

# Optimización del consumo eléctrico por enfriamiento en edificios escolares CAPFCE ubicados en clima cálido seco

## *Optimization of Cooling Energy Consumption in CAPFCE School Buildings in Hot-Dry Climates*

DOI: <https://10.32870/rvcs.v0i19.330>

### **ALMA VIRGINIA YEOMANS FIMBRES**

Universidad de Sonora, México. ORCID: 0009-0003-3824-756X

Correo electrónico: alma\_yeomans@hotmail.com

### **MARIA GUADALUPE ALPUCHE CRUZ**

Universidad de Sonora, México. ORCID: 0000-0002-7641-0538

Correo electrónico: guadalupe.alpuche@unison.mx

### **ANA CECILIA BORBON ALMADA**

Universidad de Sonora, México. ORCID: 0000-0002-7781-2571

Correo electrónico: ana.borbon@unison.mx

Recepción: 23 de junio de 2025 Aceptación: 24 de septiembre de 2025

## **RESUMEN**

En este estudio se determinó el consumo eléctrico óptimo de sistemas de enfriamiento en cinco edificios ubicados en el Campus Hermosillo de la Universidad de Sonora, México, construidos bajo las directrices del organismo mexicano denominado Comité Administrador del Programa Federal de Construcciones Escolares (CAPFCE). Originalmente, estos edificios fueron diseñados para climas templados y construidos en todo el país, sin distinción de zonas climáticas. Se realizaron simulaciones en OpenStudio con termostatos a temperaturas de 17, 24 y 28° C, evaluándose cinco escenarios: cambios en la envolvente, ocupantes, iluminación, apertura de puertas/ventanas y estrategias combinadas. Las simulaciones se validaron *in situ* mediante cámara termográfica y sensores. Se obtuvieron valores anuales de carga térmica total y carga térmica sensible del sistema de enfriamiento, así como la temperatura operativa interior promedio.

## **ABSTRACT**

This study identifies the optimal electrical consumption of cooling systems in five buildings located on the Hermosillo Campus of the Universidad de Sonora, Mexico. These buildings were constructed under the guidelines of the Mexican agency known as the Committee for the Administration of the Federal Program for School Construction (CAPFCE). Originally designed for temperate climates, these buildings were implemented nationwide without consideration for regional climatic conditions.

Simulations were conducted using OpenStudio Software with thermostat settings at 17, 24, and 28° C, evaluating five scenarios: modifications to the building envelope, occupancy levels, lighting systems, door/window openings, and combined strategies. The simulations were validated on-site using a thermographic camera and environmental sensors. Annual values of total and sensible cooling loads were obtained, along with the average indoor operative temperature.



Los resultados muestran que en el mes de agosto los consumos iniciales sin estrategias oscilaron entre 26.45 y 12.68 kWh/m<sup>2</sup>, correspondiendo a la envolvente el 74-78%, a los ocupantes el 20-25% y menores porcentajes a la iluminación, ventilación e infiltración (<2%). Con estrategias, los consumos finales bajaron a 22.36-11.42 kWh/m<sup>2</sup>. El mayor ahorro provino de la eficiencia de los equipos (hasta 13.26%), seguido por la implementación de aislamiento en muros (1.75%), losas (0.71%), ventanas de doble vidrio (0.03%) y optimización de ventilación e iluminación (1.19%). Elevar la temperatura del termostato de 17 a 28° C redujo el consumo entre 25 y 28%, con mayor efecto cuando el consumo base era alto. Las cargas térmicas máximas fueron 59.79 y 51.84 kWh/m<sup>2</sup> (total y sensible) y las mínimas 0.31 y 0.0024 kWh/m<sup>2</sup>, mientras que la temperatura interior sin enfriamiento varió de 34.06 a 20.8° C.

Los resultados confirman que la envolvente y la masa térmica determinan la demanda de enfriamiento, y que la eficiencia de los equipos y el ajuste del termostato son las estrategias más efectivas para reducir el consumo. No existen estudios previos que integren estas variables y resultados en edificios tipo CAPFCE, lo que aporta criterios aplicables a otras instituciones en climas cálidos secos.

*Palabras clave:* consumo eléctrico, clima cálido-seco, edificaciones escolares CAPFCE, simulación energética, envolvente térmica, enfriamiento, patrones de uso de los usuarios.

Results for the month of August indicated that initial energy consumption without strategies ranged from 26.45 to 12.68 kWh/m<sup>2</sup>. The building envelope accounted for 74-78% of the load, occupants for 20-25%, and lighting, ventilation, and infiltration for less than 2%. After implementing energy-saving strategies, consumption decreased to 22.36-11.42 kWh/m<sup>2</sup>. The most significant reduction was achieved through equipment efficiency improvements (up to 13.26%), followed by wall insulation (1.75%), roof insulation (0.71%), double-glazed windows (0.03%), and optimized ventilation and lighting (1.19%). Increasing the thermostat temperature from 17 to 28° C reduced energy consumption by 25-28%, with greater impact observed in buildings with higher baseline consumption.

Maximum thermal loads reached 59.79 kWh/m<sup>2</sup> (total) and 51.84 kWh/m<sup>2</sup> (sensible), while minimum values were 0.31 and 0.0024 kWh/m<sup>2</sup>, respectively. Indoor temperatures without cooling ranged from 34.06 to 20.8° C.

The findings confirm that the building envelope and thermal mass are key determinants of cooling demand. Equipment efficiency and thermostat adjustments emerged as the most effective strategies for reducing energy consumption. To date, no previous studies have integrated these variables and results in CAPFCE-type buildings, providing applicable criteria for similar institutions in hot-dry climates.

**Keywords:** electricity consumption, hot-dry climate, CAPFCE school buildings, energy simulation, thermal envelope, air conditioning, user usage patterns.

## INTRODUCCIÓN

A nivel global, la demanda en el uso de sistemas de enfriamiento ha ido en ascenso, especialmente en regiones cálidas, generando retos para gobiernos e instituciones educativas (UN Environment, 2017). En México, el consumo eléctrico en zonas cálidas es significativamente mayor que en otras regiones. En Sonora, el aire acondicionado representa una fracción considerable del consumo

total de electricidad, especialmente en los meses más calurosos (CONUEE, 2018).

El consumo eléctrico de aire acondicionado por enfriamiento en edificios educativos en Hermosillo, Sonora, representa un desafío creciente debido al clima cálido seco de la región, caracterizado por temperaturas extremas y alta radiación solar. Estas condiciones afectan el desempeño térmico de los edificios y aumentan la

demandas de enfriamiento mecánico, haciendo del aire acondicionado un recurso indispensable para garantizar el confort térmico. Este consumo está influenciado por factores como el diseño arquitectónico, las condiciones climáticas y los patrones de uso de los ocupantes. En este sentido, resulta fundamental analizar cómo el diseño de los edificios educativos impacta en el consumo eléctrico, especialmente en regiones cálidas donde el enfriamiento es indispensable.

En México, el diseño de las escuelas estuvo marcado por el Plan de Once Años de 1958, promovido por la Secretaría de Educación Pública (SEP) bajo la dirección de Torres Bodet, con el objetivo de estandarizar la construcción de escuelas a nivel nacional. Dentro de este plan, el arquitecto Pedro Ramírez Vázquez diseñó el aula-clase rural, un modelo modular y de bajo costo que fue replicado en diversas regiones sin considerar las particularidades climáticas (Rueda & Rentería, 2017), ya que las circunstancias económicas, sociales, culturales y prioridades de aquellos años eran otras.

Este modelo, implementado por el CAPFCE, fue adoptado en muchas instituciones educativas en el país y por consiguiente en el estado de Sonora, incluyendo el Campus Hermosillo de la Universidad de Sonora. Sin embargo, con la Ley General de la Infraestructura Física Educativa (Inifed) de 2008, cada estado asumió la responsabilidad de su infraestructura educativa, lo que llevó a la desaparición de este modelo. A pesar de ello, muchas de estas construcciones siguen en uso y presentan desventajas para responder a las condiciones climáticas de la región de Hermosillo.

Marincic (2005) evaluó cuantitativamente el comportamiento térmico de estos prototipos arquitectónicos en la región y concluyó que carecen de un diseño térmico adecuado para el clima local de Hermosillo, lo que genera condiciones de confort desfavorables y un alto consumo eléctrico por enfriamiento. En este contexto, Fuentes (2016) advierte que la climatización artificial puede derivar en un uso excesivo de electricidad cuando los materiales y procesos constructivos no están adaptados al clima.

Alfaoyzan *et al.* (2023) realizaron una evaluación comparativa del consumo energético de la Universidad Sulaiman Al-Rajhi, en Arabia Saudita, donde encontraron que el consumo por el sistema de aire acondicionado correspondía al 79% del consumo total y que las medidas en la disminución de ese rubro son de las más importantes para poder lograr la sostenibilidad de los edificios, incluso aunque se encuentre su envolvente con aislamiento.

El concepto de consumo eléctrico óptimo es clave en el presente análisis. López (2011) lo define como el referente que distingue las edificaciones eficientes de las no eficientes, mientras que Castro, San José, Villafruela, Méndez & Guijarro (2008) lo describen como un consumo superior al promedio obtenido al comparar edificaciones con características semejantes, aunque esto no garantiza necesariamente la eficiencia del edificio.

Dentro de los factores que influyen en el consumo eléctrico, la envolvente del edificio desempeña un papel determinante. Varini (2015) la describe como el principal mecanismo de transferencia térmica entre el entorno y el interior de la edificación, por lo que su adecuado diseño puede reducir la necesidad de enfriamiento artificial. Bravo y Pérez (2016) la consideran un sistema termodinámico en constante interacción con el ambiente, mientras que González y Molina (2017) destacan su correcta planificación como un factor clave para minimizar el consumo eléctrico.

El desempeño térmico de la envolvente está directamente relacionado con los patrones de uso. Christopher Alexander introdujo en 1977 el concepto de patrón, definiéndolo como la recurrencia de un problema en el entorno y su correspondiente solución, la cual puede aplicarse múltiples veces (Guerrero, Suárez y Gutiérrez, 2013). Posteriormente, Zapata (2011) amplió esta idea al enfocarse en los patrones de uso en entornos educativos, destacando que éstos surgen de problemas frecuentes y optimizan la atención del alumno al involucrarlo en su resolución. Además, señaló que cada patrón está ligado a un contexto específico, donde problemas y soluciones se interrelacionan.

Los patrones de uso pueden describirse como las actividades diarias de los usuarios que definen la operación térmica del edificio dentro de un horario, lugar y contexto climático específico, los cuales pueden generarse en respuesta a problemáticas derivadas de las condiciones físicas, espaciales y térmicas de la envolvente, así como de los hábitos y costumbres de los ocupantes. De acuerdo con Balvedi, Schaefer, Bavaresco, Eccel y Ghisi (2018), la gran diversidad de interacciones que componen el comportamiento de los usuarios introduce una considerable complejidad en los estudios de desempeño térmico y energético, incluso al considerar una sola tipología arquitectónica.

En la evaluación del desempeño energético de los edificios, las herramientas tecnológicas en las últimas décadas han tenido un desarrollo considerable. Lucero-Álvarez *et al.* (2022) realizan una revisión de los programas de simulación, presentan algunas diferencias entre éstos y muestran resultados obtenidos utilizando los programas TRNSYS y OpenStudio; con el primero evaluaron un edificio residencial y con el segundo un edificio académico, concluyendo que es necesario trabajar un poco más en la interoperabilidad de los programas de simulación.

Otro ejemplo del uso de programas de simulación lo presentan Gollini-Mihalopoulos *et al.* (2023), quienes realizaron una evaluación del consumo energético anual del edificio núm. 1 de la Universidad Tecnológica de Panamá, encontrando una disminución del 38.81% en el consumo de energía y una reducción del 57.27% en emisiones de CO<sub>2</sub>.

