

Diseño de un Procedimiento para Evaluar el desempeño Energético de edificaciones
educativas en clima cálido tropical ante el Cambio Climático

Andrés Fabián Agudelo Fonseca y Luis Felipe González Velásquez

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Electricista

Director

Jorge Luis Cárdenas Rangel

MSc. Ingeniería Eléctrica

Codirector

German Alfonso Osma Pinto

Doctor en Ingeniería - Área Ingeniería eléctrica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Bucaramanga

2026

Tabla de contenido

Introducción.....	10
1. Objetivos.....	12
1.1 Objetivo general	12
1.2 Objetivo específico.....	12
1.3 Estudios previos.....	13
2. Actualización del modelo energético del E3T.....	15
2.1 Descripción de la edificación	15
2.2. Ajuste del modelo E3T.....	17
2.3 Validación de datos medidos.....	20
3. Escenarios de cambio climático	23
3.1 Obtención de datos climáticos.....	24
3.2 Análisis de datos climáticos	26
4. Simulación y comparación de los escenarios	31
4.1 Temperatura interior.....	32
4.2 Humedad relativa interior del aire.....	35
4.3 Ganancias térmicas del edificio.....	38
4.4 Inconfort en las zonas.....	41
4.5 Consumo energético	42
4.6 Análisis de aporte de aires de mayor capacidad.....	45
4.6 Emisiones de CO ₂ del edificio.....	47

5.	Procedimiento para la evaluación del impacto del cambio climático sobre edificaciones educativas de clima cálido tropical.....	50
5.1	Preliminares: Herramientas requeridas.....	50
5.2	Descripción del procedimiento.....	51
5.2.1	Fase 1 levantamiento de información.....	52
5.2.2	Fase 2 creación o actualización de modelo energético.....	53
5.2.3	Fase 3 escenarios de cambio climático actuales y futuros.....	55
5.2.4	Fase 4 simulación y comparación de los escenarios climáticos	56
5.2.5	Fase 5 criterios de evaluación.....	57
6.	Conclusiones.....	60
	Referencias bibliográficas	62
	Apéndices	65

Lista de Tablas

Tabla 1. Aires acondicionados del E3T.....	17
Tabla 2. Datos simulados vs. datos reales	21
Tabla 3. Datos de Climate Consultant – Promedios anuales.....	27
Tabla 4. Datos de CBE Clima Tool – Promedios Anuales.....	27
Tabla 5. Datos de Climate Consultant – promedios cada 4 meses	29
Tabla 6. Datos de CBE Clima Tool – Promedios cada 4 meses.....	29
Tabla 7. Datos de energía consumida por refrigeración[kWh]	45

Lista de Figuras

Figura 1. Edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.	15
Figura 2. Edificio E3T en modelo DesignBuilder	18
Figura 3. Interfaz para adaptar la ocupación DesignBuilder	19
Figura 4. Interfaz del perfil de iluminación y zona horaria DesignBuilder.....	19
Figura 5. Interfaz para definir la zona Meteonorm.....	24
Figura 6. Interfaz para definir el periodo Meteonorm	24
Figura 7. Interfaz de resultados de Meteonorm.	25
Figura 8. Interfaz de resultados de CBE Clima Tool	26
Figura 9. Temperatura interior [°C] SSP2-4.5.....	32
Figura 10. Temperatura interior [°C] SSP3-7.0.....	33
Figura 11. Humedad relativa [%] SSP2-4.5	35
Figura 12. Humedad relativa [%] SSP3-7.0	35
Figura 13. Ganancias térmicas [kW/m ²] SSP2-4.5	38
Figura 14. Ganancias térmicas [kW/m ²] SSP3-7.0.....	38
Figura 15. Inconfort [horas] SSP2-4.5	41
Figura 16. Inconfort [horas] SSP3-7.0	41
Figura 17. Energía neta del sitio[kWh/año] SSP2-4.5	43
Figura 18. Energía neta del sitio [kWh/año] SSP3-7.0.....	44
Figura 19. Refrigeración por zona [kWh/año] SSP2-4.5	46
Figura 20. Refrigeración por zona[kWh/año] SSP3-7.0	46
Figura 21. Emisiones de CO ₂ [kg CO ₂] para el escenario SSP2-4.5	48

Figura 22. Emisiones de CO₂ [kg CO₂] para el escenario SSP3-7.0 48

Figura 23.Procedimiento 51

Lista de apéndices

Apéndice A. Drive con Apéndices elaborados..... 65

Resumen

Título: DISEÑO DE UN PROCEDIMIENTO PARA EVALUAR EL DESEMPEÑO ENERGÉTICO DE EDIFICACIONES EDUCATIVAS EN CLIMA CÁLIDO TROPICAL ANTE EL CAMBIO CLIMÁTICO

Autor: Andrés Fabián Agudelo Fonseca, Luis Felipe González Velásquez

Palabras clave: Cambio climático, Simulación energética, Edificaciones educativas, Desempeño energético

Descripción: El cambio climático representa un desafío significativo para el desempeño térmico y energético de las edificaciones, particularmente en climas cálidos tropicales, donde el incremento de la temperatura, las variaciones en la humedad relativa y el aumento de la radiación solar afectan el confort interior y el consumo energético. En este contexto, las edificaciones educativas, debido a sus altos niveles de ocupación y extensos horarios de operación, presentan una mayor dependencia de los sistemas de climatización, lo que se traduce en mayores costos operativos e impactos ambientales.

Este trabajo tiene como objetivo desarrollar un procedimiento metodológico que permita evaluar, mediante simulaciones energéticas, el impacto del cambio climático en el desempeño energético de edificaciones educativas ubicadas en climas cálidos tropicales. El procedimiento contempla la elaboración, actualización y calibración de modelos energéticos, la definición de perfiles de ocupación y operación, la simulación de escenarios climáticos actuales y futuros, y el análisis de indicadores de desempeño térmico, energético y ambiental.

