

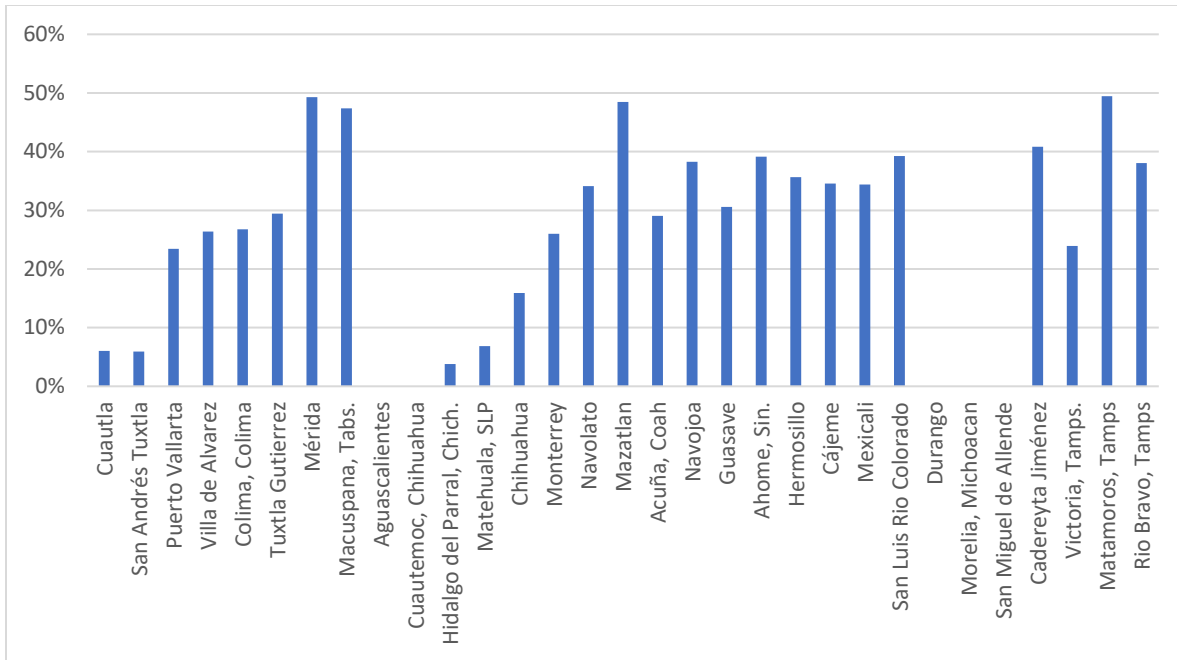
la importancia de mitigar los impactos del cambio climático mediante estrategias sostenibles e innovadoras.



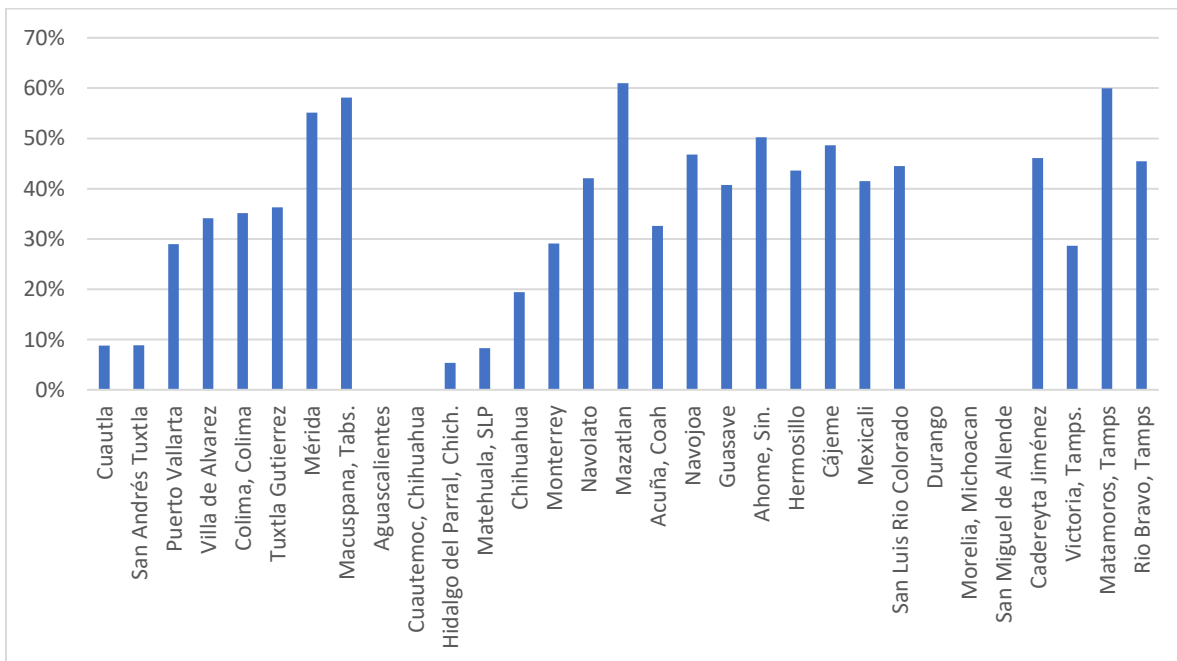
**Figura 30.** Porcentajes de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5 para distintas localidades de México.



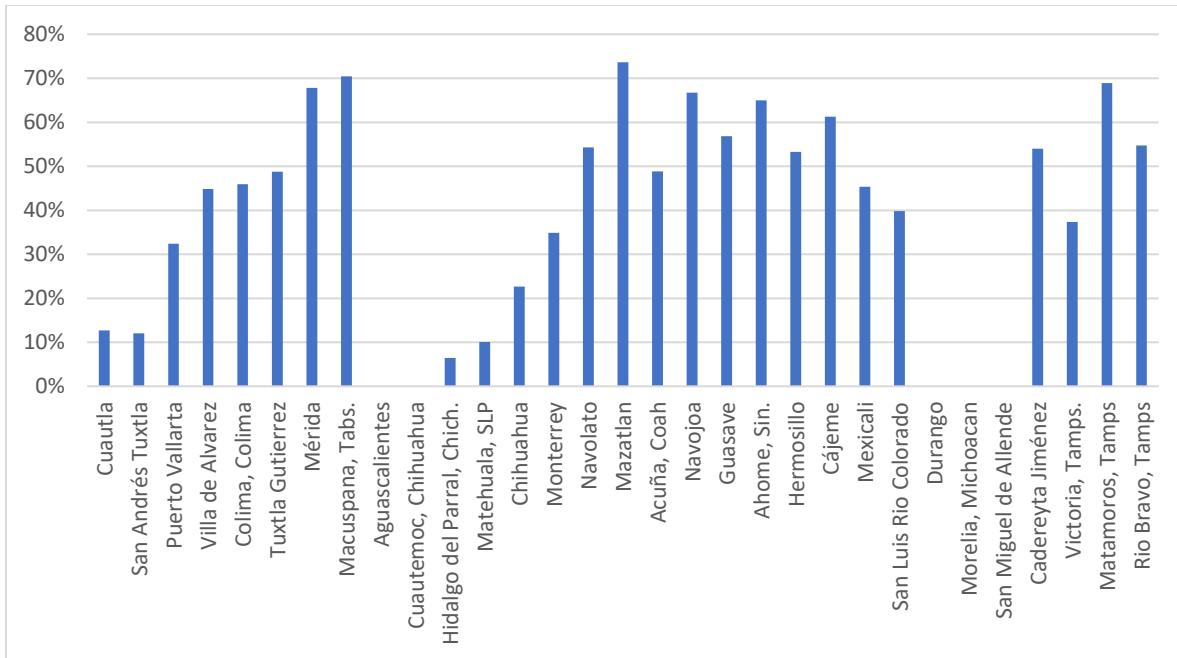
**Figura 31.** Porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo el escenario SSP1-2.6 (Shared Socioeconomic Pathways) para distintas localidades de México.



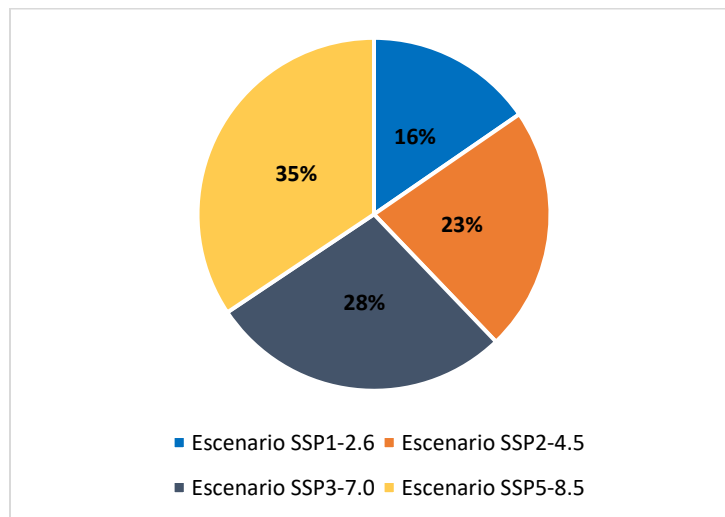
**Figura 32.** Porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo el escenario SSP2-4.5 (Shared Socioeconomic Pathways) para distintas localidades de México.



**Figura 33.** Porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo el escenario SSP3-7.0 (Shared Socioeconomic Pathways) para distintas localidades de México.



**Figura 34.** Porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo el escenario SSP5-8.5 (Shared Socioeconomic Pathways) para distintas localidades de México.



**Figura 35.** Promedio de porcentaje de aumento en el consumo eléctrico a 2080 bajo los escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, y SSP5-8.5.