Quevedo *et al.* (2024) realizaron una revisión sobre la evaluación comparativa del consumo de energía en diversas universidades, donde observan que el consumo tiene una gran complejidad ya que depende de los tipos de servicios que tenga el edificio o grupos de edificios, además de que el comportamiento de los ocupantes tiene un impacto significativo en el consumo de energía debido al funcionamiento del edificio y al uso del espacio. En esta revisión se reportó que los principales consumos son en iluminación, la carga de equipos (contactos eléctricos) y acondicionamiento de aire, siendo este último el de mayor impacto

en los estudios analizados; concluyen además que esta línea de investigación tiene una gran área de oportunidad, ya que no hay aún indicadores claros para evaluar el consumo de energía de los edificios escolares y es importante aclarar que sólo reportan un estudio en el clima cálido-seco.

Este estudio tiene como objetivo optimizar el consumo eléctrico por enfriamiento, tomando en cuenta la envolvente térmica, los patrones de uso y la carga térmica generada por los usuarios, empleando simulaciones energéticas. De acuerdo con Bravo y Pérez (2016), la simulación energética se concibe como una representación simplificada de un sistema real que facilita la valoración y predicción del comportamiento energético de un diseño, ofreciendo información tanto sobre su desempeño en un periodo específico como sobre su evolución futura. Para Balvedi *et al.* (2018), una manera de evaluar la carga térmica representada por la ocupación del usuario es a través de simulaciones, en donde pueden incorporarse los perfiles representativos de comportamiento de los usuarios de forma estática (utilizando tiempos de ocupación fijos), y considerando las interacciones derivadas del uso de ventanas y puertas, con distinción sólo para días laborables.

Considerando el análisis teórico expuesto, se logra optimizar el consumo eléctrico en edificios CAPFCE (estructuras diseñadas sin criterios climáticos adecuados) mediante el ajuste de los patrones de uso y la implementación de aislamientos térmicos. Los resultados de esta investigación aportan evidencia para desarrollar estrategias orientadas a reducir el consumo eléctrico en estos edificios.

## CASO DE ESTUDIO: EDIFICIOS SELECCIONADOS Y METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

El Campus Hermosillo de la Universidad de Sonora se ubica en el Blvd. Luis Encinas J, en el centro de la ciudad de Hermosillo, en el estado de Sonora, país México, en la latitud 29.1026 y longitud -110.97732 (figura 1).

Figura 1  
Hermosillo, Sonora, México (polígono sombreado en blanco)



Fuente: elaborado con imagen de Google Earth (Google Earth Pro, 2024).

Esta región presenta un clima cálido seco con un marcado patrón estacional. De mayo a septiembre, las temperaturas máximas superan regularmente los 40° C, alcanzando picos cercanos a los 45° C en junio y julio. Durante este periodo las noches también son cálidas, con mínimas que rara vez descienden por debajo de los 25° C, lo que limita la capacidad de enfriamiento natural. La humedad relativa es más baja en los meses de calor extremo, intensificando la sensación de sequedad y aumentando la demanda de aire acondicionado por enfriamiento.

Considerando la amplia infraestructura educativa del campus, se aplicó una metodología de evaluación centrada en una selección específica de edificios. Se identificaron aquellos de tipo CAPFCE con aulas, por ser los espacios de mayor uso durante

la formación académica. Estos edificios fueron diseñados bajo un esquema modular, generalmente de dos a tres crujías, con aleros predominantes en orientación norte-sur. Originalmente presentaban sistemas constructivos convencionales, con estructura de concreto y muros de bloque de concreto macizo o ladrillo hueco doble relleno de mortero, algunos con recubrimiento de fachada cerámica. Con el tiempo estos muros se modificaron mediante la incorporación de materiales aislantes, y se añadieron terceros niveles construidos con estructuras de acero, muros exteriores de tablarraca con poliestireno extruido y muros interiores de panel de yeso. De esta selección, se eligieron cinco edificios cuyas variaciones en geometría y sistemas constructivos responden a las condiciones previamente descritas (figura 2 y tabla 1).

Figura 2

Selección de edificios CAPFCE en el Campus Hermosillo de la Universidad de Sonora



Fuente: elaborado con imagen de Google Earth (Google Earth Pro, 2024).

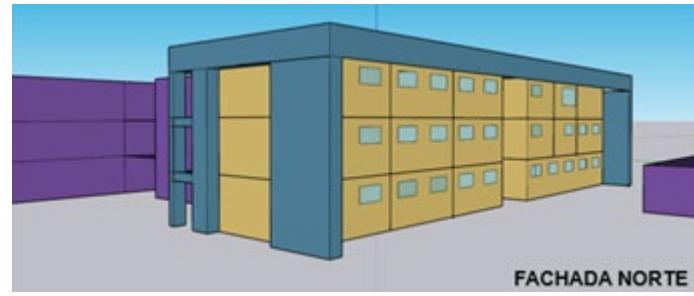
De acuerdo con el objetivo del trabajo, que consiste en realizar evaluaciones energéticas con métodos de simulación, es necesario contar con algunas variables para realizar ese proceso; entre otras, se encuentran las propiedades térmicas de materiales y sistemas constructivos que forman la envolvente de los edificios estudiados. Con este fin se realizó un estudio *in situ* para determinar la conductividad térmica en la superficie exterior de los materiales que conforman los sistemas constructivos. Con estos datos se desarrollaron simulaciones energéticas para analizar el consumo eléctrico durante el mes de agosto en función de cinco escenarios distintos. La validación de los resultados de simulación se llevó a cabo mediante monitoreos térmicos con cámara termográfica y sensores de temperatura instalados en los edificios seleccionados. Finalmente, se realizó un análisis comparativo de los

consumos eléctricos por enfriamiento, a partir del cual se establecieron recomendaciones para su optimización.

En forma adicional, se incorporó una gráfica de temperaturas interiores promedios mensuales sin enfriamiento y variables de desempeño de los sistemas de enfriamiento, con el fin de ampliar la interpretación de los resultados y evidenciar el comportamiento térmico anual.

TABLA I

Sistemas constructivos de los edificios seleccionados en el Campus Hermosillo de la Universidad de Sonora

Sistema constructivo	Imagen real y simulada del edificio en OpenStudio
<p>1. <b>Muros Exteriores:</b> Bloque de concreto macizo de 19 cm de espesor.</p> <p>Muros Interiores: Bloque de concreto macizo de 19 cm de espesor.</p> <p>Cubierta y Entrepiso: Concreto estructural de 15 cm de espesor.</p> <p>Cerramientos: Vidrio monolítico de 3 mm de espesor, puerta de metal de 3 mm de espesor</p>	
<p>2. Muros Exteriores: Bloque de concreto macizo de 19 cm de espesor con poliestireno extruido de 1" de espesor.</p> <p>Muros Interiores: Bloque de concreto macizo de 19 cm de espesor.</p> <p>Cubierta y Entrepiso: Concreto estructural de 15 cm de espesor.</p> <p>Cerramientos: Vidrio doble de 7 mm de espesor, puerta de metal galvanizado de 45 mm de espesor</p>	

<p>3. Muro Exterior: Tablacemento de <math>\frac{1}{2}</math>" a dos caras, reforzado con perfiles metálicos de 6", postes y canal calibre 20, con poliestireno extruido de 1 cm de espesor.</p> <p>Muros Interiores: Panel yeso de <math>\frac{1}{2}</math>" a dos caras.</p> <p>Cubierta: Panel sándwich.</p> <p>Entrepiso: Concreto estructural de 15 cm de espesor.</p> <p>Cerramientos: Vidrio doble de 7 mm de espesor, Puerta de metal galvanizado de 45 mm de espesor</p>	
<p>4. Muro Exterior: Bloque de ladrillo hueco doble de 18 cm de espesor relleno de mortero, recubierto por una fachaleta cerámica de 1 cm de espesor.</p> <p>Muros Interiores: Ladrillo de 18 cm de espesor.</p> <p>Cubierta y Entrepiso: Concreto estructural de 40 cm de espesor.</p> <p>Cerramientos: Vidrio monolítico de 3 mm de espesor, puerta de metal de 3 mm de espesor.</p>	
<p>5. Muro Exterior: Bloque de ladrillo hueco doble de 18 cm de espesor relleno de mortero, revestido con aislante de 1 cm de espesor, y por una fachaleta cerámica de 1 cm de espesor.</p> <p>Muros Interiores: Ladrillo de 18 cm de espesor.</p> <p>Cubierta y Entrepiso: Concreto estructural de 40 cm de espesor.</p> <p>Cerramientos: Vidrio monolítico de 3 mm de espesor, puerta de metal de 3 mm de espesor.</p>	

## ESTUDIO DE CONDUCTIVIDADES TÉRMICAS IN-SITU

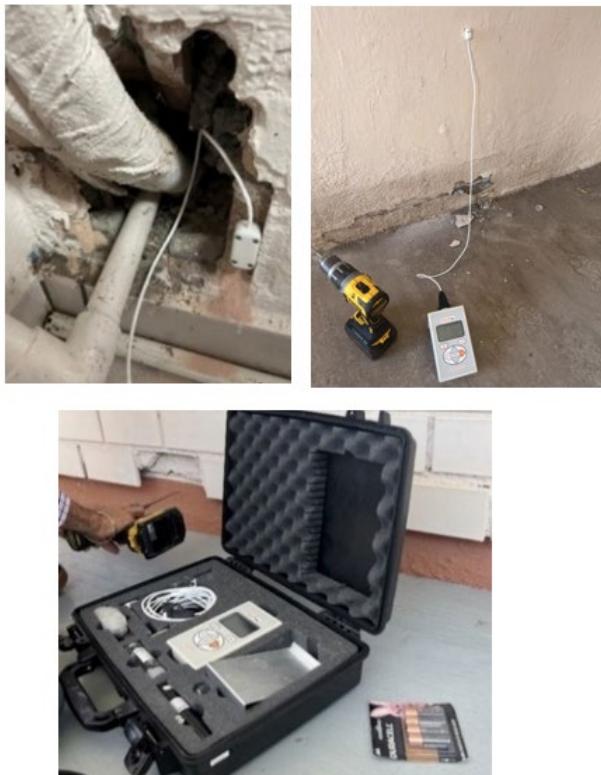
Se realizó un estudio de conductividades térmicas en los edificios sujetos a estudio del Campus, con la intención de contar con los valores reales de conductividad térmica de los materiales ya instalados. El estudio se llevó a cabo con el equipo medidor de conductividad térmica portátil KD2 Pro, utilizando sensores tipo aguja como el sensor KS-1 de 6 cm de largo y 1.3 mm de diámetro para materiales aislantes; el SH-1 con una doble aguja de 3 cm de largo y 1.3 mm de diámetro para

materiales sólidos; también se usó una pasta llamada Arctic Silver 5 High-Density Polysynthetic Silver Thermal Compound, que funciona como un compuesto altamente conductor para llenar el hueco al introducir el sensor, minimizando el rango de error en la medición.

Antes de iniciar las mediciones, se verificó con patrones para asegurar su buen funcionamiento. El método de medición consiste en perforar la superficie para introducir los sensores. Se realizaron mediciones hasta cubrir la variedad de materiales de la superficie exterior, como enjarrés, tabiques y materiales aislantes (figura 3).

Figura 3

Medición de la conductividad térmica en un muro de concreto y un muro de bloque de ladrillo hueco



Fuente: fotografías propias, 2022.

El margen de error de las mediciones se encuentra dentro del límite permitido según el manual del equipo, con un rango de error que varía de 0.0548 a 0.0029. Los valores específicos

se presentan en la tabla 3. Una vez obtenidos los valores de conductividad térmica de los materiales, éstos fueron incorporados en los escenarios de simulación descritos en el siguiente apartado.