Como caso de estudio, se seleccionó el Edificio de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander. Las simulaciones se realizaron en el software DesignBuilder, utilizando archivos climáticos generados con Meteonorm bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0 para los años 2030 y 2050. Los resultados evidencian un aumento de la temperatura interior, de las horas de inconfort térmico y del consumo energético, así como una reducción del efecto mitigador del sistema fotovoltaico. El procedimiento propuesto se consolida como una herramienta replicable para apoyar la toma de decisiones orientadas a la eficiencia energética y la adaptación al cambio climático.¹

¹ Trabajo de Grado

Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de ingeniería eléctrica, electrónica y telecomunicaciones. Director: Jorge Luis Cárdenas Rangel. Codirector: German Alfonso Osma Pinto

Abstract

Title: Design of a procedure to evaluate the energy performance of educational buildings in tropical warm climates under climate change

Author: Andrés Fabián Agudelo Fonseca, Luis Felipe González Velásquez

Keywords: Climate change, Energy simulation, educational buildings, Energy performance

Description: Climate change represents a significant challenge for the thermal and energy performance of buildings, particularly in warm tropical climates, where rising temperatures, variations in relative humidity, and increased solar radiation directly affect indoor comfort and energy consumption. In this context, educational buildings, characterized by high occupancy levels and extended operating schedules, show an increasing dependence on air-conditioning systems, leading to higher operational costs and environmental impacts. This study aims to develop a methodological procedure to assess, through energy simulations, the impact of climate change on the energy performance of educational buildings located in tropical warm climates. The proposed procedure includes the development, updating, and calibration of energy models, the definition of occupancy and operational profiles, the simulation of current and future climate scenarios, and the analysis of thermal, energy, and environmental performance indicators. The Electrical, Electronic, and Telecommunications Engineering Building (E3T) at the Universidad Industrial de Santander was selected as a case study. Energy simulations were carried out using the DesignBuilder software, employing climate files generated with Meteonorm under the SSP2-4.5 and SSP3-7.0 climate change scenarios for the years 2030 and 2050. The results indicate an increase in indoor temperature, thermal discomfort hours, and energy consumption, as well as a reduction in the mitigating effect of the photovoltaic system. The proposed procedure is consolidated as a replicable tool to support decision-making processes focused on energy efficiency and climate change adaptation.²

² Faculty of Physical Mechanical Engineering. School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering. Advisor: Jorge Luis Cárdenas Rangel. CoAdvisor: Germán Alfonso Osma Pinto

Introducción

El cambio climático representa uno de los desafíos más importantes del siglo XXI, con impactos significativos en las infraestructuras urbanas, especialmente en regiones con climas cálidos tropicales como Bucaramanga, Colombia. En los últimos años, el incremento de las temperaturas, la variación de la humedad relativa y la mayor frecuencia de eventos climáticos extremos han puesto en evidencia la vulnerabilidad de las edificaciones educativas, que enfrentan un aumento de la demanda de sistemas de climatización para garantizar el confort térmico de sus ocupantes [1]. Este fenómeno no solo incrementa el consumo energético, sino que también plantea retos económicos y ambientales, comprometiendo la sostenibilidad de las instituciones educativas. En este contexto, se ha destacado la necesidad de desarrollar metodologías que permitan evaluar y optimizar el desempeño energético de estas edificaciones ante los efectos del cambio climático [2].

En la Universidad Industrial de Santander (UIS), el Edificio de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) constituye un caso de estudio representativo por su diseño bioclimático, orientado a la eficiencia energética. Este edificio combina estrategias pasivas y activas que favorecen la ventilación y la iluminación naturales, además de integrar elementos como cubiertas verdes y ventanales de gran tamaño, que contribuyen al confort térmico y visual de los ocupantes. Sin embargo, surge la inquietud sobre si su desempeño energético se mantendrá estable ante las condiciones proyectadas del cambio climático en las próximas décadas.

En la literatura científica se hace referencia a metodologías orientadas a evaluar el impacto del cambio climático en el desempeño energético de las edificaciones; sin embargo, este enfoque aún no se encuentra completamente estandarizado ni adaptado a las condiciones

climáticas tropicales. En estos contextos, variables como la humedad relativa, las ganancias térmicas y la alta variabilidad térmica propia de las edificaciones influyen de manera directa y significativa en el comportamiento energético de los edificios. Ante esta problemática, este proyecto plantea el diseño de un procedimiento estructurado que permita cuantificar de manera sistemática la influencia de distintos escenarios de cambio climático sobre el comportamiento térmico y energético de edificaciones educativas.

El estudio se desarrolló mediante la integración de datos meteorológicos generados con el software Meteonorm y de simulaciones energéticas realizadas en DesignBuilder V6, tomando como caso de estudio el Edificio E3T. Para ello, se consideraron los escenarios de cambio climático propuestos por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), específicamente los escenarios de impacto medio y alto, SSP2-4.5 y SSP3-7.0, que representan trayectorias de emisiones intermedias y elevadas de gases de efecto invernadero. Estos escenarios permitieron analizar cómo las proyecciones futuras de temperatura, humedad relativa y radiación solar podrían afectar, a lo largo del tiempo, la eficiencia energética y el confort térmico de la edificación. Los resultados de este trabajo permitirán proponer un procedimiento replicable para otras edificaciones educativas ubicadas en climas cálidos tropicales, aportando criterios técnicos y metodológicos que sirvan de base para el diseño, la gestión y la mejora del desempeño energético en el contexto del cambio climático.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar un procedimiento para evaluar el impacto del cambio climático en el desempeño energético de edificaciones educativas ubicadas en clima cálido tropical.

1.2 Objetivo específico

Obtener el modelo energético actualizado del Edificio E3T a través de la actualización de cargas y datos de uso.

Analizar el desempeño energético del Edificio E3T teniendo en cuenta las condiciones climáticas actuales.

Evaluar el impacto de diferentes escenarios de cambio climático sobre la eficiencia energética del Edificio E3T, con base en los resultados obtenidos de la simulación.

Establecer un procedimiento para evaluar el impacto del cambio climático sobre edificaciones de tipo educativo localizadas en clima cálido tropical.

1.3 Estudios previos

Esta sección presenta una recopilación de estudios que analizan el impacto del cambio climático en el consumo energético de edificios educativos y de otras tipologías, utilizando diversas herramientas de simulación, escenarios del IPCC y metodologías avanzadas. Estas investigaciones ofrecen una base sólida para comprender cómo las proyecciones climáticas futuras influirán en el rendimiento energético y el confort térmico, especialmente en climas tropicales y templados. Los estudios presentados a continuación se encontraron principalmente en la base de datos de ELSEVIER, disponible en la biblioteca de la universidad. Para la búsqueda se utilizaron palabras clave como eficiencia energética, cambio climático y confort de edificaciones.

En 2020, Kazemi E. [8] analizó la predicción del consumo eléctrico a corto plazo en un edificio hospitalario en Turquía mediante los métodos GMDH (Group Method of Data Handling) y Programación de Expresión Genética (GEP), empleando datos climáticos y eléctricos reales. Los resultados evidenciaron que el modelo GMDH presentó una mayor precisión y capacidad de generalización frente a GEP. Aunque el estudio no incorpora escenarios de cambio climático, su enfoque predictivo constituye una base metodológica con potencial de aplicación en análisis energéticos bajo condiciones climáticas futuras.