### 5.5 Potencial de ahorro eléctrico a mediano y largo plazo (2050 y 2080) bajo distintos escenarios SSP

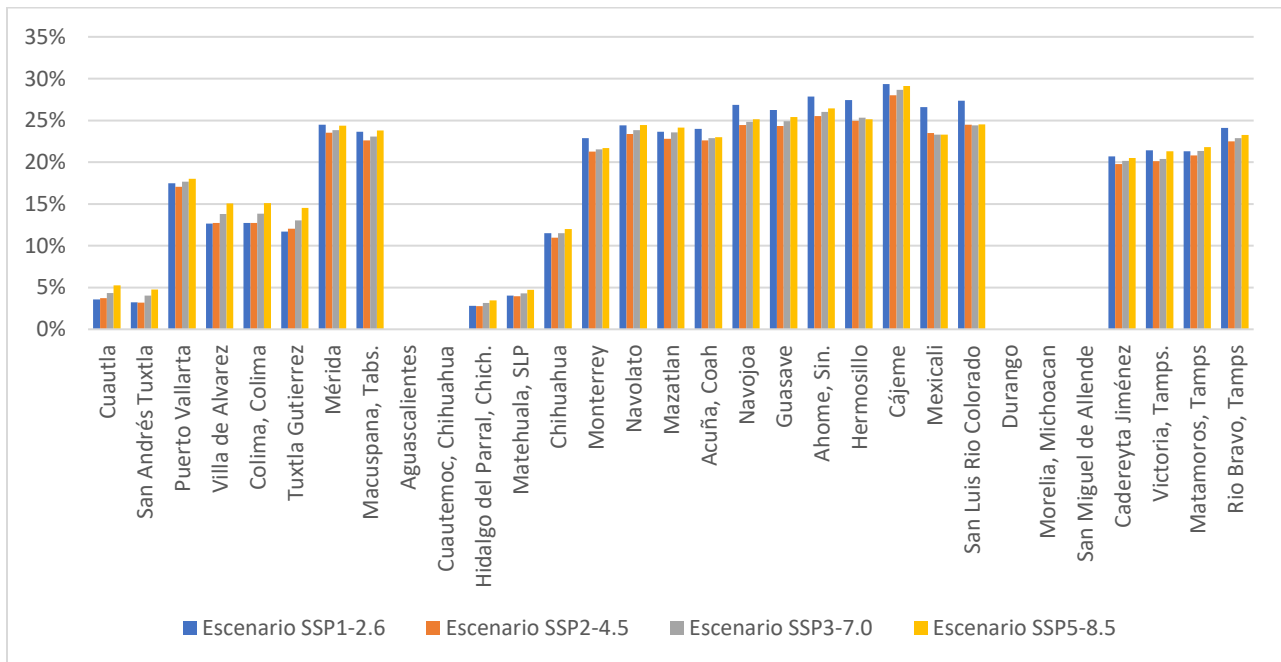
El potencial de ahorro energético en diversas localidades de México, bajo distintos escenarios de cambio climático, se presenta en las Figuras 30, 31, 32 y 33. Dicho potencial se

estima considerando la aplicación de medidas de eficiencia energética, como el aislamiento térmico en muros y techos, así como la sustitución de sistemas de aire acondicionado por mini splits de mayor eficiencia. La sustitución del sistema de aire acondicionado como la aplicación de esta última medida resultan ser las estrategias más efectivas, con ahorros energéticos significativos que podrían alcanzar hasta un 36% hacia el año 2080, especialmente bajo los escenarios de mayor incremento de temperatura. Las localidades con climas extremos y bajo escenarios de altas emisiones (SSP5-8.5) tienen el mayor potencial de ahorro, reflejando la importancia de aplicar estas medidas en áreas de alto consumo energético.

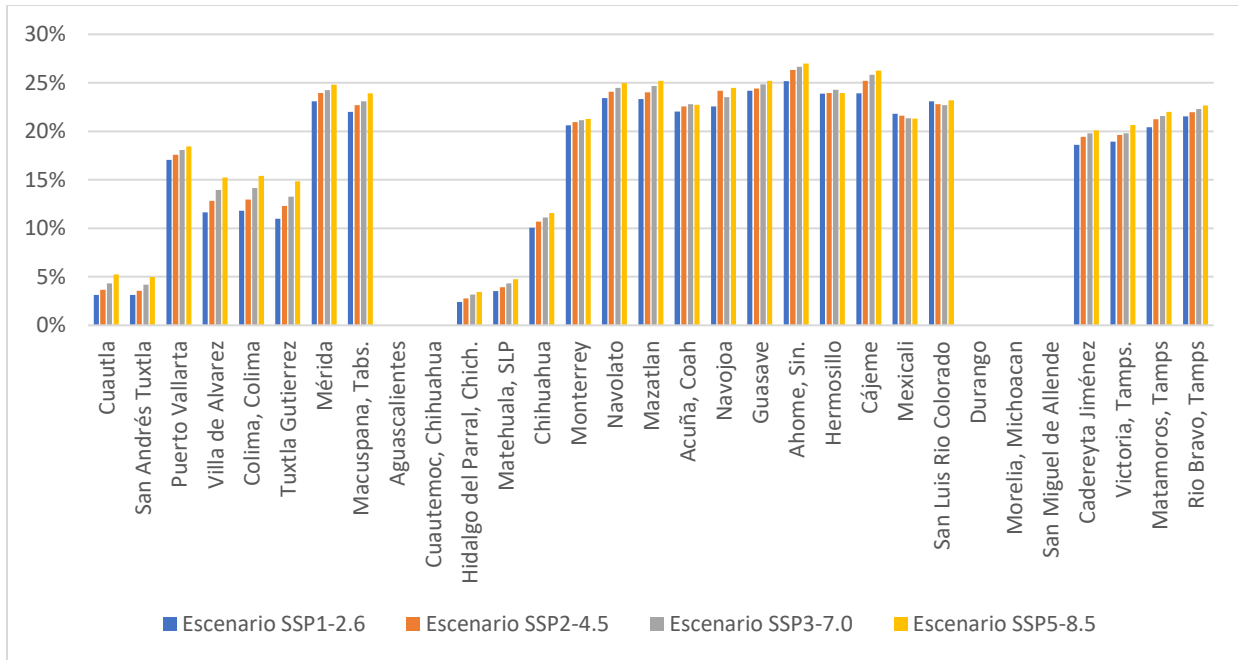
El análisis del potencial de ahorro energético en distintas localidades de México bajo los escenarios climáticos proyectados resalta la importancia de implementar medidas de eficiencia energética. Para reducir el consumo de energía ocasionado por el aumento de las temperaturas ambientales. Las Figuras 36, 37, 38 y 39 presentan las proyecciones de ahorro energético para el año 2080, considerando la aplicación de estrategias como el aislamiento térmico en muros y techos, así como el cambio de aire acondicionado de baja eficiencia convencionales por equipos mini splits de alta eficiencia energética.

Entre las medidas evaluadas, se observa que el aislamiento térmico en techos y muros, junto con la sustitución de equipos de climatización, son las acciones más efectivas para reducir el consumo de energía eléctrica. Estas estrategias pueden generar ahorros sustanciales, alcanzando hasta un 36% del consumo eléctrico proyectado en 2080, especialmente en los escenarios climáticos más severos, como el SSP5-8.5. Este nivel de ahorro es particularmente relevante en localidades con climas extremos, donde las altas temperaturas demandan tener aire acondicionado por ser una necesidad de bienestar para la población.

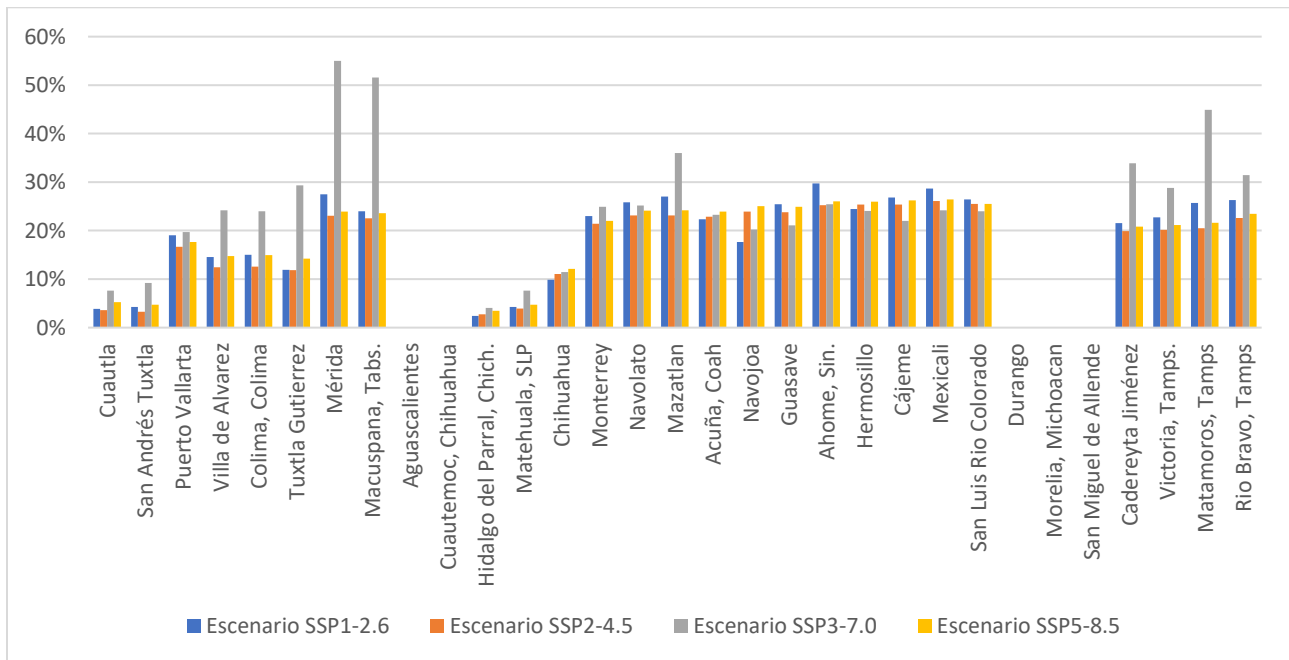
En ciudades como Mexicali y Cadereyta Jiménez, el potencial de ahorro energético es mayor debido al alto consumo asociado con la climatización. En estas localidades, las medidas de eficiencia energética no solo ayudan a reducir la carga eléctrica, sino que también disminuyen los costos energéticos para los hogares y mitigan el impacto ambiental relacionado con la generación de energía. Además, este análisis subraya la relevancia de combinar estas medidas con políticas públicas que promuevan su adopción, como incentivos fiscales para la adquisición de equipos eficientes o programas de apoyo dirigido a la población para el aislamiento térmico en viviendas. La integración de estas medidas puede ser clave para alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático, reducir la demanda y consumo en redes de transmisión y distribución eléctrica para mejorar la continuidad del servicio en beneficio de la población que habita en climas extremos.