## ESCENARIOS DE SIMULACIÓN ENERGÉTICA

Para evaluar el consumo eléctrico de los sistemas de aire acondicionado por enfriamiento, se definieron cinco escenarios de simulación. En cada uno se establecieron tres rangos de temperatura

del termostato: 17° C como mínimo, 24° C como valor intermedio y 28° C como máximo. Cada escenario analiza una variable específica para determinar su impacto en el consumo eléctrico. A continuación se describen los escenarios evaluados (tabla 2).

Tabla 2

Escenarios propuestos para la obtención de los consumos eléctricos aire acondicionado por enfriamiento

Escenario	Variable analizada	Objetivo
1	Propiedades térmicas y geometría de la envolvente.	Evaluar el impacto de la envolvente en el consumo eléctrico.
2	Carga térmica de los usuarios.	Determinar cómo la presencia de usuarios influye en el consumo eléctrico.
3	Encendido de luminarias.	Analizar el efecto del uso de iluminación en el consumo eléctrico.
4	Apertura de ventanas y puertas.	Estudiar el impacto de la ventilación no controlada en el consumo eléctrico.
5	Propuestas de uso óptimo y mejoras en la envolvente.	Evaluar estrategias de eficiencia energética para optimizar el consumo eléctrico.

Fuente: elaboración propia.

Para la construcción de los escenarios se modelaron los edificios en *SketchUp®* utilizando el complemento *OpenStudio®*. Las envolventes se orientaron según su ángulo, orientación y geolocalización en el campus universitario. Se definieron las superficies expuestas a la radiación solar y al viento, se modeló el flujo de calor entre espacios, y se representaron colindancias y vegetación como prismas (figura 4).

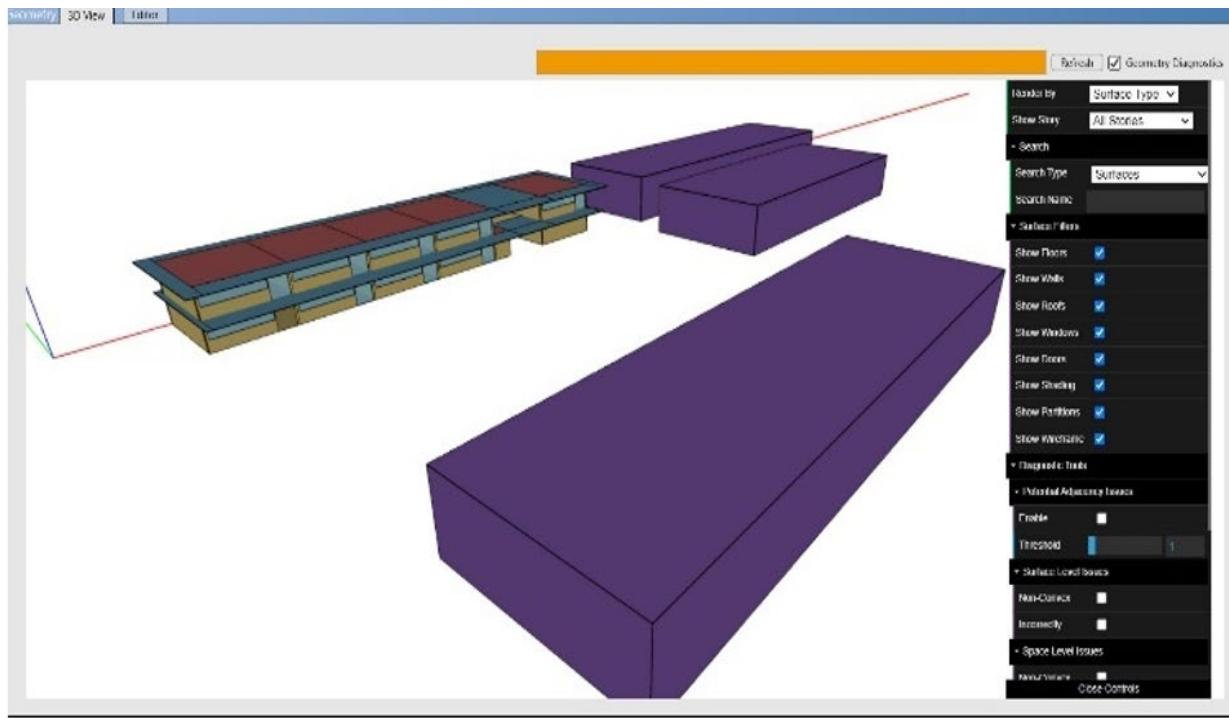
En el programa de simulación OpenStudio se incorporó el archivo en formato EPW con datos climáticos de Hermosillo y las temperaturas del suelo provenientes del repositorio *Climate.One-Building.org*. Se agregaron sistemas constructivos utilizando conductividades térmicas obtenidas *in situ*. Para complementar las propiedades físicas

de los materiales, se integraron datos de rugosidad, densidad, calor específico y absorción térmica provenientes del software OpenStudio, el cual emplea una biblioteca de materiales con parámetros basados en *ASHRAE Standard 90.1-2010*.

Se incluyeron las propiedades de materiales aislantes (poliestireno expandido, colchoneta de fibra de vidrio, panel sándwich), de masa térmica (polipropileno, concreto estructural, bastidor metálico, acero) y de cerramientos (ventanas monolíticas, dobles y puertas). Los valores de absorción solar y visible, correspondientes a los acabados de superficie, se obtuvieron del software *EnerHabitat* (Universidad Nacional Autónoma de México [UNAM], 2014) (tabla 3).

Figura 4

Vista tridimensional del modelo geométrico del edificio en la interfaz de OpenStudio utilizada para la simulación



Fuente: elaboración propia.

En el apartado de masa térmica se incluyó el cálculo volumétrico de los elementos constructivos (columnas de concreto, acero, trabes, vigas, bastidores metálicos de los muros de tablazamiento y panel yeso), así como el mobiliario, junto con las propiedades térmicas de los materiales. Se asignó un valor de infiltración de 0.6 renovaciones por hora, empleado en Hermosillo para zonas con envolventes que presentan puentes térmicos y materiales con huecos de aire.

Se simularon las características de los equipos de enfriamiento presentes en el sitio para que los resultados de consumo eléctrico fueran lo más similares posible. Por ello, se cargaron dos equipos de enfriamiento por aula, configurados como “unitary system-single speed DX cooling-Cycling-Elec reheat” (equivalentes a *minisplits no inverter*), ajustando sus características según los sistemas de aire acondicionado existentes

en el sitio. Se definió una eficiencia del 15% para el ventilador y del 20% para el motor, de acuerdo con Energy Star. Se estableció una eficiencia de 13 SEER y un COP de 4.9, verificado en Energy Plus. Además, se fijó un caudal de aire de 800 CFM y una capacidad nominal de dos toneladas por equipo, con un horario de funcionamiento de 7:00 a.m. a 9:00 p.m., de lunes a viernes, en agosto, y tres rangos de temperatura para el termostato: 17, 24 y 28°C.

Todo lo descrito anteriormente aplica a todos los escenarios, configurando así el escenario 1 con estas condiciones base. A partir de este punto se incorporaron parámetros específicos en los demás escenarios para evaluar su impacto en el consumo eléctrico.

Tabla 3  
Propiedades termofísicas de los materiales analizados

Material	R	(m) a	(W/mK) b	(Kg/m <sup>3</sup> ) c	(J/kgK) d	(T/s/v) e
Fachada cerámica	medio rugoso	0.010	0.302	1,500	1,480	0.9 / 0.3 / 0.3
Aislante ladrillo	medio rugoso	0.010	0.045	43	1,210	0.9 / 0.3 / 0.3
Ladrillo con doble hueco relleno de mortero	medio rugoso	0.180	0.281	1,500	1,480	0.9 / 0.3 / 0.3
Bloque de concreto	medio rugoso	0.150	0.338	2,000	840	0.9 / 0.3 / 0.3
Tablacemento	medio rugoso	0.013	0.099	898	1,000	0.9 / 0.7 / 0.7
Poliestireno	medio rugoso	0.012	0.030	43	1,210	0.9 / 0.3 / 0.3
Ladrillo	medio suave	0.180	0.925	1,970	800	0.9 / 0.3 / 0.3
Placa de yeso	medio suave	0.013	0.30	800	1,090	0.9 / 0.3 / 0.3
Colchoneta fibra de vidrio	medio rugoso	0.125	0.030	43	1,210	0.9 / 0.5 / 0.5
Concreto (cubierta-entrepiso)	medio suave	0.15 y 0.40	0.731	1,280	840	0.9 / 0.15 / 0.15
Lámina	medio suave	0.002	45.006	7,680	418	0.9 / 0.25 / 0.25
Panel sándwich	medio rugoso	0.025	0.030	43	1210	0.9 / 0.25 / 0.25
Polipropileno	medio rugoso	0.254	0.190	1,400	1200	0.9 / 0.7 / 0.7
Concreto (columnas-trabes)	medio rugoso	0.400	1.720	2,243	837	0.9 / 0.7 / 0.7
Acero (columnas-vigas)	medio suave	0.100	45.310	7,833	500	0.9 / 0.25 / 0.25
Estructura de aluminio	medio suave	0.001	50.000	7,680	418	0.9 / 0.2 / 0.2
Metal (Puerta 3 mm)	—	0.003	45.28	—	—	—
Metal galvanizado (Puerta 45 mm)	—	0.045	1.2	—	—	—
Vidrio monolítico	—	0.003	5.8	—	—	—
Vidrio doble	—	0.007	2.6	—	—	—

Los números en cursivas corresponden a los valores de conductividad térmica obtenidos *in-situ*. Los datos restantes son obtenidos de EnerHabitat (UNAM, 2014) y de la biblioteca de materiales ASHRAE 90.0-2010.

a: espesor en metros (m).

b: conductividad térmica (W/mK).

c: densidad (kg/m<sup>3</sup>).

d: calor específico (J/kgK).

e: absorciación (térmica/ solar/visible).

Fuente: elaboración propia.

En el escenario 2 se incluyó el número de usuarios y se asignó una tasa metabólica de 108 W/persona (sentado-quieto). En el escenario 3 se añadieron luminarias LED, tomando los valores de consumo en watts de los catálogos Philips, y se estableció un horario de encendido de 7:00 a 9:00 p.m. en agosto. En el escenario 4 se utilizó el *measure* de ventilación por *stack* en OpenStudio, ya que es la variable más cercana disponible para representar el efecto del aire que ingresa al interior cuando se abren puertas y ventanas. Para simular esta condición, se forzaron temperaturas elevadas que reflejan el clima típico de Hermosillo, promoviendo la entrada de aire durante el horario de 7:00 a 9:00 p.m., de lunes a viernes en agosto.

En el escenario 5 se implementaron estrategias para optimizar el consumo eléctrico de los sistemas de aire acondicionado, considerando patrones de uso, aislamiento térmico y mejoras en la eficiencia de los equipos de enfriamiento. Durante el mes

de agosto se estableció una rutina de ventilación natural que consistía en abrir puertas y ventanas entre clases y mantenerlas cerradas durante las sesiones. Este procedimiento se aplicó diariamente de 7:00 a.m. a 9:00 p.m. En cuanto a la iluminación, las luminarias se apagaban cuando no había actividad y permanecían encendidas durante las clases para garantizar condiciones adecuadas de habitabilidad, ya que se observó que los estudiantes las utilizaban tanto en las sesiones matutinas como vespertinas (Yeomans, Alpuche y Borbón, 2025).

Además, en edificios sin aislamiento se añadió una capa de poliestireno extruido de 1 pulgada en muros y techos, y se reemplazaron las ventanas monolíticas por unidades de doble vidrio. También se incrementó la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado, elevando el SEER de 13 (básico) a 16 (intermedio), lo que contribuye a un menor consumo eléctrico y una operación más eficiente. Estas propuestas se detallan en la tabla 4.