Ese mismo año, Wang G., Li X. y Ju H. [9] evaluaron el desempeño de materiales de cambio de fase (PCM) en edificios de oficinas convencionales, de ultra bajo consumo (uLEB) y de consumo casi nulo (nZEB), bajo diferentes climas y escenarios de cambio climático del IPCC (SSP1-2.6, SSP2-4.5 y SSP5-8.5), mediante simulaciones con EnergyPlus y TRNSYS. Los resultados mostraron ahorros energéticos entre 0,38 % y 8,19 %, con una disminución de la efectividad de los PCM en climas cálidos bajo escenarios futuros. El estudio concluye

que el cambio climático puede reducir el desempeño de las estrategias pasivas, aportando criterios relevantes para edificaciones educativas en climas cálidos tropicales.

Posteriormente, en 2024, Duan Z., Omrany H. y Zuo J. [10] analizaron el impacto del cambio climático en el consumo energético de edificios de oficinas en ocho zonas climáticas de Australia, utilizando herramientas como Ladybug y Future Weather Generator, bajo los escenarios SSP245 y SSP585 para los años 2050 y 2080. Los resultados indican incrementos significativos en la demanda de refrigeración, especialmente en climas tropicales y templados, así como una disminución progresiva de la demanda de calefacción. Estos hallazgos permiten anticipar cambios en los patrones de consumo energético y son extrapolables a edificaciones educativas ubicadas en climas similares.

En 2025, Bushra N. [4] desarrolló un estudio de diseño paramétrico aplicado a concentradores solares de dos etapas (TSSCs) en edificaciones residenciales en Alemania, empleando Grasshopper y Ladybug para evaluar el potencial solar, el balance energético y el confort visual. Mediante la optimización de variables geométricas y de orientación del edificio, se identificaron configuraciones con mejoras en el desempeño energético y lumínico. El estudio aporta criterios metodológicos relevantes para la integración de tecnologías solares en edificaciones.

Ese mismo año, Monteiro J., Gomes C. y Silva E. [7] realizaron una evaluación dinámica del ciclo de vida en viviendas sociales ubicadas en Teresina, Brasil, empleando simulaciones con EnergyPlus, técnicas de aprendizaje automático y proyecciones climáticas del IPCC hasta 2065. Los resultados evidenciaron que, por cada incremento de 1 °C en la temperatura exterior, el consumo energético de refrigeración aumenta aproximadamente un 8 %, estimándose un aumento del consumo anual del 14 % hacia 2065. La metodología y los

resultados obtenidos son aplicables a edificaciones educativas en climas tropicales, especialmente para la evaluación de la demanda de refrigeración frente al cambio climático. Con base en estas investigaciones previas, se identifican aportes relevantes de información de carácter investigativo que permiten establecer un marco de referencia sólido para el inicio del presente proyecto. Estos antecedentes proporcionan criterios técnicos y metodológicos que facilitan la evaluación del impacto del cambio climático en la eficiencia energética del edificio, lo que fortalece el análisis y la validez de los resultados obtenidos.

2. Actualización del modelo energético del E3T

Este capítulo describe el proceso de actualización del modelo energético del Edificio de la E3T. Inicialmente, se presenta una breve descripción del edificio; posteriormente, se presentan los ajustes realizados para actualizar el modelo y, finalmente, se comenta cómo se validó el modelo energético con el fin de asegurar su calidad previo al análisis de escenarios climáticos.

2.1 Descripción de la edificación

Como se comentó previamente, el proyecto está enfocado en el Edificio E3T de la Universidad Industrial de Santander, ubicado en Bucaramanga. Este edificio ha sido seleccionado como caso de estudio por su relevancia académica y su representatividad en el campus universitario, así como por la presencia de estrategias de ahorro energético.

Figura 1.

Edificio de la Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones.



Nota: Tomada de la página oficial de la escuela

Entre estas estrategias se destacan la incorporación de una cubierta verde y el aprovechamiento de la ventilación y la iluminación naturales, elementos que pueden contribuir a reducir las ganancias térmicas, mejorar el confort interior y disminuir parcialmente la demanda energética del edificio.

El edificio también cuenta con un sistema de generación fotovoltaica compuesto por 43 módulos policristalinos, con una potencia total instalada de 12,9 kWp, orientados principalmente hacia el sur y con una inclinación de 7°. El sistema emplea 43 micro inversores, uno por módulo, lo que permite la monitorización individual de cada panel y una gestión distribuida de la generación. El sistema se encuentra conectado a la red interna del edificio E3T.

En relación con los sistemas de aire acondicionado, solo se cuenta con climatización en los espacios indicados en la Tabla 1. La información sobre la ubicación de las zonas climatizadas y las características de los equipos de aire acondicionado fue recopilada a partir de los registros técnicos del edificio y se presenta de manera detallada en el Anexo A - Datos E3T.

Tabla 1.*Aires acondicionados del E3T*

Aires acondicionados			
	Ubicación	Referencia	Cantidad
Sótano	Sala de profesores	MUB036-3TR	1
	Cafetería	MUB036-3TR	1
Primer piso	Salón Individuales	C36C2AB3-3TR	2
Cuarto piso	Salón 401	C36C2AB3-3TR	2
	Salón 404	C36C2AB3-3TR	2
	Salón 405	C36C2AB3-3TR	2
	Salón 406	C36C2AB3-3TR	2
Quinto piso	Sala de reuniones	2 TR	1
	CCTV	3/4 TR	1
	Dirección E3T	1TR	1

2.2. Ajuste del modelo E3T

La actualización del modelo energético del edificio requirió la recopilación de información reciente sobre las cargas eléctricas y el régimen de uso. En primer lugar, se realizó un levantamiento detallado de la información física y operativa del edificio, en colaboración con el personal de mantenimiento, quien describió las características constructivas y funcionales de las aulas, salas de estudio, pasillos, ascensor, sistema fotovoltaico y cargas generales.

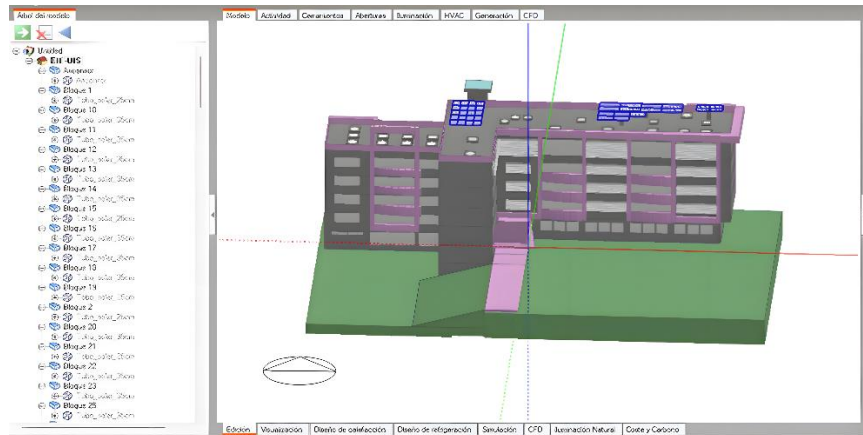
De manera específica, se efectuó una recolección de datos orientada a caracterizar el consumo energético de la edificación. Este proceso incluyó un levantamiento de cargas distribuidas piso por piso y salón por salón, con el fin de identificar y clasificar los principales equipos y dispositivos consumidores de energía. Asimismo, se consideró el ascensor una carga activa dentro del sistema, debido a su impacto significativo en la demanda total del edificio. Cada elemento identificado fue registrado y descrito, lo que permitió caracterizar el consumo eléctrico de todo el edificio. Toda la información obtenida, tanto física como operativa, se encuentra documentada en el Anexo A-Datos E3T.