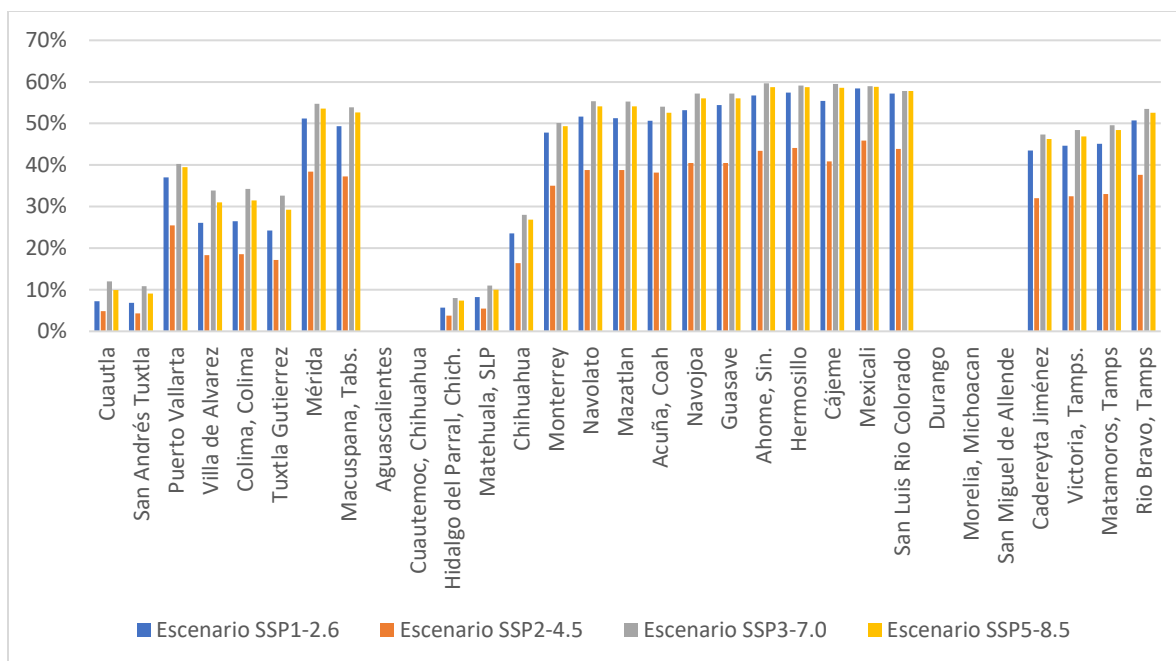
**Figura 36.** Porcentaje de ahorro en el consumo eléctrico a 2080 bajo los 4 escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) utilizando aislamiento térmico en muros para distintas localidades de México.



**Figura 37.** Porcentaje de ahorro en el consumo eléctrico a 2080 bajo los 4 escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) utilizando aislamiento térmico en techo para distintas localidades de México.



**Figura 38.** Porcentaje de ahorro en el consumo eléctrico a 2080 bajo los 4 escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) cambiando a mini Split de EER 15 para distintas localidades de México.



**Figura 39.** Porcentaje de ahorro en el consumo eléctrico a 2080 bajo los 4 escenarios SSP (Shared Socioeconomic Pathways) utilizando aislamiento térmico en techo y muros para distintas localidades de México.

### 5.6 Potencial de ahorro eléctrico promedio a mediano y largo plazo (2050 y 2080)

La gráfica de la figura 40 muestra el potencial de ahorro energético a 2050 bajo dos escenarios climáticos diferentes (SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5). El escenario SSP 2-4.5 muestra un ahorro ligeramente menor (alrededor del 15%) con aislamiento térmico en muros en comparación con el SSP 5-8.5 (cerca de 20%), sin embargo, con aislamiento térmico en techo el SSP 2-4.5 muestra un ahorro cercano al 20%, mientras que en SSP 5-8.5 el valor es significativamente menor (cerca del 10%). La combinación de estas dos medidas es la más efectiva, con un ahorro superior al 35% en SSP 2-4.5 y alrededor de 30% en SSP 5-8.5. Al sustituir el A/C, en ambas barras (SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5), el ahorro es moderado, situándose entre el 15% y el 20%, sin una diferencia significativa entre los dos escenarios.

La gráfica presentada en la Figura 34 ilustra el potencial de ahorro energético proyectado para el año 2050, comparando dos escenarios climáticos clave: SSP 2-4.5 y SSP 5-8.5. Estos

escenarios representan futuros contrastantes en términos de emisiones de gases de efecto invernadero, siendo el SSP 2-4.5 un escenario intermedio con emisiones moderadas y el SSP 5-8.5 un escenario extremo con altas emisiones.

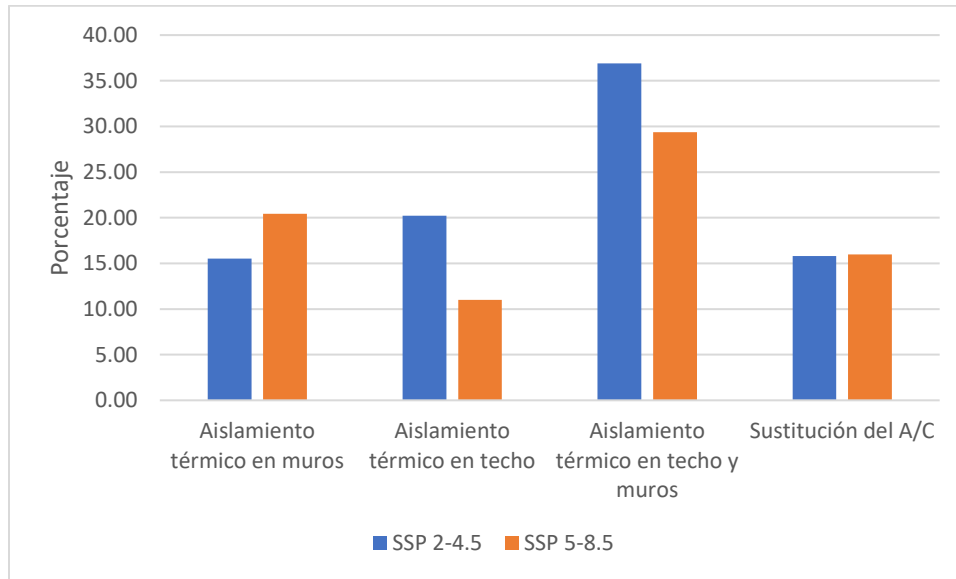
En términos de medidas específicas, el aislamiento térmico en muros muestra una ligera variación entre ambos escenarios. En el SSP 2-4.5, esta acción logra un ahorro energético aproximado del 15%, mientras que en el SSP 5-8.5 el ahorro se incrementa a cerca del 20%. Este mayor potencial en el escenario de altas emisiones se explica por el impacto más marcado de las temperaturas elevadas, las cuales intensifican la demanda de enfriamiento y, en consecuencia, amplifican los beneficios de las mejoras en el aislamiento térmico.

Por otro lado, el aislamiento térmico en techos tiene un comportamiento inverso. En el SSP 2-4.5, el ahorro energético alcanzado ronda el 20%, superando significativamente el ahorro observado en el SSP 5-8.5, que se reduce a aproximadamente un 10%. Esta diferencia puede estar relacionada con factores como la interacción entre las temperaturas exteriores proyectadas y las características térmicas específicas de las viviendas evaluadas.

La combinación de ambas medidas, es decir, el aislamiento térmico en muros y techos, resulta ser la estrategia más efectiva para maximizar el ahorro energético. En el SSP 2-4.5, esta combinación permite un valor superior al 35%, mientras que en el SSP 5-8.5 el ahorro se sitúa alrededor del 30%. Estos resultados evidencian que, incluso en escenarios de altas emisiones, la implementación conjunta de estas medidas tiene un impacto significativo en la reducción del consumo energético.

En cuanto a la sustitución de sistemas de aire acondicionado de baja eficiencia por unidades más eficientes, como los mini splits, el ahorro energético proyectado es más consistente entre los dos escenarios. Tanto en el SSP 2-4.5 como en el SSP 5-8.5, esta medida logra un ahorro moderado