Tabla 4  
Propuestas realizadas en los edificios para el logro del consumo eléctrico óptimo  
de los sistemas de enfriamiento de aire acondicionado por enfriamiento

Edificio	Patrones de uso óptimos (ventilación, iluminación)	Aislación térmica	Ventanas doble vidrio	Eficiencia mejorada de aires acondicionados por enfriamiento
1	✓	✓ Muros y losa	✓	✓
2	✓	—	—	✓
3	✓	—	—	✓
4	✓	✓ Muros	✓	✓
5	✓	—	✓	✓

Fuente: elaboración propia.

También se consideraron indicadores de carga térmica y condiciones interiores obtenidos de *OpenStudio*, tales como “Unitary System Total Cooling Rate” (energía térmica total suministrada por el sistema de aire acondicionado, incluyendo carga sensible y latente), “Zone Air System

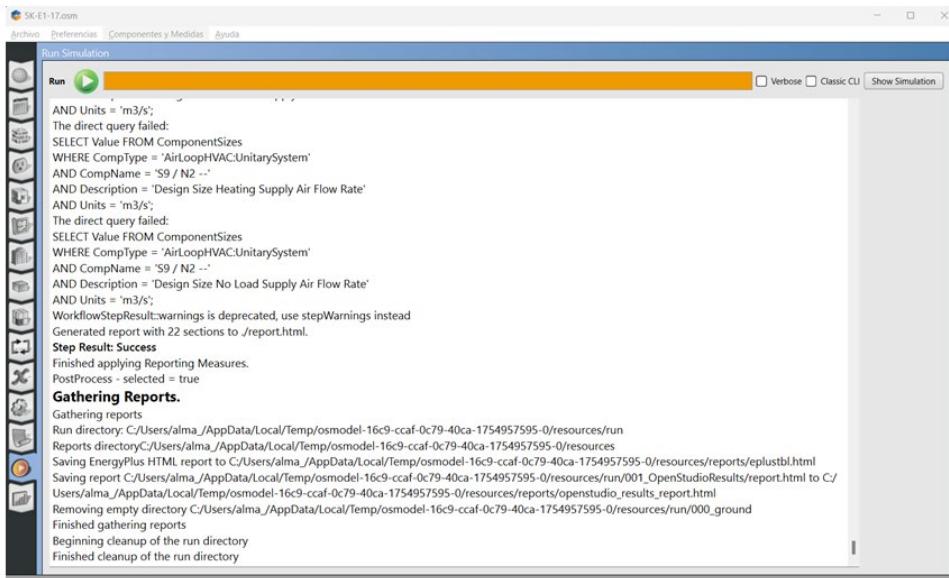
Sensible Cooling Rate” (energía térmica sensible entregada al aire de la zona) y “Zone Mean Air Temperature” (temperatura interior promedio). Estos parámetros complementan el análisis del comportamiento térmico de los edificios bajo las distintas condiciones de simulación.

Los resultados se obtuvieron a partir de las simulaciones realizadas en *OpenStudio*. La información fue exportada mediante el archivo de salida eplusout.sql generado por *EnergyPlus*,

procesada y organizada para su análisis, y posteriormente graficada para su interpretación (figuras 5 y 6).

Figura 5

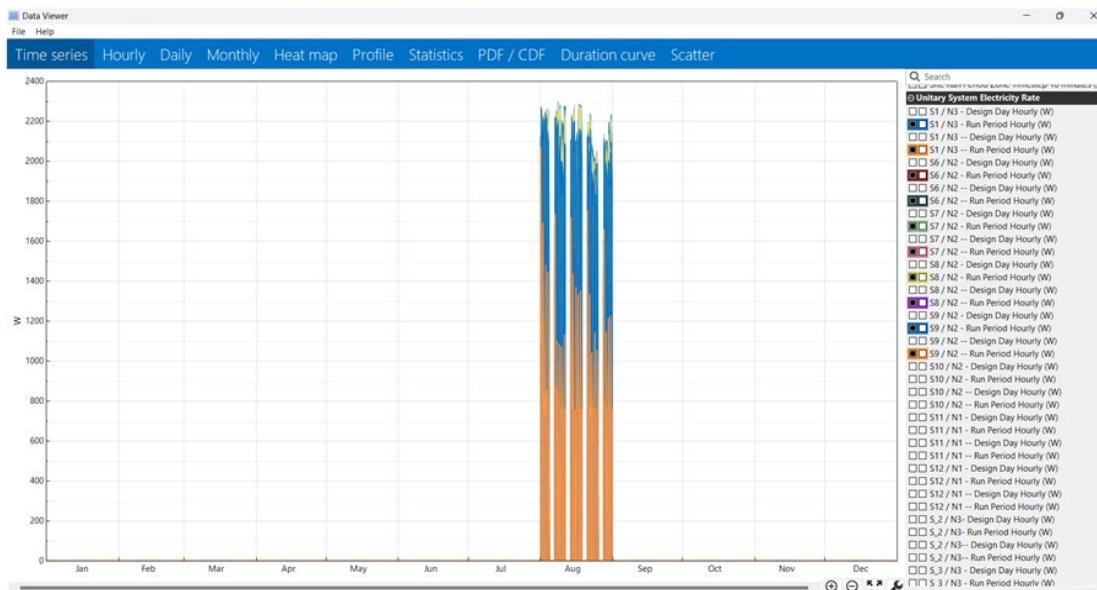
Proceso de ejecución de simulación en OpenStudio aplicado a todos los edificios y escenarios



Fuente: elaboración propia.

Figura 6

Visualización de resultados en el Data Viewer de OpenStudio aplicada a todos los edificios y escenarios, generada a partir del archivo de salida eplusout.sql de *EnergyPlus*



Fuente: elaboración propia.

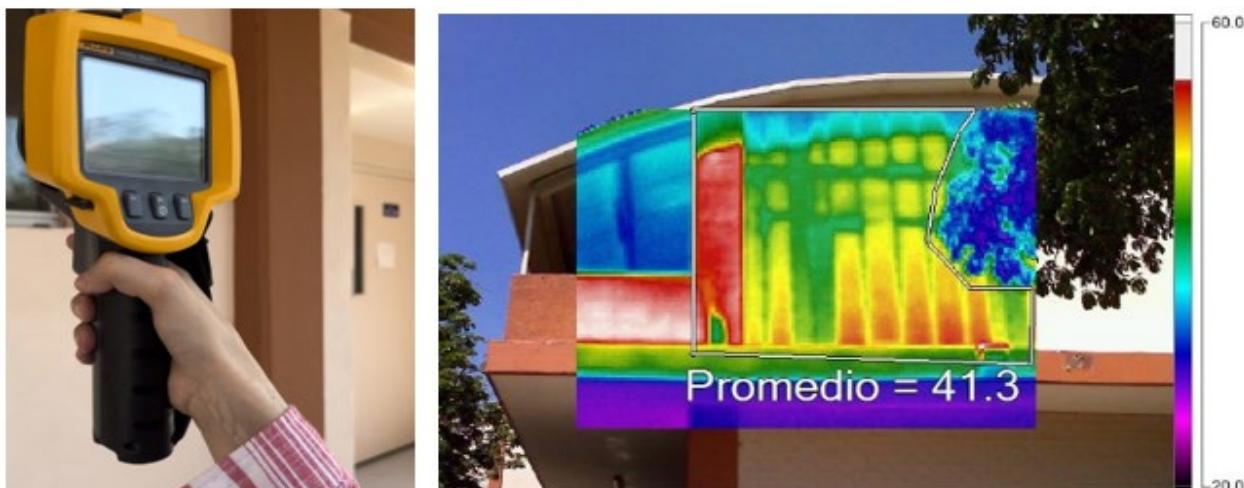
## VALIDACIÓN DE LAS SIMULACIONES ENERGÉTICAS

Para la validación de las simulaciones de consumo eléctrico por enfriamiento se realizaron dos tipos de monitoreos térmicos *in situ*. El primero consistió en la captura de imágenes termográficas de las superficies exteriores de los edificios 1, 2 y 4. Estas mediciones se llevaron a cabo los días

22 y 24 de agosto de 2022, en horarios matutinos y vespertinos, abarcando las orientaciones norte, sur, este y oeste. Para la obtención de las imágenes térmicas se utilizó una cámara termográfica Fluke Ti25, con una precisión de  $\pm 1.2^\circ \text{C}$ , un rango de medición de  $-20^\circ \text{C}$  a  $+350^\circ \text{C}$  y una resolución de  $160 \times 120$  píxeles. Posteriormente, las temperaturas promedio de las superficies fueron analizadas mediante el software SmartView® (figura 7).

Figura 7

Dispositivo portátil utilizado para la captura de imágenes termográficas en superficies exteriores, y fotografía térmica de un muro tomada con la cámara termográfica Fluke



Fuente: fotos propias, 2022.

En diciembre de 2023 se instalaron sensores de temperatura en el interior de las aulas de los edificios pendientes de validación: el 3 y el 5. Durante este periodo las aulas permanecieron desocupadas, sin usuarios y sin sistemas de aire acondicionado en funcionamiento, lo que permitió recopilar datos con mayor precisión y sin interferencias.

La metodología empleada consistió en la instalación de cuatro sensores HOBO Data Logger, con un rango de medición de  $-20^\circ \text{C}$  a  $70^\circ \text{C}$ . Estos

sensores fueron suspendidos de los proyectores existentes en las aulas, ubicados a la mitad de la altura total del espacio. En ambos edificios los sensores se instalaron en un aula de esquina poniente y una intermedia, manteniendo la misma distribución. La diferencia radica en que en el edificio 5 se ubicaron en el primer nivel, mientras que en el edificio 3 en el tercero. Los datos recopilados fueron descargados y analizados mediante el software HOBOware® (figura 8).

Figura 8  
Instalación de sensores hobo Data Logger en aulas de los edificios



Fuente: fotos propias, 2023.

En el edificio 5 el periodo de monitoreo fue del 30 de noviembre a las 7:00 h al 31 de diciembre a las 12:00 h que corresponden a la hora número 8,027 hasta la 8,760 del año, siendo 734 horas medidas. En el edificio 3 el registro abarcó del día 2 de diciembre a las 10:00 h al 31 de diciembre a las 12:00 h, correspondiente a la hora 8,122 a la 8,760, con un total de 639 horas medidas.