En segundo lugar, con el apoyo del área administrativa, se recopiló la información sobre la ocupación del edificio durante el periodo académico 2025-1 (ver Anexo A-Datos E3T). Estos datos fueron fundamentales para la configuración de los niveles de ocupación y los horarios de uso de cargas dentro del modelo energético de la edificación en DesignBuilder,

A partir de la información anterior, se procedió a actualizar el modelo energético del edificio, obtenido de una investigación previa. La Figura 2 muestra el modelo energético del Edificio E3 en la interfaz de DesignBuilder.

Figura 1.

Edificio E3T en modelo DesignBuilder



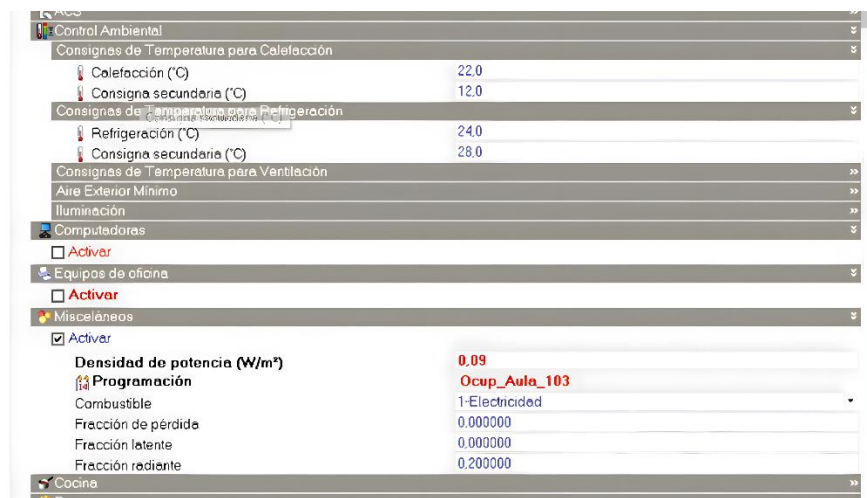
Nota: Figura 2. tomada del simulador DesignBuilder

En cuanto a las actualizaciones realizadas en el modelo, en primera instancia se incorporó la carga correspondiente al elevador, considerando su influencia directa en el consumo eléctrico total de la edificación. También se integró el sistema de generación fotovoltaica existente ubicado en la cubierta del edificio, como se mencionó en la descripción del edificio.

Otro aspecto actualizado consistió en la definición del tipo de espacio que podía configurarse como oficinas, áreas con equipos de cómputo, zonas misceláneas o cocina. Estas variaciones inciden directamente en el perfil de carga y en los patrones de consumo energético presentados en la Figura 3.

Figura 2.

Interfaz para adaptar la ocupación DesignBuilder

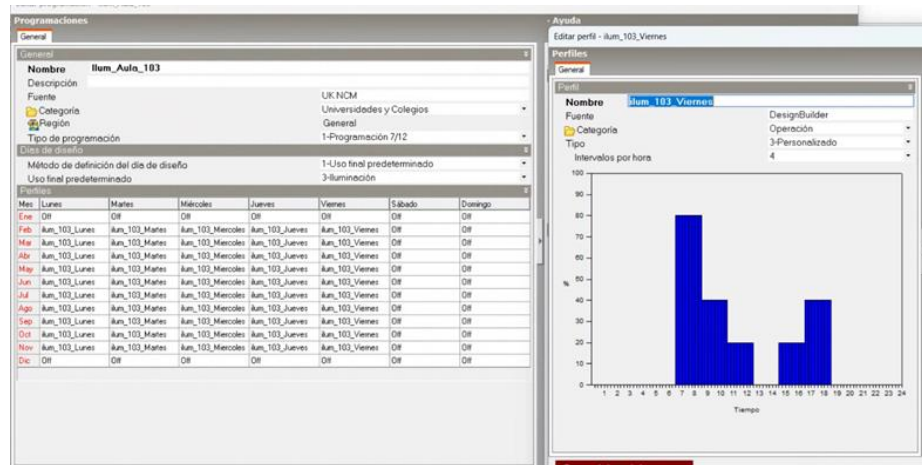


Nota: Figura 3. tomada del simulador DesignBuilder

En el caso de la iluminación, se incorporaron porcentajes variables de uso a lo largo de las 24 horas del día. De esta manera, su impacto en el consumo energético se mantiene constante, pero varía según el perfil de ocupación y las condiciones de luminosidad natural. En el modelo, la iluminación se configuró para activarse principalmente durante las horas sin luz natural, lo que garantiza una operación más realista.

Figura 3.

Interfaz del perfil de iluminación y zona horaria DesignBuilder



Nota: Figura 4. tomada del simulador DesignBuilder

La Figura 4 muestra la interfaz del módulo de iluminación horaria de DesignBuilder correspondiente al aula 103 del Edificio E3T. En ella se definieron los perfiles semanales de operación de la iluminación según la ocupación académica, especificando los días y horarios de funcionamiento. Asimismo, se presenta el perfil horario del viernes, donde se evidencia la variación en el uso de la iluminación a lo largo del día, con mayor operación en las primeras horas de la mañana y un segundo periodo en la tarde, lo que representa los patrones reales de utilización del aula.

2.3 Validación de datos medidos

Una vez actualizado el modelo se procedió a analizar su consumo energético y a compararlo con los datos reales obtenidos de equipos de medición instalados en el edificio. Esta comparación permitió evaluar el grado de ajuste entre la simulación y el comportamiento real de la edificación, evidenciando la coherencia del modelo y las oportunidades de mejora necesarias para aproximar los resultados simulados a las condiciones reales.

Los resultados de las primeras simulaciones evidenciaron una diferencia significativa respecto de los datos reales. Inicialmente, los valores de consumo energético simulados se

encontraban en el orden de GWh, lo que resultaba considerablemente alejado de la realidad. Por esta razón, se realizaron ajustes en los perfiles de uso de las cargas en el modelo con el fin de que el consumo energético simulado y el consumo real presentaran una desviación cercana al 10%.