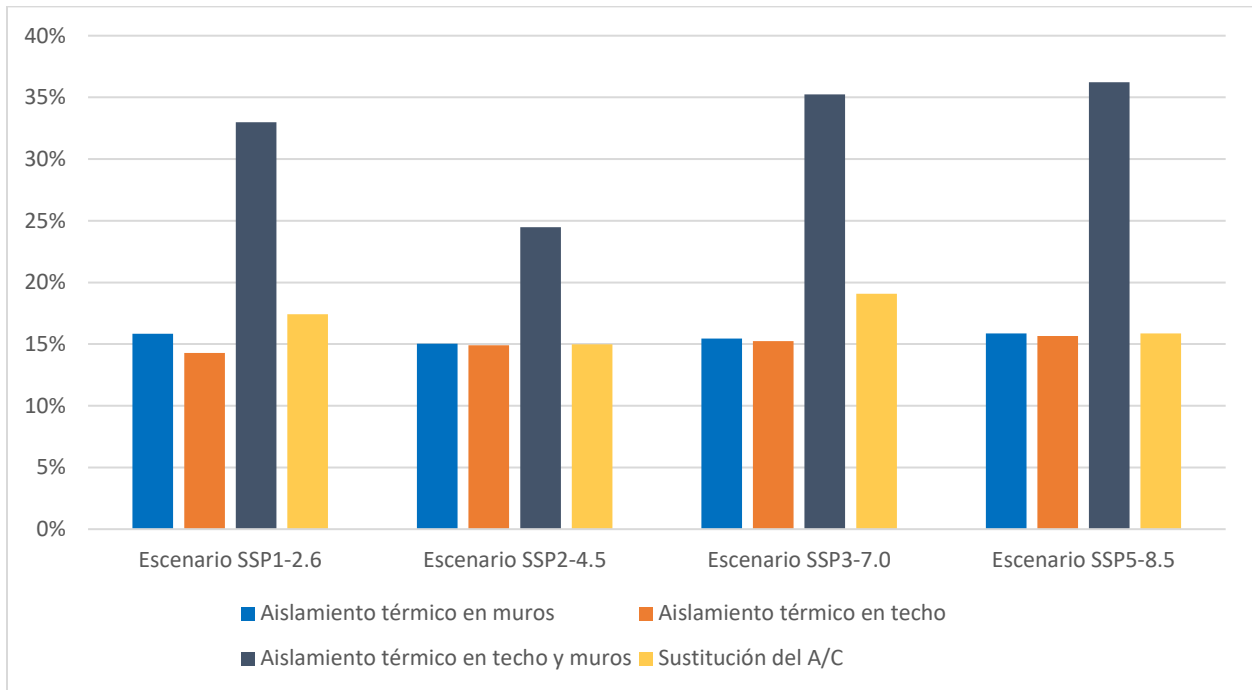
que oscila entre el 15% y el 20%, sin diferencias significativas entre ambos casos. Este resultado subraya la efectividad generalizada de la modernización tecnológica en la climatización, independientemente del escenario climático considerado.



**Figura 40.** Potencial de ahorro eléctrico promedio por acción de mejora energética y escenario climático a mediano plazo

El potencial de ahorro energético proyectado para el año 2080 se muestra en la figura 41, bajo diferentes escenarios climáticos (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5) y cuatro medidas de eficiencia energética: aislamiento térmico en muros, aislamiento térmico en techos, aislamiento térmico en techos y muros, y sustitución del sistema de aire acondicionado (A/C). Bajo el escenario SSP1-2.6 (bajas emisiones) y el escenario SSP2-4.5 (emisiones moderadas), el aislamiento térmico en techos y muros ofrece el mayor ahorro, cercano al 35% y 30% respectivamente, mientras que las otras medidas también son efectivas, con el aislamiento térmico en muros y la sustitución del A/C aportando ahorros del orden del 15% para el primer escenario. El aislamiento térmico en muros o en techos presentan ahorros menores, alrededor del 15% para el escenario SSP2-4.5 y la sustitución del A/C tiene un ahorro cercano al 20%.

Para el escenario SSP3-7.0 (emisiones elevadas) y el escenario SSP5-8.5 (emisiones muy elevadas), nuevamente el aislamiento térmico en techos y muros es la medida más eficaz, con un ahorro del 35% para ambos. El aislamiento térmico en techos y la sustitución del A/C también generan ahorros cercanos al 20%.



**Figura 41.** Potencial de ahorro eléctrico promedio por acción de mejora energética y escenario climático a largo plazo.

### 5.7 Potencial de ahorro a mediano y largo plazo para los distintos tipos de clima bajo escenarios SSP

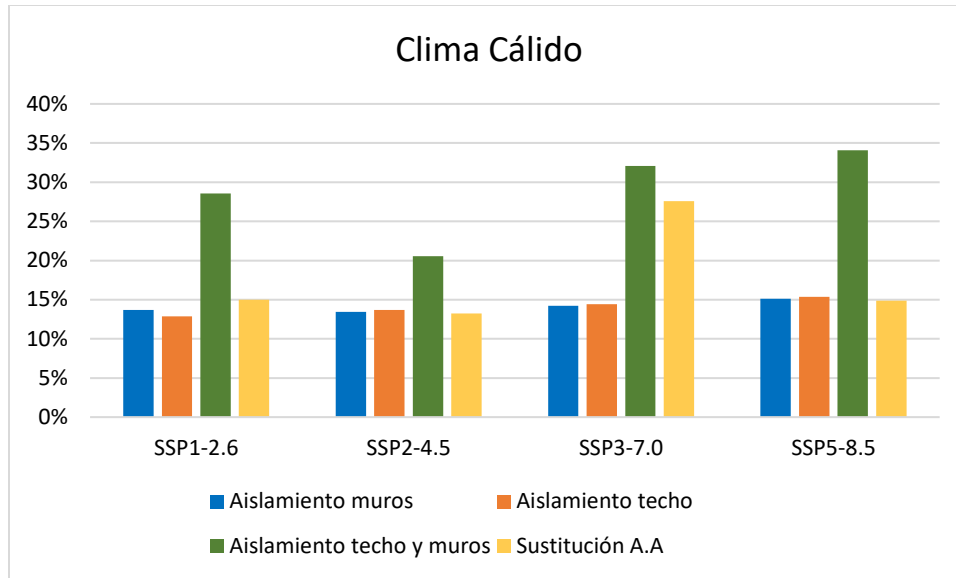
Las figuras 42, 43 y 44 representan el potencial de ahorro energético a largo plazo para un clima cálido, seco y templado respectivamente bajo diferentes escenarios climáticos SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5), así como distintas acciones de mejora energética. De acuerdo a la figura 36 la acción más efectiva para clima cálido bajo los cuatro escenarios SSP es el aislamiento en techos y muros, con ahorros entre el 25 y 30%, mientras que las demás medidas,

como el aislamiento en techos y muros, y la sustitución del A.A., ofrecen ahorros menores, alrededor del 15-20%.

Las figuras 36, 37 y 38 ilustran el potencial de ahorro energético a largo plazo en localidades representativas de climas cálidos, secos y templados, respectivamente, analizando su comportamiento bajo los diferentes escenarios climáticos SSP (SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5). Estas gráficas permiten evaluar la efectividad de diversas acciones de mejora energética implementadas para reducir el consumo eléctrico proyectado hacia el año 2080.

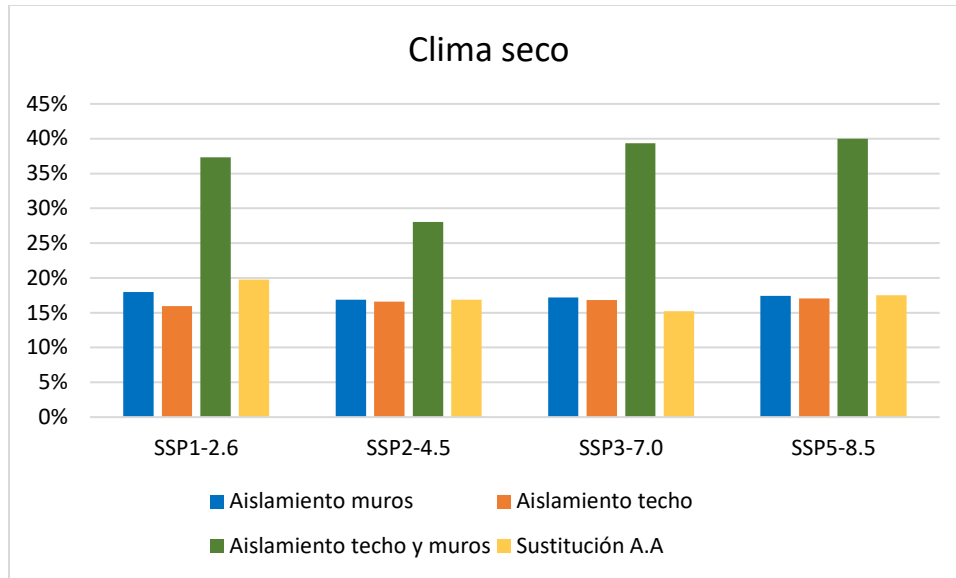
En el caso del clima cálido, representado en la figura 36, se observa que la medida más efectiva bajo los cuatro escenarios SSP es la combinación de aislamiento térmico en techos y muros. Esta acción permite alcanzar ahorros significativos en el consumo eléctrico, con valores que oscilan entre el 25 y el 30%, dependiendo del escenario analizado. Este resultado pone de manifiesto la importancia de mejorar la envolvente térmica de las viviendas en regiones cálidas, donde la mayor parte de la demanda energética está relacionada con la refrigeración de espacios.

En contraste, otras medidas, como la implementación de aislamiento únicamente en techos o en muros por separado, así como la sustitución de sistemas de aire acondicionado de baja eficiencia por equipos más eficientes, ofrecen ahorros menores, situándose en un rango aproximado del 15 al 20%. Si bien estas acciones también son efectivas, su impacto es más limitado en comparación con la integración de varias medidas. En climas cálidos, donde las temperaturas extremas se agudizan bajo escenarios de altas emisiones como el SSP5-8.5, la combinación de medidas resulta crucial no solo para reducir el consumo energético, sino también para mitigar el impacto económico y ambiental del cambio climático.



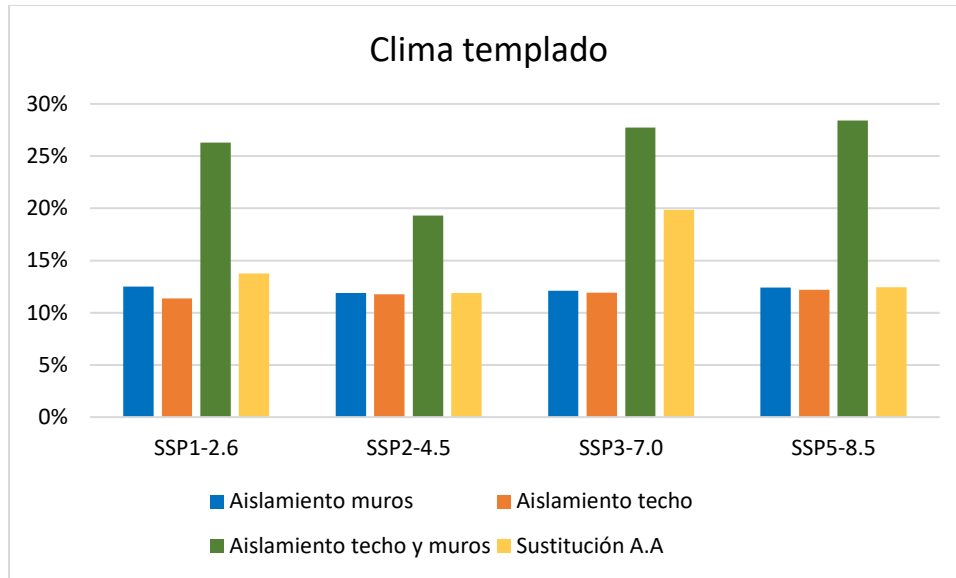
**Figura 42.** Potencial de ahorro por acción de mejora energética y escenario climático a largo plazo para clima cálido.