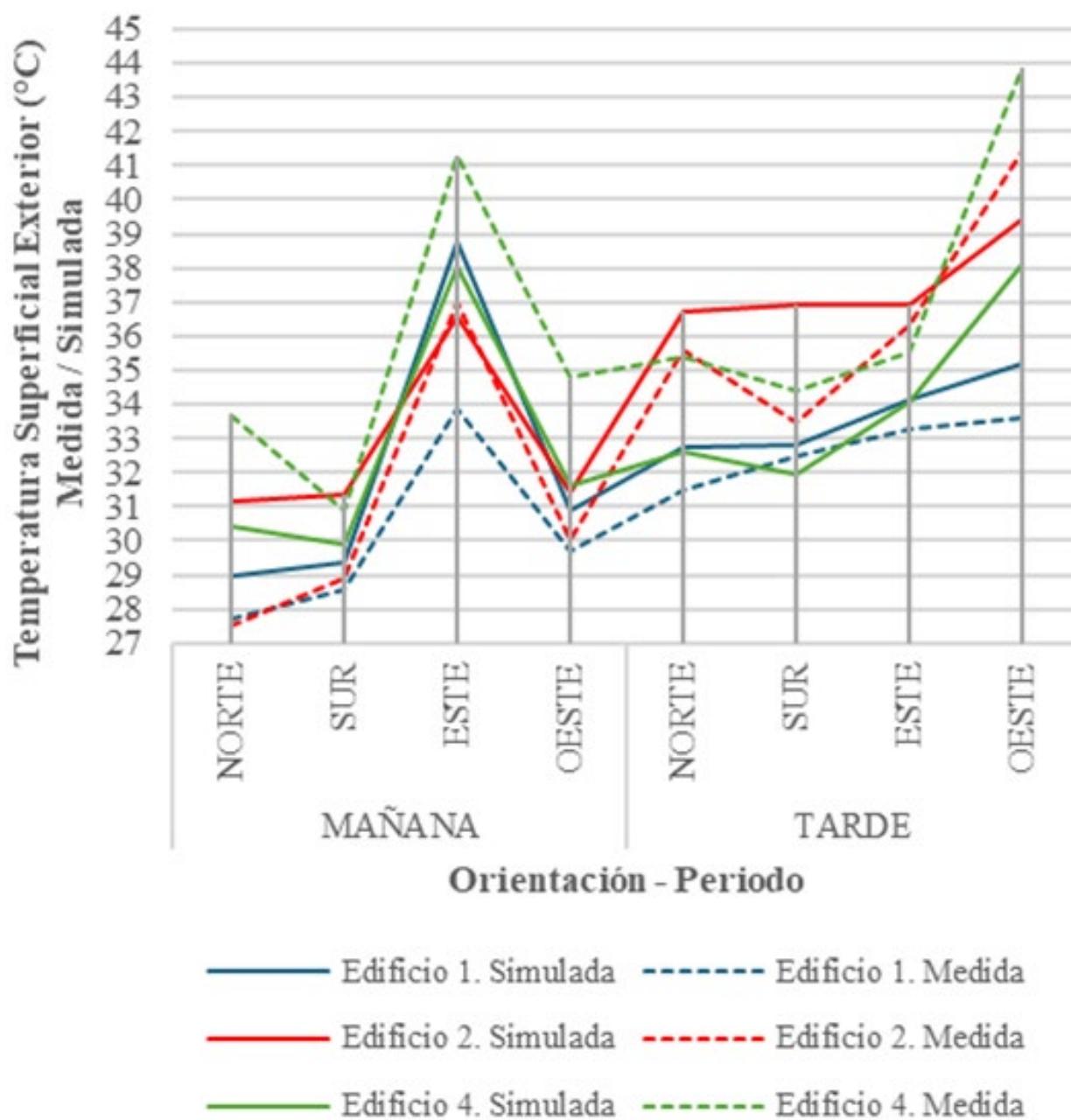
Los resultados de los monitoreos *in situ* se compararon con las simulaciones en OpenStudio®, utilizando el archivo climático EPW de la NASA correspondiente a los períodos monitoreados. Para la validación, se definieron dos variables de salida: “Surface Outside Face Temperature (° C)”, que refleja la temperatura superficial exterior y “Zone

Mean Air Temperature (° C)”, que representa la temperatura interior de mezclado del aula. Posteriormente se generaron gráficos comparativos entre los valores medidos en campo y los obtenidos en la simulación, permitiendo analizar la dispersión de los datos (figuras 9, 10 y 11).

Los coeficientes de determinación ( $R^2$ ) obtenidos reflejaron una alta correlación entre ambos conjuntos de datos, con valores de 0.84 para el edificio 1, 0.90 para el edificio 2, 0.85 y 0.84 para el edificio 3, 0.92 para el edificio 4, y 0.88 y 0.86 para el edificio 5 (figura 12). Estos resultados confirmaron que las simulaciones eran representativas de las condiciones reales del sitio, permitiendo continuar con la investigación.

Figura 9

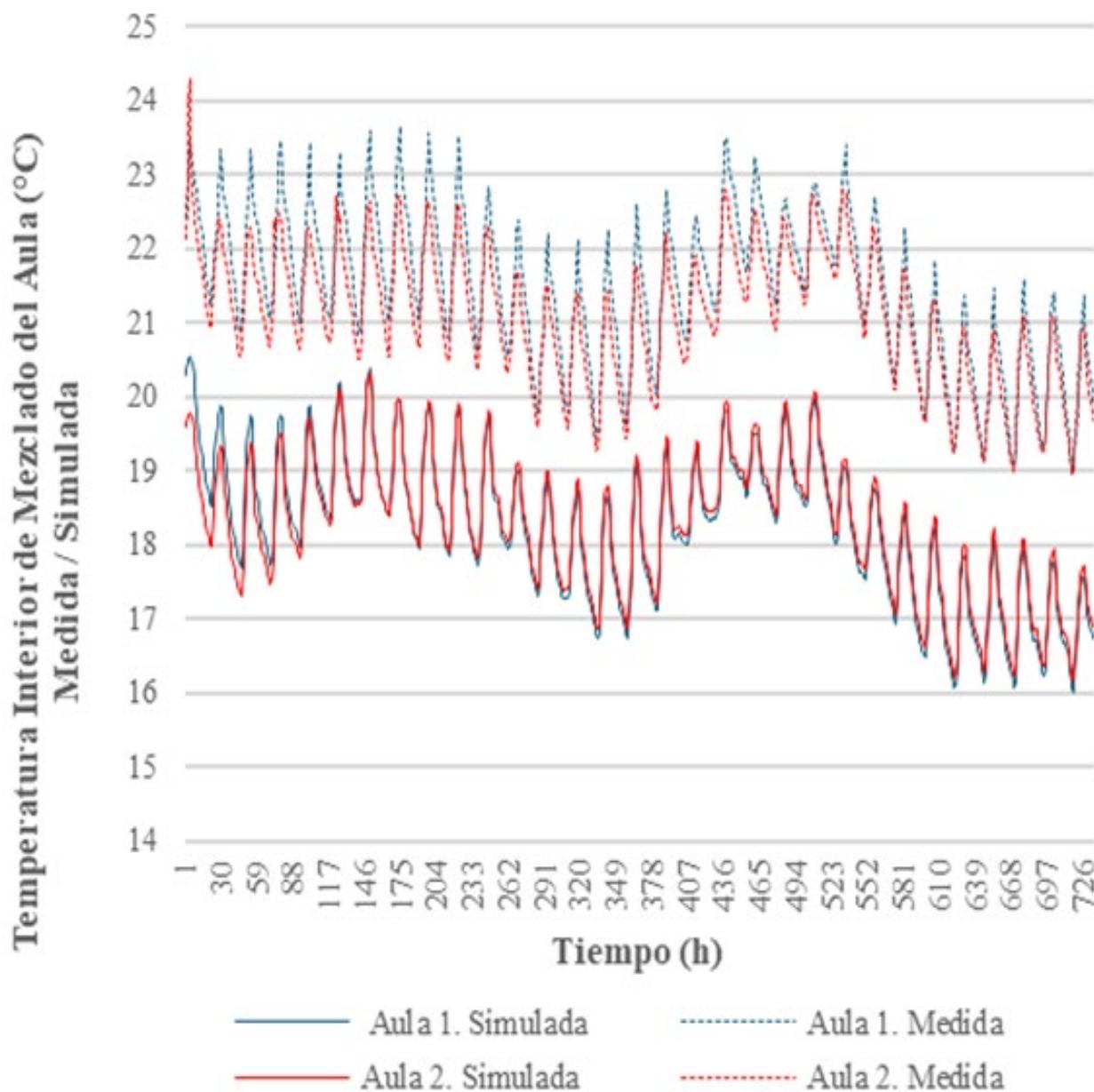
Comparación de temperaturas: simulación vs. medición *in situ* con cámara termográfica en los edificios 1, 2 y 4



Fuente: elaboración propia.

Figura 10

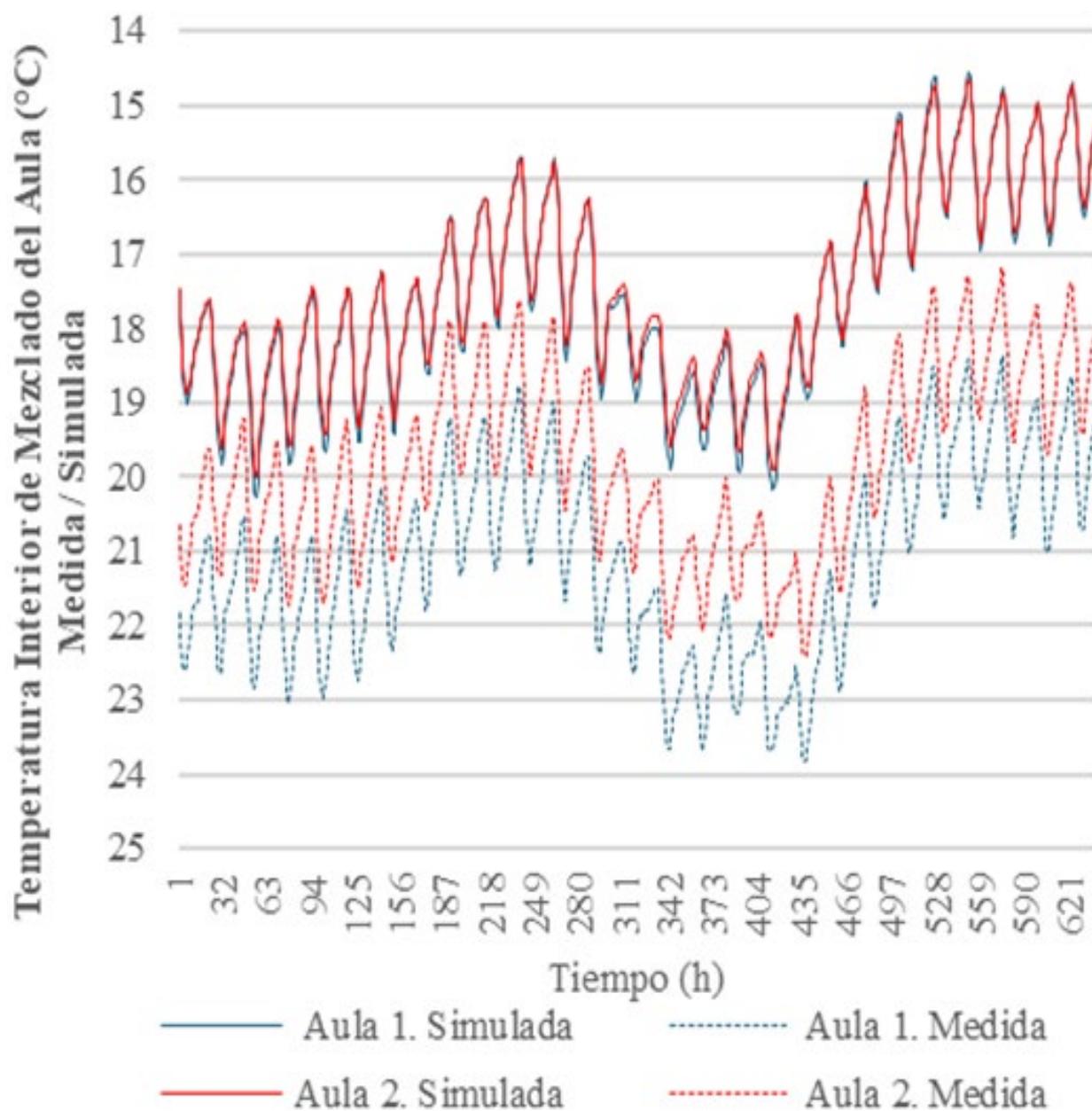
Comparación de temperaturas: simulación vs. medición  
*in situ* con sensores de temperatura interior en el edificio 5



Fuente: elaboración propia.