Otro de los ajustes realizados para alcanzar este objetivo fue la anulación del uso de iluminación artificial durante los periodos en los que la disponibilidad de luz natural se mantenga entre las 8:00 a.m. y las 4:00 p.m. Asimismo, para las cargas eléctricas se emplearon valores promedio variables en función del horario, teniendo en cuenta que no todas las cargas se encontraban activas simultáneamente durante los periodos de ocupación.

Para los sistemas de aire acondicionado se ajustaron los horarios de funcionamiento de acuerdo con los periodos de ocupación del edificio. Se definió que, durante la primera hora de operación, el sistema de climatización opera al 70 % de su capacidad para alcanzar las condiciones de confort requeridas. Posteriormente, mientras se mantenga la ocupación del espacio, el sistema opera de forma continua al 50 % de su capacidad, lo que representa una operación estable. Este ajuste se realizó con el propósito de representar con mayor fidelidad el comportamiento real del consumo energético del edificio en este componente.

En la comparación del consumo energético se consideró el periodo comprendido entre el 1 de enero de 2025 y el 5 de mayo de 2025, en el que se disponía de datos reales. La comparación entre los valores medidos y simulados del consumo energético se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2.

Datos simulados vs. datos reales

MES	CONSUMO MENSUAL SIMULADO (kWh)	CONSUMO MENSUAL REAL (kWh)	PORCENTAJE DE ERROR (%)
ENERO	-208,6	-210,44	0,88%
FEBRERO	2525,83	2619,06	3,56%
MARZO	3735,52	3420,93	9,20%
ABRIL	2841,64	2835,90	0,20%
TOTAL	8894,39	8665,45	2,64%

Datos tomados de las simulaciones de DesignBuilder garantizando el 10 % en el total simulado

De acuerdo con la tabla, el error promedio entre los valores medidos y simulados de consumo energético fue de aproximadamente 2,64 %. Este resultado permite considerar el modelo energético como aceptable y representativo del comportamiento real del edificio. No obstante, el análisis detallado por meses permite identificar ciertas particularidades que influyen en el comportamiento del consumo de energía. En enero, el edificio presenta una condición atípica, ya que la generación de energía supera al consumo registrado. Esta situación se explica principalmente por la ausencia de ocupación durante dicho periodo, lo que reduce significativamente la demanda energética y permite que el sistema de paneles solares instalado supla por completo el consumo del edificio.

Durante el mes de febrero se observó un consumo energético intermedio, asociado al retorno gradual de la comunidad estudiantil y administrativa a sus actividades académicas y laborales. Este comportamiento refleja una etapa de transición, en la que los niveles de ocupación y uso de los sistemas del edificio aún no alcanzan su capacidad operativa. El mes de marzo corresponde al periodo de mayor consumo energético, caracterizado por una operación normal y continua del edificio, sin variaciones significativas en los patrones de ocupación ni en las condiciones de funcionamiento de los sistemas. Este mes puede considerarse representativo del escenario de máxima demanda de energía del edificio.

En abril se identifica una reducción del consumo energético, la cual se asocia directamente con el efecto de la Semana Santa. Durante este periodo se observa una disminución notable en la ocupación del edificio, lo que afecta directamente el uso de los sistemas de iluminación, las cargas eléctricas y el aire acondicionado.

3. Escenarios de cambio climático

Con el objetivo de generar información climática que respalde el análisis y permita cumplir con los objetivos asociados al cambio climático, se empleó el simulador Meteonorm como fuente de datos climáticos. En primera instancia, se definió la zona de estudio, correspondiente a la ciudad de Bucaramanga, con precisión en el Edificio E3T, con coordenadas $7.1^{\circ}\text{N} / 73.1^{\circ}\text{W}$ y una altitud de 988 m s. n. m. Posteriormente, se establecieron tres conjuntos de datos de cálculo:

- Datos actuales, correspondientes a periodos históricos hasta el año 2020.
- Proyecciones climáticas para el año 2030.
- Proyecciones climáticas para el año 2050.

Con base en esta configuración, se plantearon los escenarios de cambio climático según el IPCC. Cabe aclarar que se realizó una modificación respecto de lo establecido inicialmente en el plan de trabajo, reemplazando el escenario SSP1-2.6 por un caso más extremo: SSP3-7.0. Esta modificación tuvo como objetivo analizar un escenario con mayores impactos potenciales, lo que permitió establecer una comparación más contrastada y estratégica con el escenario SSP2-4.5. Los datos obtenidos se presentan en el Anexo B- Escenarios, en formato EPW (EnergyPlus Weather File), compatible con las herramientas de simulación empleadas en el estudio.

3.1 Obtención de datos climáticos

Como se comentó previamente, se usó Meteonorm para generar la base de datos climatológica. Los datos obtenidos a partir de esta herramienta se estructuraron de la siguiente manera: En primer lugar, se definió la zona de estudio dentro del simulador (Figura 5), especificando con precisión la ubicación geográfica del Edificio E3T.

Figura 4.

Interfaz para definir la zona Meteonorm



Nota: Figura 5. tomada del simulador Meteonorm

Posteriormente, se estableció el escenario climático requerido para la obtención de información, junto con los rangos temporales de análisis, definidos en tres momentos: datos actuales, correspondientes a registros históricos hasta el año 2020; proyecciones climáticas para el año 2030; y proyecciones climáticas para el año 2050. La Figura 6 presenta una captura del proceso de establecimiento de los escenarios climáticos.

Figura 5.

Interfaz para definir el periodo Meteonorm



Nota: Figura 7. Tomada del simulador Meteonorm

Figura 7.

Interfaz de resultados de CBE Clima Tool



Nota: Figura 8. Tomada del simulador CBE Clima Tool

3.2 Análisis de datos climáticos

Para verificar la coherencia entre los resultados simulados y las proyecciones teóricas, se decidió comparar el comportamiento de los escenarios simulados con respecto al Tercer Informe de Evaluación (TAR) del IPCC. Este análisis permitió validar la capacidad de los simuladores empleados para representar las condiciones climáticas de la zona de estudio. Para ello, se establecieron tres criterios de validación: el incremento progresivo de la temperatura de bulbo seco, la ligera disminución de la humedad relativa y la variabilidad de la radiación solar máxima en función de la nubosidad mensual.

Con base en estos criterios, se analizaron los valores promediados mensuales de las variables climáticas generados por Meteonorm y contrastados mediante Climate Consultant y CBE Climate Tool. A partir de esta información, se calcularon promedios anuales y estacionales (periodos de cuatro meses), lo que permitió evaluar el cumplimiento de los

razonamientos establecidos e identificar las variaciones climáticas más representativas a escala anual y estacional en la zona de estudio.

Tabla 3.

Datos de Climate Consultant – Promedios anuales.