En los escenarios para clima seco (figura 37), el aislamiento combinado en techos y muros es la medida de mejora energética más efectiva en todos los escenarios climáticos, con ahorros que oscilan entre el 25% y 40%. Las otras medidas, como el aislamiento individual (muros o techos) y la sustitución del aire acondicionado, generan ahorros más moderados, alrededor del 15-20%. A medida que los escenarios climáticos son más severos (SSP3-7.0 y SSP5-8.5), las medidas de aislamiento térmico combinadas presentan un mayor potencial de ahorro, lo cual es coherente con el hecho de que los climas más extremos requerirán mayores esfuerzos de enfriamiento.



**Figura 43.** Potencial de ahorro por acción de mejora energética y escenario climático a largo plazo para clima seco.

El aislamiento combinado en techos y muros es la medida de eficiencia energética más efectiva en todos los escenarios climáticos, con ahorros que varían entre el 20% y 25% en climas templados como se muestra en la figura 38. El aislamiento en techos o muros, y la sustitución del aire acondicionado, presentan ahorros moderados, alrededor del 10-20%. A medida que el escenario climático es más severo (SSP3-7.0 y SSP5-8.5), el potencial de ahorro con el aislamiento combinado sigue siendo la opción más eficaz, mientras que otras medidas, como la sustitución del A.A., también aumentan su efectividad.



**Figura 44.** Potencial de ahorro por acción de mejora energética y escenario climático a largo plazo para clima templado

El aislamiento térmico combinado en techos y muros es la medida más efectiva en todos los tipos de clima, pero su impacto es mayor en climas extremos (cálidos), porque reduce significativamente la necesidad de enfriamiento. En climas más moderados, como los templados, el impacto del aislamiento es menor, pero sigue siendo efectivo para mantener un consumo energético eficiente durante todo el año. Estas medidas cuando se combinan con otras acciones como la sustitución de sistemas de aire acondicionado o mejoras en la envolvente térmica, pueden maximizar el ahorro energético, especialmente en climas extremos o bajo escenarios climáticos de altas emisiones.

Este capítulo muestra que el cambio climático incrementará la demanda eléctrica residencial en todas las localidades, con mayor intensidad en regiones cálidas y secas. Además, que los escenarios SSP3-7.0 y SSP5-8.5 representan los mayores riesgos en términos de incremento de consumo.

Las medidas de eficiencia energética son altamente efectivas y pueden compensar entre 20% y 36% del aumento proyectado, siendo el aislamiento térmico en techos y muros la medida

más eficaz en todos los climas. Estos resultados pueden justificar la necesidad legislar políticas públicas que pueden instrumentar apoyos, incentivos para el acceso a equipos eficientes y programas de rehabilitación térmica en viviendas.

## **Capítulo 6. Discusión de resultados**

El cambio climático representa un factor muy importante al considerar el aumento del consumo eléctrico del sector residencial. Los resultados obtenidos muestran que las Horas Grado de Enfriamiento (HGE), presentan aumentos en la mayoría de las localidades analizadas, especialmente en regiones cálidas y secas del país. Estas tendencias concuerdan con los escenarios de aumento de temperatura proyectados bajo trayectorias de emisiones medias y altas (SSP3-7.0 y SSP5-8.5), reforzando evidencias previas sobre el incremento sostenido del estrés térmico en zonas las zonas áridas de nuestro país.

La distribución climática analizada evidencia que los climas cálidos y secos presentan no solo mayores HGE, sino también una sensibilidad más marcada a los aumentos de temperaturas proyectadas hacia 2050 y 2080. Esta vulnerabilidad climática se traduce directamente en un aumento en el consumo eléctrico asociado al uso del aire acondicionado. Localidades como Mexicali, Hermosillo, Monterrey, Navojoa o Acuña registran aumentos considerables de consumo incluso en escenarios optimistas (SSP1-2.6), confirmando una demanda de energía eléctrica cada vez mayor en el sector residencial.

Los escenarios sin medidas de eficiencia muestran que la demanda de electricidad aumentará en casi todas las localidades, alcanzando incrementos muy altos bajo escenarios de altas emisiones. Esto demuestra la necesidad de implementar medidas de eficiencia energética orientadas a reducir la carga térmica de las viviendas y su dependencia del aire acondicionado. De igual forma, los resultados confirman que las viviendas ubicadas en climas templados también

experimentarán incrementos, aunque con menor magnitud, lo cual evidencia que el cambio climático tendrá un efecto generalizado en el sector residencial del país.

La evaluación de las medidas de eficiencia energética revela que las intervenciones pasivas, particularmente el aislamiento térmico en techos y muros, constituyen la estrategia más eficaz para reducir el consumo energético en el futuro. Su impacto es consistente en todos los tipos de clima y en todos los escenarios SSP, alcanzando ahorros superiores al 30% en circunstancias extremas. También que la sustitución del aire acondicionado por equipos de alta eficiencia posee un alto potencial de ahorro energético, especialmente en regiones cálidas donde el uso de estos equipos es más prolongado. Estas dos medidas demuestran que la combinación de estrategias pasivas y activas son necesarias para lograr reducciones significativas del consumo eléctrico residencial.

Asimismo, el análisis por tipo de clima revela diferencias importantes en la efectividad de las medidas. En climas cálidos y secos, donde la demanda de enfriamiento es dominante y las temperaturas extremas se intensifican bajo escenarios futuros, el aislamiento térmico combinado ofrece los mayores beneficios. En climas templados, aunque el ahorro es menor, la implementación de medidas sigue siendo pertinente, ya que contribuiría a estabilizar la demanda eléctrica nacional ante el cambio climático. Esto sugiere que las políticas públicas deben considerar enfoques diferenciados por región climática.

Finalmente, este estudio destaca la importancia de integrar las proyecciones climáticas en la planificación energética del país. A medida que el cambio climático avanza, la presión sobre los sistemas eléctricos residenciales aumentará de forma considerable, lo que exigirá no solo mejoras tecnológicas y constructivas en las viviendas, sino también estrategias de eficiencia energética impulsadas por políticas públicas, incentivos fiscales, normativas actualizadas y programas de

apoyo para viviendas vulnerables. Las simulaciones presentadas en esta tesis constituyen una base sólida para fundamentar estas acciones.

## **Capítulo 7. Conclusiones y trabajos futuros**

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar el impacto del cambio climático en el consumo eléctrico del sector doméstico en México, así como determinar el potencial de ahorro derivado de la aplicación de medidas de eficiencia energética en diferentes tipos de clima y localidades del país. Con base en los resultados obtenidos y en los objetivos planteados, se presentan las siguientes conclusiones:

### **1. Hipótesis.**

Los resultados confirman la hipótesis planteada en esta investigación: El aislamiento térmico en techo y muros es actualmente, y seguirá siendo hasta el año 2050, incluso 2080, la estrategia con mayor potencial de ahorro eléctrico en cualquier tipo de clima y localidad geográfica de México analizada.

Los resultados de las simulaciones muestran que esta medida es la más eficaz de todas las evaluadas, reduce entre 25% y 36% el consumo de energía eléctrica futuro, dependiendo del clima y del escenario SSP, mantiene su efectividad incluso bajo los escenarios climáticos más severos (SSP3-7.0 y SSP5-8.5), y presenta impactos significativos en climas cálidos y secos, donde la carga térmica es mayor.

Esto demuestra que mejorar la envolvente térmica de la vivienda típica mexicana es de suma importancia para reducir el aumento proyectado en la demanda de enfriamiento.

### **2. Relativas al objetivo general.**

El análisis del consumo eléctrico de la vivienda típica mexicana bajo escenarios climáticos futuros permitió identificar que el cambio climático aumentará considerablemente el consumo

eléctrico residencial, especialmente debido a la mayor frecuencia e intensidad de periodos cálidos. También que las localidades ubicadas en climas cálidos y secos registran los mayores incrementos de HGE y, por tanto, mayor incremento en el consumo de electricidad hacia los años 2050 y 2080.

Sobre las medidas de eficiencia energética, especialmente el aislamiento térmico, tienen un alto potencial de ahorro energético, capaz de reducir significativamente el consumo de energía eléctrica previsto. De esta manera, el objetivo general se cumple al demostrar cuantitativamente cómo las medidas de eficiencia energética pueden modificar el consumo eléctrico futuro en el sector doméstico.

### 3. Objetivos específicos.

Objetivo específico 1: Características constructivas de la vivienda típica mexicana, se definió una vivienda representativa basada en criterios estructurales, materiales predominantes y características constructivas comunes en el país. Esta definición permitió realizar simulaciones homogéneas y comparables por localidad.

Objetivo específico 2: Cálculo histórico y proyección de HGE, el análisis de HGE (2000–2020) reveló aumentos importantes en la carga térmica en climas cálidos y secos. Las proyecciones a 2050 muestran incrementos adicionales bajo todos los escenarios SSP. Las HGE demostraron ser un indicador robusto y adecuado para modelar la demanda energética futura.