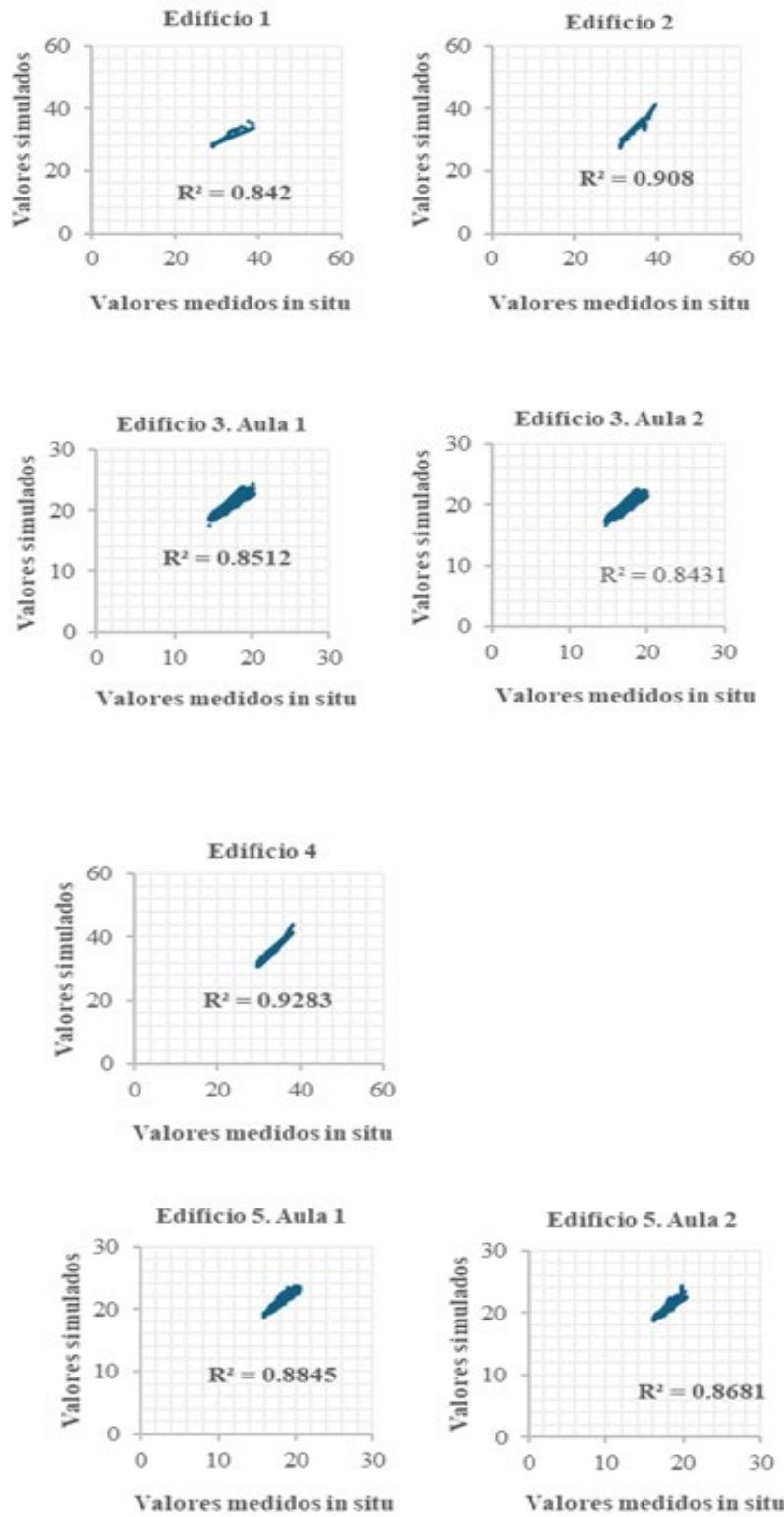
Figura 11

Comparación de temperaturas: simulación vs. medición *in situ* con sensores de temperatura interior en el edificio 3



Fuente: elaboración propia.

Figura 12  
Dispersión entre valores medidos y simulados



Fuente: elaboración propia.

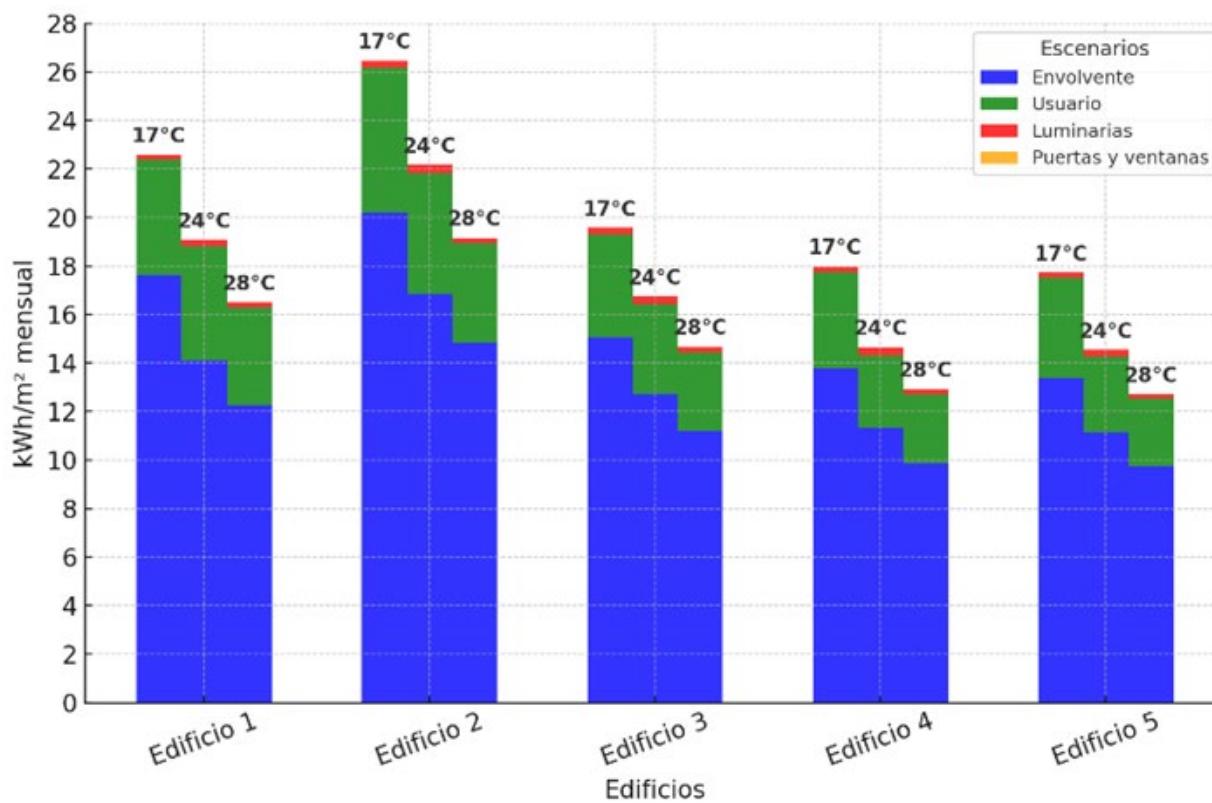
## CONSUMO ELÉCTRICO DE AIRE ACONDICIONADO POR ENFRIAMIENTO

Posteriormente se analiza el consumo eléctrico mensual por unidad de área ( $\text{kWh/m}^2$ ) para el mes de agosto, sin estrategias de eficiencia, considerando distintas temperaturas de termostato (17, 24 y  $28^\circ\text{C}$ ). Los resultados indican que la envolvente térmica (escenario 1) es el principal factor de consumo, representando entre el 74 y 78% del total, seguida por la carga térmica generada por los ocupantes (escenario 2), que contribuye con

20 a 25%. En contraste, el uso de luminarias y la apertura de puertas representan sólo entre el 1 y 2% del consumo.

Se observó que un incremento en la temperatura del termostato de 17 a  $28^\circ\text{C}$  reduce el consumo eléctrico entre 25 y 28%. En cuanto a la comparación entre edificios, el edificio 5 presentó el menor consumo eléctrico mensual, seguido por los edificios 4, 3, 1 y 2, siendo este último el de mayor consumo. En todos los casos se registró una disminución en el consumo cuando la temperatura del termostato se ajustó a  $28^\circ\text{C}$  (figura 13).

Figura 13  
Consumo eléctrico mensual por unidad de área ( $\text{kwh/m}^2$ ) de enfriamiento sin estrategias según escenarios y temperatura del termostato



Fuente: elaboración propia.

A continuación se presenta una gráfica que ilustra el escenario 5, en el cual se cuantifica el ahorro en el consumo eléctrico de aire acondicionado por enfriamiento, con estrategias imple-

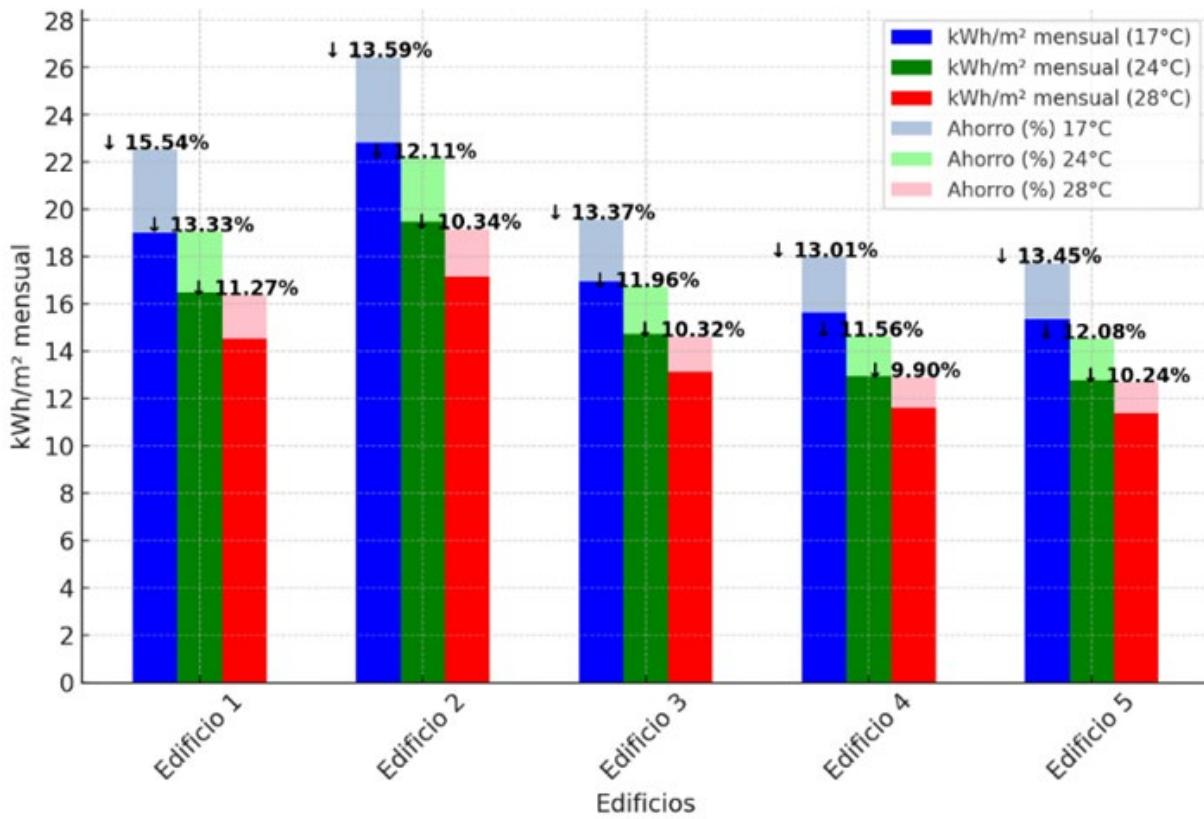
mentadas. Las barras en colores claros representan la reducción del consumo atribuida a estas estrategias. El análisis considera tres temperaturas de termostato: 17, 24 y  $28^\circ\text{C}$ .

Los resultados muestran que el consumo eléctrico es menor a 28° C, pero la reducción es más significativa cuando el termostato opera a 17° C. La variación del ahorro entre edificios es míni-

ma: a 17° C oscila entre 15.54 y 13.01%; a 24° C, entre 13.33 y 12.08%; y a 28° C, entre 11.27 y 9.90% (figura 14).