	PERIODO (AÑOS)	IRRADIACION MAXIMA (Wh/m ²)	TEMPERATURA EXTERIOR SECO (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)
SSP2-4.5	Medido	1010,5	22,8	83,0
	2020	1124,1	21,8	80,66
	2030	1119,9	22,0	81,3
	2050	1109,3	22,8	81,3
SSP3-7.0	medido	1010,5	22,8	83,0
	2020	1130,9	21,8	81,3
	2030	1118,0	22,0	81,2
	2050	1103,2	22,8	81,2

Tabla 4.

Datos de CBE Clima Tool – Promedios Anuales.

	PERIODO (AÑOS)	IRRADIACION MAXIMA (Wh/m ²)	TEMPERATURA EXTERIOR SECO (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)
SSP2-4.5	Medido	1010,50	23,07	83,45
	2020	1124,08	22,33	81,29
	2030	1119,92	22,57	81,73
	2050	1109,25	23,22	81,73
SSP3-7.0	Medido	1010,50	23,07	83,45
	2020	1128,42	22,24	81,82
	2030	1118,00	22,58	81,67
	2050	1103,17	23,22	76,66

Las tablas 3 y 4 presentan los valores de radiación máxima diaria, temperatura exterior de bulbo seco y humedad relativa obtenidos en Climate Consultant y CBE Clima Tool. Los valores obtenidos en estas dos herramientas no evidencian variaciones significativas. Este resultado otorga un mayor grado de confiabilidad a los datos de este

apartado, ya que refleja la consistencia entre las herramientas empleadas. Por esta razón, se decidió basar el análisis principalmente en los resultados de Meteonorm, que permiten extender el periodo de referencia hasta el año 2020, ofreciendo así una representación más actual y precisa de las condiciones climáticas actuales de la zona.

Los valores anuales de radiación para los periodos actual, 2030 y 2050, presentan una tendencia decreciente a lo largo del tiempo. Este comportamiento coincide con lo planteado por el IPCC y constituye un punto de validación inicial que respalda la coherencia de los resultados obtenidos.

Por otra parte, los valores de temperatura de bulbo seco presentan leves diferencias entre los simuladores analizados. Esta variación se debe a que Climate Consultant presenta valores aproximados y redondeados, omitiendo los decimales, mientras que CBE Clima Tool los considera con mayor precisión. En general, se observa un incremento de la temperatura de aproximadamente 0,2 a 0,4 °C por década, lo que coincide con las proyecciones del IPCC y constituye un indicador positivo de coherencia entre los resultados simulados y el referente teórico.

El comportamiento de la humedad relativa presenta diferencias y similitudes con respecto de lo establecido por el IPCC. Las diferencias se observan en el escenario SSP2-4.5, donde se registra un leve aumento de la humedad relativa y una subida de la temperatura. Este fenómeno puede explicarse por una intensificación del ciclo hidrológico, dado que el aire más cálido tiene mayor capacidad para retener vapor de agua, lo que aumenta la evaporación y la humedad atmosférica. Asimismo, la mayor nubosidad y los cambios en la circulación regional favorecen un ambiente más húmedo a pesar del calentamiento global.

Por otra parte, las similitudes se evidencian en el escenario SSP3-7.0, donde se observa una leve disminución de la humedad relativa. Este comportamiento se asocia a un calentamiento más intenso, que acelera la evaporación y eleva la capacidad del aire para retener vapor de agua sin alcanzar la saturación, lo que genera un entorno más cálido, pero relativamente más seco. Este resultado concuerda con lo planteado en el TAR del IPCC para escenarios de forzamiento radiactivo, asociado a un mayor desequilibrio energético del sistema climático debido al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero. La diferencia entre ambos escenarios se debe directamente al nivel de emisiones de CO₂ y al modelo de desarrollo proyectado. Mientras que el SSP2-4.5 representa un escenario intermedio con cierta estabilidad climática, el SSP3-7.0 se caracteriza por altas emisiones y un bajo control climático, lo que intensifica el calentamiento y conduce a una reducción de la humedad relativa debido al desequilibrio del ciclo hidrológico.

Tabla 5.

Datos de Climate Consultant – promedios cada 4 meses.

		Promedio cada 4 meses (enero a abril)			Promedio cada 4 meses (mayo a agosto)			Promedio cada 4 meses (septiembre a diciembre)		
		IRRADIACIÓN MAXIMA (Wh/m ²)	TEMPERATURA EXTERIOR (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	IRRADIACIÓN MAXIMA (Wh/m ²)	TEMPERATURA EXTERIOR (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	IRRADIACIÓN MAXIMA (Wh/m ²)	TEMPERATURA EXTERIOR (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)
SSP2-4.5	ACTUAL	1121,25	22,0	79,75	1133,25	22,0	78,50	1117,75	21,50	83,75
	2030	1150,25	22,2	80,50	1124,75	22,0	79,00	1084,75	21,75	84,25
	2050	1095,25	23,0	80,25	1124,75	22,0	79,00	1107,75	22,25	84,50
SSP3-7.0	ACTUAL	1126,5	22,0	80,75	1162,25	22,0	79,00	1104,00	21,50	84,25
	2030	1131,5	22,2	80,00	1118,25	22,0	79,00	1104,25	21,75	84,50
	2050	1114,75	23,0	80,25	1117,00	23,0	79,00	1077,75	22,50	84,25

Tabla 6.

Datos de CBE Clima Tool – Promedios cada 4 meses.

	Promedio cada 4 meses (enero a abril)	Promedio cada 4 meses (mayo a agosto)	Promedio cada 4 meses (septiembre a diciembre)
--	---------------------------------------	---------------------------------------	--

		IRRADIACIÓN N MAXIMA (Wh/m ²)	TEMPERATURA EXTERIOR SECO (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	IRRADIACIÓN N MAXIMA (Wh/m ²)	TEMPERATURA EXTERIOR SECO (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)	IRRADIACIÓN N MAXIMA (Wh/m ²)	TEMPERATURA EXTERIOR SECO (°C)	HUMEDAD RELATIVA (%)
SSP2- 4.5	ACTUAL	1121,25	22,51	80,46	1133,25	22,54	79,11	1117,75	21,94	84,31
	2030	1150,25	22,78	80,88	1124,75	22,77	79,54	1084,75	22,16	84,77
	2050	1095,25	23,46	80,72	1124,75	23,42	79,53	1107,75	22,78	84,95
SSP3- 7.0	ACTUAL	1126,50	22,41	81,01	1162,25	22,47	79,48	1096,50	21,84	84,97
	2030	1131,50	22,80	80,70	1118,25	22,78	79,43	1104,25	22,18	84,90
	2050	1114,75	23,46	80,72	1117,00	23,39	64,50	1077,75	22,81	84,77

Las tablas 5 y 6 presentan los valores promedios para periodo de cuatro meses para la radiación máxima, temperatura exterior de bulbo seco exterior y la humedad relativa. Estos valores permiten identificar el comportamiento general del clima y el potencial de nubosidad característico de la zona durante los periodos proyectados, evidenciando una tendencia general al incremento de la temperatura de bulbo seco en ambos escenarios climáticos, coherente con las proyecciones establecidas por el IPCC. Este aumento es más pronunciado en el escenario SSP3-7.0, lo que refleja el impacto de un mayor forzamiento radiactivo³ asociado al crecimiento sostenido de las emisiones de CO₂.