Objetivo específico 3: Simulación del consumo eléctrico actual y futuro; las simulaciones energéticas demostraron que el consumo eléctrico residencial crecerá de forma sostenida, con incrementos especialmente altos en el noroeste (Mexicali, Hermosillo, Navojoa), noreste (Monterrey, Acuña, Nuevo Laredo) y sureste del país (Mérida, Macuspana),

Objetivo específico 4: Determinación del consumo eléctrico hasta 2050; el consumo proyectado bajo escenarios climáticos futuros demostró ser altamente sensible a la temperatura. Bajo SSP5-8.5, algunas localidades podrían superar incrementos superiores al 30% hacia 2050.

Objetivo específico 5: Evaluación del consumo con medidas de eficiencia energética. Para cumplir con este objetivo se evaluaron cinco acciones de eficiencia energética de manera independiente. El aislamiento en techo y muros fue consistentemente la medida más efectiva, superando al aislamiento individual y a la sustitución del aire acondicionado.

Objetivo específico 6: Evaluación del potencial de ahorro hasta 2050; Los resultados demostraron que el potencial de ahorro depende del clima, pero en todos los escenarios el aislamiento combinado fue la medida con mayor impacto. Asimismo, el ahorro se incrementa conforme el escenario climático es más severo. La sustitución del aire acondicionado también presenta beneficios importantes, aunque inferiores al aislamiento.

De manera general el estudio de evaluación del consumo energético proyectado para México bajo distintos escenarios climáticos futuros resalta la importancia de implementar medidas de eficiencia energética para mitigar los efectos del cambio climático en el sector doméstico. Los resultados muestran que las temperaturas crecientes, especialmente bajo escenarios de altas emisiones (SSP 5-8.5), incrementarán significativamente el consumo eléctrico debido a una mayor demanda de sistemas de refrigeración, afectando particularmente a localidades con climas cálidos y extremos, como Mexicali y Cadereyta Jiménez.

Medidas como el aislamiento térmico en muros y techos, la sustitución de sistemas de aire acondicionado de baja eficiencia por mini splits más eficientes y la promoción del diseño térmico pasivo se identifican como estrategias clave para reducir el consumo energético. En particular, la combinación de aislamiento térmico en muros y techos demuestra ser la más exitosa, logrando

ahorros de hasta el 36% en escenarios de largo plazo (2080). Estas estrategias no solo contribuyen a disminuir los costos operativos y las emisiones de gases de efecto invernadero, sino que también ayudan a reducir la presión sobre las redes eléctricas y los recursos energéticos, incrementando la resiliencia del sistema energético nacional.

El estudio muestra que, en un contexto de cambio climático, México enfrentará un aumento considerable en la demanda eléctrica residencial hacia 2050 y 2080. Sin embargo, la implementación oportuna de medidas de eficiencia energética, en especial el aislamiento térmico en techo y muros, puede mitigar significativamente estos impactos, reducir los costos energéticos de los hogares y aumentar la resiliencia energética del país.

Finalmente, los resultados reflejados en este trabajo proporcionan una herramienta que puede servir como base para políticas públicas orientadas a mejorar la calidad térmica de la vivienda, incentivar la adopción de equipos eficientes e incorporar criterios climáticos en la planeación energética nacional.

## **7.1 Recomendaciones**

Con base en los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas del análisis del consumo eléctrico residencial bajo escenarios actuales y futuros de cambio climático, se presentan algunas recomendaciones orientadas a fortalecer la eficiencia energética, como implementar aislamiento térmico en techo y muros como medida prioritaria, dado que esta acción demuestra el mayor potencial de ahorro en todos los climas y escenarios futuros, se recomienda su adopción inmediata en viviendas nuevas y existentes, especialmente en regiones cálidas y cálidas secas. Asimismo, fomentar la sustitución de equipos de aire acondicionado por unidades de alta eficiencia, particularmente en dichas zonas donde la climatización es indispensable. Se recomienda actualizar las normas de construcción para incorporar requerimientos térmicos mínimos

e integrar estándares obligatorios de aislamiento en techos, muros y ventanas que reduzcan la demanda energética futura.

También desarrollar programas estatales diferenciados por clima, pues cada región requiere estrategias específicas como aislamiento prioritario en climas cálidos y secos, equipos eficientes en climas templados, etc.

## **7.2 Recomendaciones para futuras investigaciones**

Evaluar la interacción de múltiples medidas de eficiencia energética aplicadas simultáneamente, pues este estudio analizó medidas de manera aislada; la combinación podría generar reducciones aún mayores.

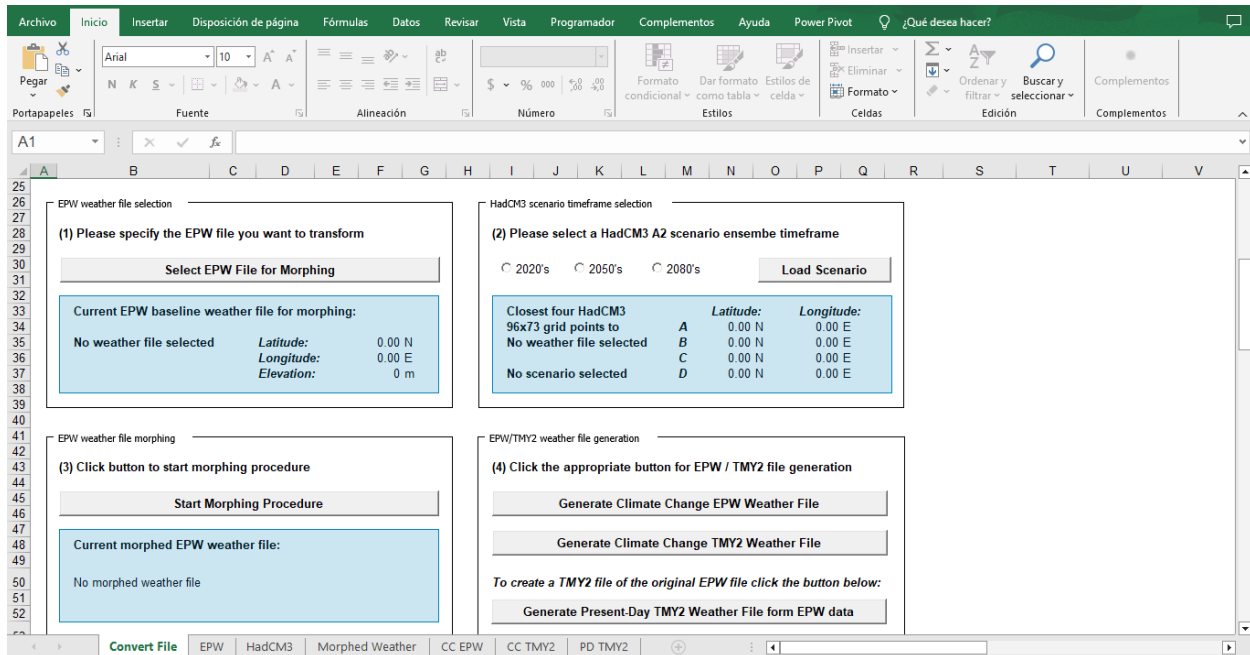
Ampliar el análisis a otros tipos de vivienda, incluyendo multifamiliar, autoconstrucción y vivienda social con materiales alternativos.

Incorporar proyecciones socioeconómicas y de crecimiento urbano para evaluar cómo la expansión de ciudades podría modificar la demanda eléctrica residencial futura.

## **Anexos**

Otra opción considerada, probada pero no utilizada como herramienta final en este estudio fue el generador de archivos meteorológicos mundiales sobre el cambio climático (CCWorldWeatherGen) utiliza datos resumidos del modelo TAR del IPCC del conjunto experimental HadCM3 A2 que está disponible en el DDC del IPCC. La herramienta le permite generar archivos meteorológicos de cambio climático listos para usar en programas de simulación de rendimiento de edificios. Está basado en Microsoft® Excel y transforma archivos meteorológicos EPW "actuales" en archivos meteorológicos EPW o TMY2 de cambio climático que son compatibles con la mayoría de los programas de simulación del rendimiento de edificios.

Las rutinas subyacentes de generación de archivos meteorológicos de esta herramienta se basan en la denominada metodología de "morphing" para la transformación de datos meteorológicos sobre el cambio climático, desarrollada por Belcher, Hacker y Powell (Jentsch, 2012). Además, la herramienta CCWorldWeatherGen incluye más rutinas de cálculo para generar archivos EPW y TMY2 listos para simulación. Se ilustra su pantalla de inicio en la Fig. 13.



**Figura 45.** CCWorldWeatherGen pantalla inicio

## Referencias

- Aditya, L., Mahlia, T. M. I., Rismanchi, B., Ng, H. M., Hasan, M. H., Metselaar, H. S. C., Muraza, O., & Aditiya, H. B. (2017). A review on insulation materials for energy conservation in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73(February 2019), 1352–1365. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.034>
- Al-Absi, Z. A., Asif, M., & Hafizal, M. I. M. (2024). Optimization study for PCM application in residential buildings under desert climatic conditions. *Journal of Energy Storage*, 104. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114399>
- Al-mudhafar, A. H. N., Hamzah, M. T., & Tarish, A. L. (2021). Potential of integrating PCMs in residential building envelope to reduce cooling energy consumption. *Case Studies in Thermal Engineering*, 27(May), 101360. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101360>