Figura 14

Consumo eléctrico mensual por unidad de área ( $\text{kWh}/\text{m}^2$ ) de enfriamiento con estrategias según escenarios y temperatura del termostato



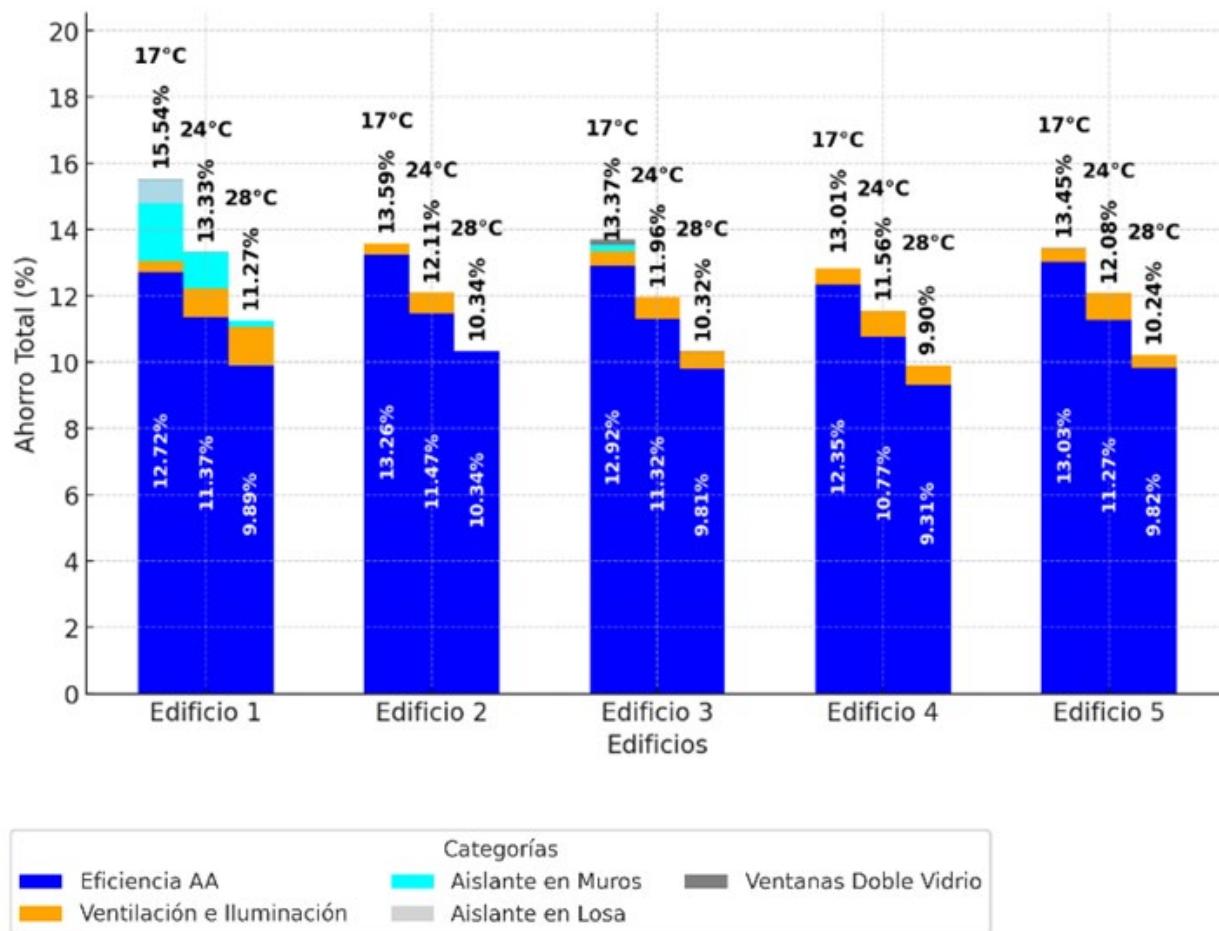
Fuente: elaboración propia.

Las barras en colores claros presentadas en la gráfica 4 identifica el impacto de cada estrategia en el consumo eléctrico. Se analiza la influencia del aislamiento térmico, la reducción de horarios de ventilación e iluminación durante los recesos, y la eficiencia del sistema de aire acondicionado. El impacto del aislamiento térmico es limitado y poco efectivo en todas las temperaturas operativas y edificios. Sin embargo, su mayor beneficio se registra a 17° C, alcanzando un ahorro máximo de 1.75% en muros, seguido de losas (0.71%) y, en

menor medida, ventanas de doble vidrio (0.03%). En los edificios 1, 4 y 5, un exceso de aislamiento combinado con temperaturas de 24 y 28° C generó un ligero aumento en el consumo eléctrico. Mientras que los patrones de uso ligados a la apertura de puertas y ventanas, y encendido de luminarias tuvo un ahorro máximo del 1.19%. Por último, la eficiencia de los aires acondicionados representa el mayor impacto en la reducción del consumo eléctrico, alcanzando valores de ahorro de hasta 13.26% a 17° C (figura 15).

Figura 15

Consumo eléctrico mensual por unidad de área ( $\text{kWh/m}^2$ ) de enfriamiento con estrategias según escenarios y temperatura del termostato

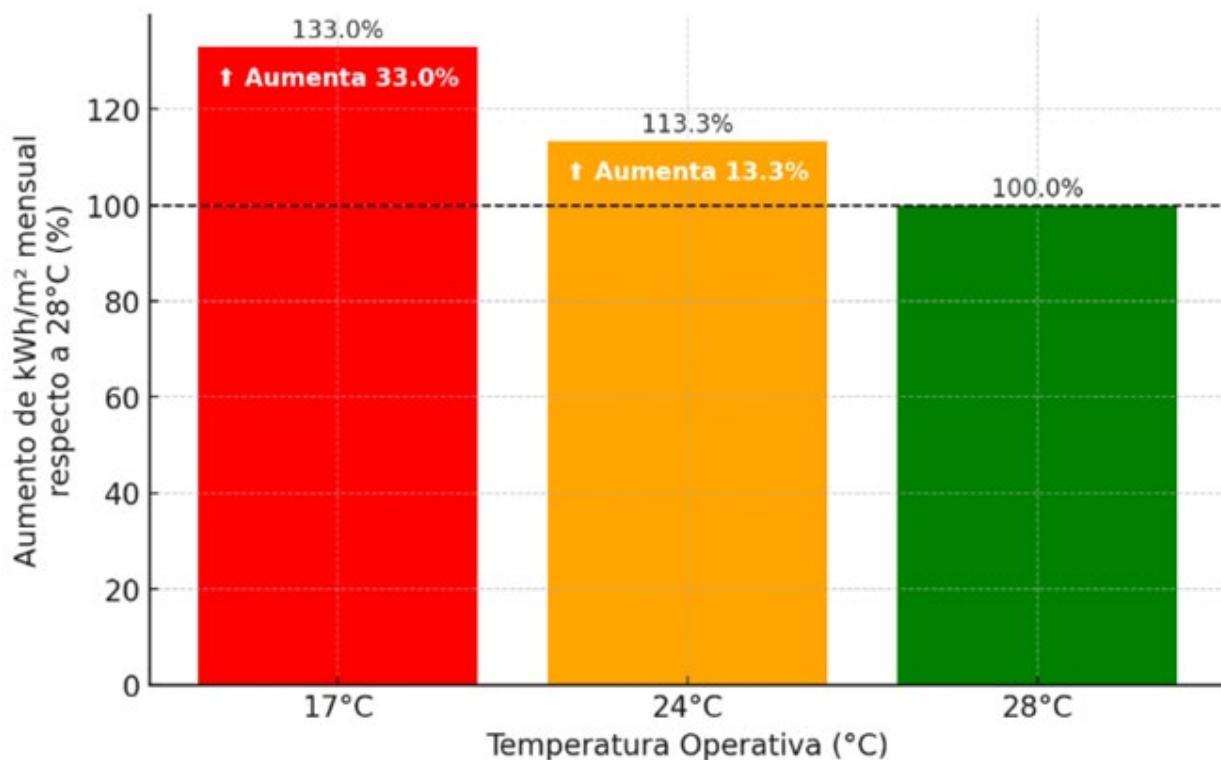


Fuente: elaboración propia.

Para comparar el consumo eléctrico de aire acondicionado por enfriamiento en función de la temperatura operativa, se estableció 28°C como referencia (100%), ya que fue la temperatura con el menor consumo eléctrico en los edificios analizados. A partir de esta referencia se calcularon las proporciones relativas del consumo eléctrico a 17 y 24°C, obteniendo incrementos del 33.0

y 13.3%, respectivamente. Para facilitar la interpretación de esta relación, se generó una gráfica de barras que ilustra el impacto del consumo eléctrico en función de la temperatura operativa, permitiendo visualizar el aumento del consumo cuando el termostato se ajusta por debajo de 28°C (figura 16).

Figura 16  
Comparación del consumo eléctrico de aire acondicionado por enfriamiento en función de la temperatura operativa



Fuente: elaboración propia.

## DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En función de los resultados obtenidos sobre el consumo eléctrico mensual por unidad de área de los sistemas de aire acondicionado por enfriamiento durante el mes de agosto del 2023, se plantea la siguiente discusión.

El mayor consumo eléctrico de aire acondicionado por enfriamiento con y sin estrategias se atribuye a la envolvente de los edificios, lo que evidencia la influencia del diseño constructivo y arquitectónico en el desempeño térmico. Los edificios tipo CAPFCE originales fueron diseñados para un clima templado, lo que ha resultado en la pérdida de estrategias pasivas de diseño en entornos de clima cálido seco. En consecuencia, su envolvente térmica no es óptima para minimizar la carga térmica en estas condiciones.

Además del impacto de la envolvente, el consumo eléctrico también está influenciado por la carga térmica generada por los ocupantes, incluyendo factores como la ocupación y la actividad metabólica, los cuales generan una ganancia térmica interna que incrementa la demanda de enfriamiento, inevitable debido a la alta demanda de uso que presentan las aulas del campus. Por otro lado, el uso de luminarias tiene un impacto menor en comparación con la envolvente y los usuarios, debido a la eficiencia de los sistemas de iluminación y su menor contribución a la ganancia térmica en los edificios analizados.

Asimismo, se identificó que la metodología utilizada en OpenStudio puede presentar limitaciones para simular con precisión el consumo eléctrico asociado a la apertura de puertas y ventanas en períodos de altas temperaturas. La trans-

ferencia de calor por infiltraciones no siempre se representa con exactitud, con lo que puede subestimar la influencia de estas variables en el consumo eléctrico del edificio.

Un aspecto relevante es la relación entre la temperatura del termostato y la efectividad de las estrategias de reducción del consumo eléctrico.

Se observó que las temperaturas de los termostatos de los equipos de enfriamiento, como a 28° C, reportan ahorros significativos en el consumo de energía y que, sumado con estrategias como el uso de aislamiento en las envolventes, así como un buen programa de uso de los espacios por parte de los usuarios maximiza el potencial de ahorro.

Al comparar los consumos eléctricos mensuales por unidad de área de los sistemas de aire

acondicionado por enfriamiento, se identificó que el edificio 5 presenta el menor consumo, seguido por el edificio 4 y, posteriormente los edificios 3, 1 y 2. Este comportamiento se debe a que el edificio 5 posee una envolvente optimizada con una combinación de aislantes térmicos y losas de 40 cm de espesor con alta inercia térmica, lo que contribuye a reducir la transferencia de calor.

El edificio 4, aunque no cuenta con aislamiento en muros, presenta un menor consumo en comparación con otros edificios debido a la misma razón mencionada anteriormente: su losa de entepiso de 40 cm de espesor, que reduce la ganancia térmica. Además, la presencia de un tercer nivel construido con materiales ligeros y aislantes protege las aulas inferiores de la radiación solar, mejorando su desempeño térmico (figura 17).

Figura 17  
Edificio 4 y edificio 5



Fuente: fotos propias, 2025.