Respecto a la humedad relativa, el escenario SSP2-4.5 presenta únicamente variaciones leves, evidenciándose un aumento promedio del orden del 0,53 % hacia el año 2050, asociado a un ciclo hidrológico ligeramente más activo. Este comportamiento se explica porque el incremento de la temperatura del aire favorece una mayor capacidad de retención de vapor de agua, mientras que la mayor presencia de nubosidad contribuye a mantener condiciones de humedad relativamente estables.

Por otro lado, en el escenario SSP3-7.0 se evidencia una disminución significativa de la humedad relativa, con una reducción promedio del 2,646 %, que se acentúa notablemente

³ El forzamiento radiactivo es la diferencia entre la energía solar absorbida por la Tierra y la energía que irradia de vuelta al espacio, y es un factor clave en el cambio climático.

durante los meses intermedios del año, en los que la disminución alcanza valores cercanos al 23,224 %. Este comportamiento está asociado a procesos de evaporación más intensos y a una menor reposición de humedad en la atmósfera, lo cual es consistente con lo descrito en el TAR del IPCC para escenarios caracterizados por un alto forzamiento radiactivo, es decir, por un mayor desequilibrio energético del sistema climático, asociado al aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Estas tendencias se mantuvieron consistentes entre los simuladores empleados, lo que refuerza la validez y la confiabilidad de las proyecciones obtenidas. Desde una perspectiva aplicada, los resultados sugieren que en el escenario SSP2-4.5 es prioritario implementar estrategias pasivas de control y de ventilación natural. Por su parte, el escenario SSP3-7.0 demanda soluciones más robustas de aislamiento térmico y de manejo de la humedad, ante condiciones más cálidas y secas, que podrían afectar el confort térmico y la eficiencia energética del edificio analizado. Toda la información obtenida a partir de los datos climáticos se presenta con mayor detalle en el Anexo A - Datos E3T, donde se incluyen las tablas que respaldan los resultados expuestos en este apartado.

4. Simulación y comparación de los escenarios

En este capítulo se presentan y comparan los resultados de las simulaciones energéticas realizadas bajo condiciones climáticas actuales y futuras, correspondientes a los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. El análisis tiene como propósito evaluar el impacto del cambio climático en el comportamiento térmico y energético de la edificación a lo largo del tiempo. Para ello, se examinan indicadores clave como la temperatura interior, la humedad relativa, las ganancias térmicas, las horas de incomfort térmico, el consumo energético y las emisiones de CO₂, debido a su incidencia directa en el confort de los ocupantes y en la

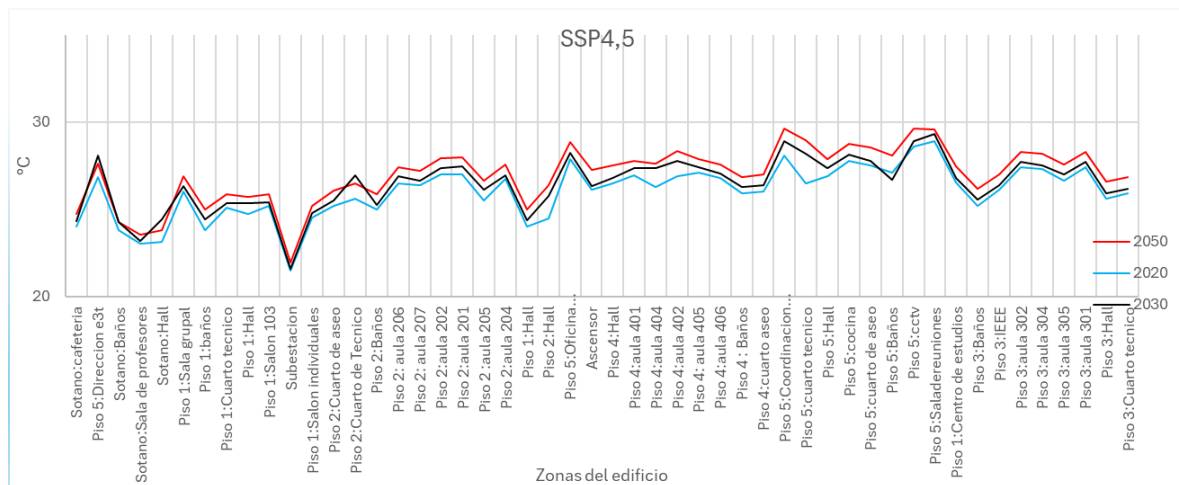
demanda energética del edificio. La comparación entre escenarios permite identificar tendencias y efectos asociados a las proyecciones climáticas futuras.

4.1 Temperatura interior

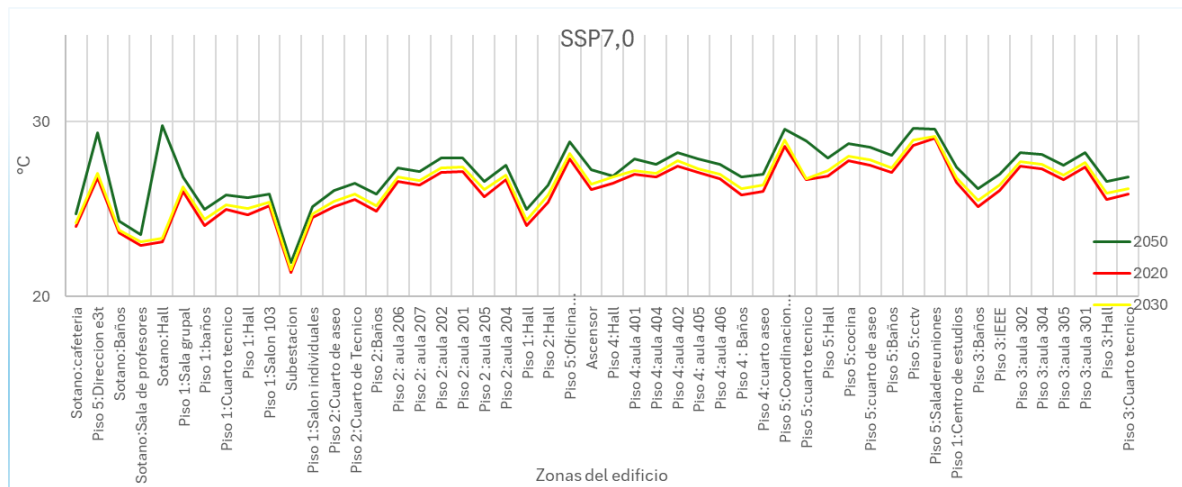
La temperatura interior del aire constituye uno de los principales indicadores para evaluar el comportamiento térmico de una edificación, dado que está directamente relacionada con el nivel de confort térmico de los ocupantes y con la demanda energética asociada a los sistemas de climatización. Desde el punto de vista físico, la temperatura interior resulta del equilibrio entre las ganancias térmicas internas y externas y los mecanismos de disipación de calor del edificio, que incluyen la ventilación natural, la inercia térmica de los materiales y la operación de los sistemas de aire acondicionado. Por lo tanto, cualquier variación en las condiciones climáticas exteriores, como el incremento de la temperatura ambiente o de la radiación solar, se refleja directamente en el comportamiento térmico interior de los espacios.