- Ascione, F., De Masi, R. F., de Rossi, F., Ruggiero, S., & Vanoli, G. P. (2016). Optimization of building envelope design for nZEBs in Mediterranean climate: Performance analysis of residential case study. *Applied Energy*, 183, 938–957. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.027>
- ASHRAE Standard 55. (2004). *ANSI/ASHRAE 55-2004. ASHRAE STANDARD Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (Supersedes ANSI/ASHRAE Standard 55-1992). 2004.* <https://doi.org/10.1007/s11926-011-0203-9>
- AYDIN, D., & MIHLAYANLAR, E. (2020). a Case Study on the Impact of Building Envelope on Energy Efficiency in High-Rise Residential Buildings. *Architecture, Civil Engineering, Environment*, 13(1), 5–18. <https://doi.org/10.21307/acee-2020-001>
- Bolattürk, A. (2008). Optimum insulation thicknesses for building walls with respect to cooling and heating degree-hours in the warmest zone of Turkey. *Building and Environment*, 43(6), 1055–1064. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2007.02.014>
- Castro Da Silva, P. R. (2017). *Estudio de sensibilidad de las características constructivas para edificios residenciales en Quito mediante simulación.* 74. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/17262>
- Castro, S. S., Suárez López, M. J., Menéndez, D. G., & Marigorta, E. B. (2019). Decision matrix methodology for retrofitting techniques of existing buildings. *Journal of Cleaner Production*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118153>
- CFE. (2017). *Datos Abiertos de México - Usuarios y consumo de electricidad por municipio (2010-2017) - Información referente a las ventas y suministro de energía a usuarios de cada municipio por entidad federativa.* <https://datos.gob.mx/busca/dataset/usuarios-y-consumo-de-electricidad-por-municipio-2010-2017/resource/0d2cafb4-3d4f-4f60-ac61-2496914d20aa>
- CFE. (2025). *Esquema tarifario vigente hogar.* <https://app.cfe.mx/Aplicaciones/CCFE/Tarifas/TarifasCRECasa/Casa.aspx>
- CONAVI. (2016). *NAMA apoyada para la Vivienda Existente en México Acciones de Mitigación y Paquetes Financieros.*
- Conuee. (2021). *Estadísticas energéticas en las viviendas mexicanas.* <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estadisticas-energeticas-en-las-viviendas-mexicanas>
- Crawley, D. B., Hand, J. W., Kummert, M., & Griffith, B. T. (2008). Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs. *Building and Environment*, 43(4), 661–673. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2006.10.027>
- Curiel, F., Murguía, L., Camacho, I., & Bojórquez, G. (2021). Análisis del desempeño térmico de un sistema constructivo de ensamblado en clima cálido seco extremo. *RECIT*, 4(4), 256–274.

- de Buen, O. (2019). *Viviendas en climas cálidos, el gran reto de la Conuee*. <https://e-management.mx/viviendas-en-climas-calidos-el-gran-reto-de-la-conuee-2/>
- de Buen, O. (Conuee), & Navarrete, J. I. (Conuee). (2018). *Cuadernos de la Conuee número 1. 1*. <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/325241/cuadernoNo.1revision.pdf>
- de Buen, O., & Navarrete, J. I. (2019). *Análisis de la evolución del consumo eléctrico del sector residencial entre 1982 y 2018 e impactos de ahorro de energía por políticas públicas*. [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/439598/cuaderno2nvciclo\\_1.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/439598/cuaderno2nvciclo_1.pdf)
- de Buen R., O. (CONUEE). (2020). 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/cuaderno5nvciclo.pdf>
- Delgarm, N., Sajadi, B., Azarbad, K., & Delgarm, S. (2018). Sensitivity analysis of building energy performance: A simulation-based approach using OFAT and variance-based sensitivity analysis methods. *Journal of Building Engineering*, 15(July 2017), 181–193. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2017.11.020>
- DOF - Diario Oficial de La Federación, 5002338 1 (2017). [http://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011](http://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5203931&fecha=09/08/2011)
- Ember. (2024). *Electricity Data Explorer*. [https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/?data=demand&fuel=total&entity=World&metric=per\\_capita&entity=Mexico&tab=main&chart=trend](https://ember-energy.org/data/electricity-data-explorer/?data=demand&fuel=total&entity=World&metric=per_capita&entity=Mexico&tab=main&chart=trend)
- Evin, D., & Ucar, A. (2019). Energy impact and eco-efficiency of the envelope insulation in residential buildings in Turkey. *Applied Thermal Engineering*, 154, 573–584. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.102>
- Fang, Z., Zhang, Y., Yang, Y., Zhou, X., & Zheng, Z. (2021). Experimental investigation of standard effective temperature (SET\*) adapted for human walking in an indoor and transitional thermal environment. *Science of the Total Environment*, 793. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.148421>
- FIPATERM. (2014). *Experiencias de FIPATERM Alcance y Resultados*.
- García Haro, A., Cadena Ramírez, J. L., Bojórquez Morales, G., Luna, A., & Vázquez, J. E. (2011). *Confort Térmico y Consumo Energético por uso de Sistemas Constructivos para Muros, en Mexicali Baja California*. Researchgate. [https://www.researchgate.net/publication/315584401\\_Confort\\_Termico\\_y\\_Consumo\\_Energético\\_por\\_uso\\_de\\_Sistemas\\_Constructivos\\_para\\_Muros\\_en\\_Mexicali\\_Baja\\_California](https://www.researchgate.net/publication/315584401_Confort_Termico_y_Consumo_Energético_por_uso_de_Sistemas_Constructivos_para_Muros_en_Mexicali_Baja_California)
- Garnica, S. (2020, September). *Claves para entender la pobreza energética de México*. <https://energiahoy.com/2020/09/22/claves-para-entender-la-pobreza-energetica-de-mexico/>
- Gaterell, M. R., & McEvoy, M. E. (2005). The impact of climate change uncertainties on the performance of energy efficiency measures applied to dwellings. *Energy and Buildings*, 37(9), 982–995. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.12.015>

- GIZ. (2022). *Hacia una Recuperación Verde. Desarrollo de Diagnósticos Energéticos Solidarios. Manual para profesionales de la energía.* [www.giz.de/mexico](http://www.giz.de/mexico)
- GIZ, CONAVI, & SEDATU. (2016). *NAMA apoyada para la Vivienda Existente en México Acciones de Mitigación y Paquetes Financieros.*
- Gómez, G., Soto, S., Suástegui, J. A., Acuña, A., & Magaña, H. D. (2025). A New Proposal for the Use of Cooling Degree Hours for the Energy Simulation of Residential Buildings in Mexico. *Energies* 2025, Vol. 18, Page 4554, 18(17), 4554. <https://doi.org/10.3390/EN18174554>
- Gordillo, G. C., Ruiz, G. R., Stauffer, Y., Dasen, S., & Bandera, C. F. (2020). EplusLauncher: An API to perform complex energyplus simulations in MATLAB® and C#. *Sustainability (Switzerland)*, 12(2), 1–14. <https://doi.org/10.3390/su12020672>
- Griego, D., Krarti, M., & Hernández-Guerrero, A. (2012). Optimization of energy efficiency and thermal comfort measures for residential buildings in Salamanca, Mexico. *Energy and Buildings*, 54, 540–549. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.019>
- Hamilton, I., & Rapf, O. (2020). Executive summary of the 2020 global status report for buildings and construction. *Global Alliance for Buildings and Construction*, 1–7.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., & Baptista Lucio, M. (2014). *Metodología de la investigación* (6ta edición). McGraw Hill. [www.elosopanda.com%7Cjamespoetrodriguez.com](http://www.elosopanda.com%7Cjamespoetrodriguez.com)
- Holli Riebeek. (2010). *Global Warming.* NASA Earth Observatory. <https://earthobservatory.nasa.gov/features/GlobalWarming>
- Hwang, R. L., Cheng, M. J., Lin, T. P., & Ho, M. C. (2009). Thermal perceptions, general adaptation methods and occupant's idea about the trade-off between thermal comfort and energy saving in hot-humid regions. *Building and Environment*, 44(6), 1128–1134. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2008.08.001>
- IEA. (2020). *GlobalABC Regional Roadmap for Buildings and Construction in Latin America.*
- IEA. (2021). Energy Efficiency 2021. *International Energy Agency.*
- IEA. (2023a). *Buildings.* <https://www.iea.org/energy-system/buildings>
- IEA. (2023b). *Latin America Energy Outlook Overview: Mexico.* [www.iea.org](http://www.iea.org)
- [II-UNAM], D. S. (2009). Análisis térmico en medidas de sombreado aplicadas a vivienda económica con alta carga térmica interna en 6 ciudades con clima cálido-seco. *Memoria de La XXXIII Semana Nacional de Energía Solar, July*, ABC-23.
- Indraganti, M. (2010). Using the adaptive model of thermal comfort for obtaining indoor neutral temperature: Findings from a field study in Hyderabad, India. *Building and Environment*, 45(3), 519–536. <https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2009.07.006>

- Indraganti, M., & Boussaa, D. (2016). *A method to estimate the heating and cooling degree-days for different climatic zones of Saudi Arabia*. November. <https://doi.org/10.1177/0143624416681383>
- Indraganti, M., & Rao, K. D. (2010). Effect of age, gender, economic group and tenure on thermal comfort: A field study in residential buildings in hot and dry climate with seasonal variations. *Energy and Buildings*, 42(3), 273–281. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.09.003>
- INEGI. (2015). *Viviendas. Baja California*. <http://www.cuentame.inegi.org.mx/monografias/informacion/bc/poblacion/vivienda.aspx?tema=me&e=02>
- INEGI. (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Baja California 2017*. [www.inegi.org.mx](http://www.inegi.org.mx)
- INEGI. (2018a). ENCEVI 2018. *Encuesta Nacional de Inclusión Financiera*, 1–23. [https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/statistics\\_manual\\_spanish.pdf](https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/statistics_manual_spanish.pdf)
- INEGI. (2018b). *Mapas Climatológicos*. INEGI; Instituto Nacional de Estadística y Geografía. INEGI. <https://www.inegi.org.mx/temas/climatologia/>
- INEGI. (2018c). *Primer Encuesta Nacional sobre Consumo de Energéticos en Viviendas particulares (ENCEVI)*.
- INEGI. (2018d). Primera encuesta nacional sobre consumo de energéticos en viviendas particulares (ENCEVI). *Comunicado de Prensa Núm. 541/18*, 28. <http://www.beta.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2018/EstSociodemo/ENCEVI2018.pdf>
- INEGI. (2019). *Información por entidad. Cuéntame*. INEGI. <https://cuentame.inegi.org.mx/monografias/default.aspx?tema=me>
- INEGI. (2020a). *ENCUESTA NACIONAL DE INGRESOS Y GASTOS DE LOS HOGARES ENIGH*.
- INEGI. (2020b). *Población. Viviendas*. <https://cuentame.inegi.org.mx/poblacion/vivienda.aspx?tema=P>
- INEGI; INFONAVIT & SHF. (2020). *Encuesta Nacional de Vivienda (ENVI) 2020*. 31. <https://www.inegi.org.mx/programas/envi/2020/>
- International Energy Agency. (2023). *Energy Efficiency 2023*. <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2023/executive-summary>
- Ionescu, C., Baracu, T., Vlad, G. E., Necula, H., & Badea, A. (2015). The historical evolution of the energy efficient buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 243–253. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.04.062>
- Judkoff, R. (2011). Energy efficient buildings. *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*, 5(4), 491–508. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511718786.042>