El edificio 3, con muros exteriores de tablaroca y aislamiento de poliestireno extruido, registra un consumo intermedio en comparación con los demás edificios. Esto indica que la combinación de materiales ligeros y aislantes contribuye a reducir la carga térmica. Sin embargo, su consumo es mayor que el de los edificios 4 y 5 debido a su menor inercia térmica, lo que genera una mayor dependencia del sistema de enfriamiento para mantener una temperatura estable, incrementando el consumo eléctrico.

El edificio 1, a pesar de no contar con aislamiento térmico en muros y tener losas delgadas de 15 cm, no presenta el mayor consumo. Esto se debe a la presencia de una densa vegetación en su fachada sur, donde árboles frondosos cubren gran parte de la superficie y generan sombra efectiva. Además, su colindancia con otras edificaciones en la fachada poniente reduce la exposición directa a la radiación solar, contribuyendo a una mayor estabilidad térmica.

El edificio 2, fue objeto de una remodelación que incluyó muros aislados, cerramientos mejorados y elementos de sombreado; sin embargo, presenta el mayor consumo eléctrico, lo que sugiere que estas estrategias no han logrado el impacto esperado. En contraste, edificios con me-

nor aislamiento, pero favorecidos por vegetación densa, colindancias y contexto urbano registraron consumos menores, lo que indica que estas estrategias pasivas pueden ser más efectivas si las intervenciones en la envolvente no cumplen completamente su función (figura 18).

Figura 18  
Edificio 3, edificio 1 y edificio 2



Fuente: fotos propias, 2025.

El análisis de estrategias para reducir el consumo eléctrico de aire acondicionado por enfriamiento muestra que su efectividad varía según la configuración arquitectónica y térmica de cada edificio. En los edificios con mayor consumo, la aplicación

de estrategias de reducción resulta más efectiva, mientras que en aquellos con menor demanda, su impacto es más limitado debido a un menor margen de mejora, ya que tienen un mejor diseño.

La implementación de aislamiento térmico contribuye a la reducción del consumo, aunque en algunos casos un exceso de aislamiento combinado con temperaturas de termostato más altas puede generar un ligero incremento en el consumo.

Se destaca que la mejora en la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado y la gestión adecuada de la temperatura del termostato son de las estrategias más efectivas para reducir el consumo eléctrico.

Para contextualizar los resultados, se buscaron estudios sobre el consumo eléctrico mensual por unidad de área de enfriamiento en escuelas ubicadas en climas cálidos secos. Sin embargo, la información disponible se basa principalmente en promedios anuales sin reflejar variaciones estacionales, y no se enfoca en edificios educativos en general, ni en aquéllos con una tipología específica, como los CAPFCE, tampoco incluyen patrones de uso.

El comportamiento mensual de las cargas térmicas sigue un patrón acorde con el clima local, los valores más altos se presentan en los meses cálidos (mayo a septiembre), con picos en agosto, mientras que en los meses fríos se registran valores bajos, pero no nulos, debido a las ganancias internas y a la radiación solar. El incremento en la eficiencia de los sistemas de enfriamiento reduce el consumo eléctrico, pero no modifica la carga térmica, determinada por las condiciones de ganancia y pérdida de calor del edificio, independientes del rendimiento del equipo. Al elevar el termostato de 17 a 28° C, la carga térmica disminuye al reducirse la diferencia de temperatura entre el interior y el exterior.

En agosto, la comparación entre temperaturas interiores sin aire acondicionado y consumos eléctricos con enfriamiento muestra casi el mismo orden en los edificios, a mayor temperatura interior, mayor consumo eléctrico, con una sola excepción atribuible a diferencias constructivas. En ocasiones las diferencias en el comportamiento térmico bajo condiciones activas (con aire acondicionado) no se reproducen en condiciones pasivas (sin aire acondicionado).

A lo largo del año las variaciones de temperatura interior no siguen el mismo patrón estacional en

todos los casos; un edificio que en verano registra temperaturas interiores más bajas no necesariamente las mantiene en invierno, ya que los sistemas constructivos ligeros con aislamiento tienden a enfriarse más rápidamente que los de alta masa térmica.

El análisis por escenarios simulados confirma que las ganancias internas de los usuarios ( $E_2$ ) representan después de la envolvente, la segunda variable de mayor impacto en las temperaturas interiores con un aporte de 9.4% (2.1-4.8° C). El orden de aportación es el mismo que en el consumo eléctrico, aunque las magnitudes difieren porque la variación de temperatura interior está influida por las propiedades térmicas del edificio y la respuesta del sistema de enfriamiento. Cabe mencionar que la presencia de usuarios incrementa considerablemente el consumo eléctrico, pero su efecto en la temperatura interior es proporcionalmente menor, lo que evidencia que la carga sensible no siempre se traduce en un cambio térmico perceptible.

## CONCLUSIONES

Los consumos iniciales sin estrategias oscilaron entre 26.45 kWh/m<sup>2</sup> ( $E_{12C}$ , 17° C) y 12.68 kWh/m<sup>2</sup> ( $E_{10A}$ , 28° C), siendo la envolvente el principal factor determinante (74-78% del consumo), seguida por la carga de ocupantes (20-25%) y la iluminación (1-2%). La reducción del termostato de 28 a 17° C incrementó el consumo entre 25 y 28%. Con estrategias, los ahorros fueron mayores con el termostato a 17° C (15.54-13.01%), disminuyendo a 13.33-12.08% a 24° C y 11.27-9.90% a 28° C. Tras aplicar estas reducciones, los consumos finales quedaron en un rango de 22.36 a 11.42 kWh/m<sup>2</sup>. El mayor aporte individual provino de la eficiencia de los sistemas de aire acondicionado (hasta 13.26%), seguido del aislamiento en muros (máximo 1.75%), la optimización de ventilación e iluminación (hasta 1.19%), el aislamiento en losas (0.71%) y, en menor medida, el doble vidrio (0.03%).

El estudio constituye una contribución relevante a la literatura, ya que no se han encontrado investigaciones previas que aborden específicamente

mente el consumo eléctrico en edificios CAPFCE en climas cálidos-secos ni sus patrones de uso. Los hallazgos ofrecen una base para desarrollar estrategias orientadas a optimizar el consumo de los aires acondicionados y resaltan la necesidad de adaptar el diseño de las edificaciones a las condiciones climáticas locales, en lugar de replicar modelos para climas templados.

Finalmente, esta investigación abre la posibilidad de explorar futuras líneas de estudio que incorporen modificaciones arquitectónicas profundas como el modelado de elementos de sombreado, la integración de vegetación y análisis costo-beneficio, con el fin de lograr una mayor eficiencia eléctrica en este tipo de edificaciones.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaoyzan, F. A., y Almasri, R. A. (2023). Benchmarking of Energy Consumption in Higher Education Buildings in Saudi Arabia to Be Sustainable: Sulaiman Al-Rajhi University Case. *Energies*, 16, 1204. <https://doi.org/10.3390/en16031204>
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. (2010). *ASHRAE Standard 90.0-2010: Energy standard for buildings except low-rise residential buildings*. ASHRAE.
- Balvedi, B. F., Schaefer, A., Bavaresco, M. V., Eccel, J. V., & Ghisi, E. (2018). Identificação de perfis de comportamento do usuário para edificações residenciais multifamiliares e naturalmente ventiladas em Florianópolis. *Ambiente Construído*, 18(3), 149-160. doi: <https://doi.org/10.1590/s1678-86212018000300273>
- Bravo, D., y Pérez, Y. (2016). Eficiencia energética en la climatización de edificios. *Revista Publicando*, 3(8), 218-238. <https://revistapublicando.org/revista/index.php/crv/article/view/228>
- Castro, F., San José, J. F., Villafruela, J. M., Méndez, C., y Guijarro, A. (2008). Mejora de la ventilación de una habitación de hospital. *Ingeniería Hospitalaria*, 37, 1-7.
- Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía. (2018). *Diseño y adaptación de envolventes de edificios. Sistemas vidriados eficientes y acabados reflejantes*. CONUEE. Recuperado de: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/359816/conuee\\_-\\_taller\\_envolventes\\_ar\\_y\\_sv\\_.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/359816/conuee_-_taller_envolventes_ar_y_sv_.pdf)
- Fluke Corporation. (s/f). *SmartView®*. Recuperado de <https://www.fluke.com/es-mx/productos/infraestructura/inspección-termográfica/smartview-software>
- Fuentes, C. (2016). Calificación ambiental de la vivienda. Estrategias de adaptabilidad higrotérmica. *Nova Scientia*, 8(16), 278-312. Recuperado de: [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-07052016000100278](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-07052016000100278)
- Gollini-Mihalopoulos, C., Berbey-Álvarez, A., & Henríquez, F. (2023). Análisis energético del edificio núm. 1 de la Universidad Tecnológica de Panamá: Simulación y optimización del consumo de energía eléctrica a través de soluciones de eficiencia energética. *Tecnología en Marcha*, 36(1), 140-151. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/6998/699877376008/html/>
- González, M. R., y Molina, L. F. (2017). Envoltorio arquitectónico: Un espacio para la sostenibilidad. *Arkitekturax Visión FUA*, 1(1), 49-62. Recuperado de: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/ark/article/download/201/188>
- Guerrero, C. A., Suárez, J. M., y Gutiérrez, L. E. (2013). Patrones de diseño GOF (The Gang of Four) en el contexto de procesos de desarrollo de aplicaciones orientadas a la web. *Información Tecnológica*, 24(3), 103-114. Recuperado de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/infotec/v24n3/art12.pdf>
- López, M. (2011). Hospitales eficientes: Una revisión del consumo energético óptimo. (Tesis doctoral). Universidad de Salamanca, España. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=104268>
- Lucero-Álvarez, J., Hernández Quiroz, N. S., & Estrada Ayub, J. A. (2022). Aplicaciones de la modelación energética de edificios: Revisión y casos de estudio en México. *Vivienda Y Comunidades Sustentables*, 12, 55-80. <https://doi.org/10.32870/rvcs.voi12.213>
- Marincic, I. (2005). *Edificios educativos: Recomendaciones para mejorar su eficiencia térmica*. Hermosillo, Sonora: Universidad de Sonora.
- National Renewable Energy Laboratory. (s/f). *Open Studio*. <https://www.openstudio.net/>
- Quevedo, T. C., Geraldí, M. S., Melo, A. P., y Lamberts, R. (2024). Benchmarking energy consumption in universities: A review. *Journal of Building Engi-*

- neering, vol. 82,108185. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108185>
- Rueda, C., y Rentería, I. (2017). Educación y arquitectura: Centros Regionales de Educación Normal en México, 1960. *Arquitecturas del Sur*, 35(52), 104-115. <https://doi.org/10.22320/07196466.2017.35.052.10>
- Trimble Inc. (s/f). SketchUp. Recuperado de <https://www.sketchup.com>
- United Nations Environment Programme. (2017). *Accelerating the Global Adoption of Energy-Efficient and Climate-friendly Air Conditioner*. Recuperado de: <https://united4efficiency.org/resources/accelerating-global-adoption-energy-efficient-air-conditioners>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (2014). *Ener-Habitat v2.2.0*. [Software]. Instituto de Energías Renovables. <http://enerhabitat.unam.mx/Cie2/index.jsp>
- Varini, C., y Luciani, S. (2015). Simulaciones: Calidad de vida en la vivienda social de San Andrés, Colombia, mediante la gestión bioclimática de flujos de aire. *Revista Nodo*, 9(19), 101-110.
- Yeomans, A. V., Alpuche, M. G., & Borbón, A. C. (2025). *Influencia de los patrones de uso en sistemas de enfriamiento y envolvente térmica en la habitabilidad de espacios educativos. Sobre los procesos del proyecto arquitectónico* (pp. 41-70). Qartuppi.
- Zapata, M. (2011). Elementos y referencias para la formación. *Revista de Educación a Distancia*, 24(3), 103-104. Recuperado de <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642013000300>