- Kim, J., De Dear, R., Parkinson, T., & Candido, C. (2017). Understanding patterns of adaptive comfort behaviour in the Sydney mixed-mode residential context. *Energy and Buildings*, *141*, 274–283. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.061>
- Kotharkar, R., Ghosh, A., Kapoor, S., & Reddy, D. G. K. (2022). Approach to local climate zone based energy consumption assessment in an Indian city. *Energy and Buildings*, *259*, 111835. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111835>
- Laureiro, P. (2018). Determinantes del consumo de energía eléctrica del sector residencial en Uruguay. *Instituto de Economía - Students Working Papers*, *1963*, 1–54.
- Lyu, W., Li, X., Shi, W., Wang, B., & Huang, X. (2021). A general method to evaluate the applicability of natural energy for building cooling and heating: Revised degree hours. *Energy and Buildings*, *250*, 111277. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2021.111277>
- Magaña Almaguer, H. D., Pérez Tello, C., & López Badilla, G. (2016). *Evaluation of Temperatures in Mexico to Analyze the Saving and Efficiency Energy* (Vol. 20, Issue 1).
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., ... Wang, R. H. J. (2020). The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500. *Geoscientific Model Development*, *13*(8), 3571–3605. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>
- METEONORM. (2014). Handbook part I: Software Global Meteorological Database Version 7 Software and Data for Engineers, Planers and Education The Meteorological Reference for Solar Energy Applications, Building Design, Heating & Cooling Systems, Education Renewable Energy. *Handbook Part I: Software, March*. [https://meteonorm.com/assets/downloads/mn73\\_software.pdf](https://meteonorm.com/assets/downloads/mn73_software.pdf)
- Molina Fuertes, J., Horn Mutschler, M., Rojas Menéndez, J., & Aranda Morales, A. (2017). Modelación térmica de un módulo experimental de vivienda Altoandina utilizando Openstudio y Energyplus. *XXIV Simposio Peruano de Energía Solar y Del Ambiente*, *13-17 November*, 13. <http://www.perusolar.org/>
- Molina Gonzalez, A., Borroto Nordelo, A. E., Monteagudo Yanes, J. P., Velarde Bedregal, H. R., & Santiesteban Toca, C. E. (2017). Nuevos índices de consumo energético para hoteles tropicales. *Revista de Ingeniería Energética*, *XXXVIII*(3), 198–207.
- Muñoz Carrillo, J. E., & Prado Pozo, I. A. (2019). *Estudio experimental del comportamiento térmico de una vivienda en Quito situada en el barrio la Vicentina*. Escuela Politécnica Nacional.
- Oktay, Z., Coskun, C., & Dincer, I. (2011). A new approach for predicting cooling degree-hours and energy requirements in buildings. *Energy*, *36*(8), 4855–4863. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2011.05.022>

- 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. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.031>
- Ortiz-Rodríguez, Ó., Castells, F., & Sonnemann, G. (2012). Environmental impact of the construction and use of a house: Assessment of building materials and electricity end-uses in a residential area of the province of Norte de Santander, Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 16(1), 147–161. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=47723297009>
- Ortiz-Velázquez, J. A., Bueno, G., & Arana-Coronado, J. J. (2016). Análisis de la demanda residencial de electricidad en el Estado de México. *Economía Sociedad y Territorio*, 17(53), 199. <https://doi.org/10.22136/est002017644>
- Ovacen. (2016). *Historia de la vivienda a través del tiempo*. <https://ovacen.com/historia-de-la-vivienda-a-traves-del-tiempo/>
- Park, S., Shim, J., & Song, D. (2021). Issues in calculation of balance-point temperatures for heating degree-days for the development of building-energy policy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 135(July 2020), 110211. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110211>
- Pérez-Tello, C., Campbell-Ramírez, H., Suástegui-Macías, J. A., & Reinhardt, M. S. (2018). Methodology of Energy Management in Housing and Buildings of Regions with Hot and Dry Climates. In *HVAC System*. InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.78341>
- Rashad, M., Khordehghah, N., Żabnieńska-Góra, A., Ahmad, L., & Jouhara, H. (2021). The utilisation of useful ambient energy in residential dwellings to improve thermal comfort and reduce energy consumption. *International Journal of Thermofluids*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2020.100059>
- Portner, H.-O., Roberts, D., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Loschke, S., Moller, V., Okem, A., & Rama, B. (2022). *Climate Change 2022 Impacts, Adaptation and Vulnerability Summary for Policymakers*.
- Rodrigues, E., Fernandes, M. S., & Carvalho, D. (2023). Future weather generator for building performance research: An open-source morphing tool and an application. *Building and Environment*, 233(February). <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110104>
- Romero Moreno, R. A. (2002). Implicaciones del acondicionamiento ambiental del sector residencial en el consumo de energía eléctrica bajo condiciones climáticas cálido secas extremas: el caso de Mexicali, B.C. In *Dirección General de Bibliotecas de la UNAM*. UNAM.
- Romero, R. A., Bojórquez, G., Corral, M., & Gallegos, R. (2012). Energy and the occupant's thermal perception of low-income dwellings in hot-dry climate: Mexicali, México. *Renewable Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.017>

- Rosa, M. De, Bianco, V., Scarpa, F., & Tagliafico, L. A. (2014). Heating and cooling building energy demand evaluation; a simplified model and a modified degree days approach. *Applied Energy*, 128, 217–229. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.04.067>
- Salata, F., Falasca, S., Ciancio, V., Curci, G., Grignaffini, S., & de Wilde, P. (2022). Estimating building cooling energy demand through the Cooling Degree Hours in a changing climate: A modeling study. *Sustainable Cities and Society*, 76, 103518. <https://doi.org/10.1016/J.SCS.2021.103518>
- Sánchez-Montes, J. G., Flores-Prieto, J. J., López-Pérez, L. A., & Ríos-Rojas, C. (2025). Adaptive thermal comfort models comparison in dry and rainy seasons: A tropical climate case. *Energy and Buildings*, 331. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2025.115382>
- Santamouris, M. (2020). Recent progress on urban overheating and heat island research. Integrated assessment of the energy, environmental, vulnerability and health impact. Synergies with the global climate change. In *Energy and Buildings* (Vol. 207). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109482>
- SENER. (2018). SENER | Sistema de Información Energética | Consumo final de energía por sector. In *Sistema de Información Energética*. <https://sie.energia.gob.mx/bdiController.do?action=cuadro&cvecua=IE7C02>
- SENER. (2024). *PRODESEN 2024-2038*. <https://base.energia.gob.mx/PRODESEN2024/prodesen24-38cap3.PDF>
- Shikder, S., Mourshed, M., & Price, A. (2012). Summertime impact of climate change on multi-occupancy British dwellings. *Open House International*, 37(4), 50–60. <https://doi.org/10.1108/ohi-04-2012-b0006>
- Sol-Arq. (2012). *Simulación energética de edificios*. 22-11-2012. <https://www.sol-arq.mx/simulacion-energetica>
- Song, Y., Sun, Y., Luo, S., Tian, Z., Hou, J., Kim, J., Parkinson, T., & De Dear, R. (2018). Residential adaptive comfort in a humid continental climate-Tianjin China. *Energy & Buildings*, 170, 115–121. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.083>
- Sosa, M. B., Correa, E., & Cantón, M. A. (2016). MORFOLOGÍA URBANA Y COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE CANALES VIALES. *Urbano*, 19(33). <http://revistas.ubiobio.cl/index.php/RU/article/view/2358>
- Suástegui Macías, J. A., Pérez Tello, C., Acuña Ramírez, A., Lambert Arista, A. A., Magaña Almaguer, H. D., Rosales Escobedo, P. F., & Ruelas Puente, A. H. (2018). Assessment of electrical saving from energy efficiency programs in the residential sector in Mexicali, Mexico. *Sustainable Cities and Society*, 38, 795–805. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.01.031>
- Tavakolan, M., Mostafazadeh, F., Eirdmoussa, S. J., Safari, A., & Mirzaei, K. (2022). A parallel computing simulation-based multi-objective optimization framework for economic analysis

- of building energy retrofit: A case study in Iran. *Journal of Building Engineering*, 45(August 2021), 103485. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103485>
- Tejeda-Martínez, A., Méndez-Pérez, I. R., & Cruz-Pastrana, D. A. (2022). Domestic electricity consumption in Mexican metropolitan areas under climate change scenarios. *Atmosfera*, 35(3), 449–465. <https://doi.org/10.20937/ATM.52902>
- UN Environment Programme. (2020). 2020 Global Status Report for Buildings and Construction. *Global Status Report*, 20–24. [www.iea.org](http://www.iea.org)
- Usta, P., & Zengin, B. (2021). The Energy Impact of Building Materials in Residential Buildings in Turkey. *Materials*, 14(11). <https://doi.org/10.3390/MA14112793>
- Wang, L., Lee, E. W. M., Hussian, S. A., Yuen, A. C. Y., & Feng, W. (2021). Quantitative impact analysis of driving factors on annual residential building energy end-use combining machine learning and stochastic methods. *Applied Energy*, 299. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117303>
- Yang, L., Fu, R., He, W., He, Q., & Liu, Y. (2020). Adaptive thermal comfort and climate responsive building design strategies in dry-hot and dry-cold areas: Case study in Turpan, China. *Energy & Buildings*, 209, 109678. <https://doi.org/c>
- Zepeda-Rivas, D., & Rodríguez-Álvarez, J. (2020). *Resilient Design in The Tropics: An Overheating Assessment Method for Naturally Ventilated Buildings*.