Figura 8.

Temperatura interior [°C] SSP2-4.5



Nota: Figura 9. Tomada del Anexo C

Figura 9.*Temperatura interior [°C] SSP3-7.0*

Nota: Figura 10. Tomada del Anexo C

Las figuras 9 y 10 presentan la evolución de la temperatura operativa interior promedio en los diferentes espacios del edificio para los escenarios analizados (2020, 2030 y 2050), bajo los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP3-7.0. A partir de los resultados obtenidos, se evidencia un incremento progresivo y consistente de la temperatura interior en todos los espacios evaluados, sin variaciones abruptas entre zonas, lo que indica un comportamiento térmico relativamente homogéneo de la edificación frente a las condiciones climáticas proyectadas. De manera general, se observa un aumento aproximado de 1 °C en la temperatura operativa promedio al comparar el escenario actual con el escenario proyectado para el año 2050, lo cual resulta coherente con las proyecciones establecidas en el TAR del IPCC, en el que se reporta una tasa de incremento de la temperatura media global entre 1,4 °C y 5,8 °C en el periodo comprendido entre 1990 y 2100. Bajo este marco teórico, para un intervalo temporal aproximado de 30 años, como el analizado entre 2020 y 2050, se esperarí evidenciar un aumento cercano a 1 °C.

Este comportamiento confirma que las proyecciones climáticas empleadas en el modelo energético y los resultados obtenidos para la temperatura interior del edificio se alinean con las tendencias climáticas globales descritas por el IPCC. Asimismo, evidencia la sensibilidad del Edificio E3T ante el incremento progresivo de la temperatura exterior, en particular en el escenario SSP3-7.0, caracterizado por un mayor forzamiento radiactivo y un aumento más pronunciado de las temperaturas. Aunque el incremento observado puede considerarse moderado en términos absolutos, su impacto resulta significativo en edificaciones educativas ubicadas en climas cálidos tropicales, como en el caso de Bucaramanga.

Un aumento sostenido de la temperatura interior incrementa la probabilidad de inconfort térmico en los ocupantes y ejerce una presión adicional sobre los sistemas de climatización, lo que se traduce en una mayor demanda energética a lo largo del tiempo. Adicionalmente, al realizar un análisis por zonas, se permite identificar diferencias en el comportamiento térmico interior asociadas principalmente al tipo de uso y al nivel de ocupación de los espacios. Si bien las variaciones de temperatura entre zonas no son pronunciadas, se observa que los espacios con mayor afluencia de personas, como los halls de circulación y las oficinas, presentan los valores más críticos de temperatura interior. Este comportamiento se atribuye principalmente a la mayor densidad de ocupación y a las ganancias térmicas internas generadas por la presencia simultánea de personas y equipos.

Por su parte, las aulas presentan un impacto térmico intermedio, dado que su ocupación es variable y está condicionada por los horarios académicos. Finalmente, los espacios de menor impacto térmico corresponden a áreas de uso ocasional, como los baños

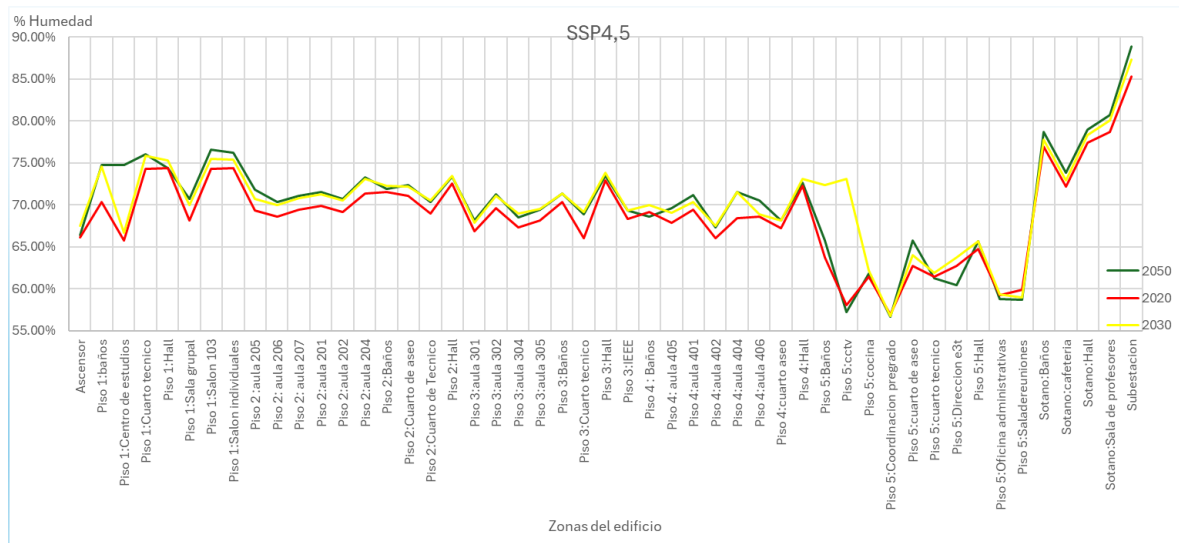
y los cuartos de aseo, donde la baja ocupación y los aportes reducidos de cargas internas limitan el aumento de la temperatura interior.

4.2 Humedad relativa interior del aire

La humedad relativa interior es una variable clave para el confort térmico y la calidad ambiental interior, especialmente en climas tropicales cálidos, debido a su influencia en la percepción térmica. Su comportamiento depende de la temperatura interior, las condiciones climáticas exteriores y factores operativos como la ventilación, la ocupación y la climatización. En escenarios de cambio climático, el aumento de la temperatura modifica la capacidad del aire para retener humedad, intensificando la sensación de calor y elevando la demanda energética para el control de la carga latente.

Figura 10.

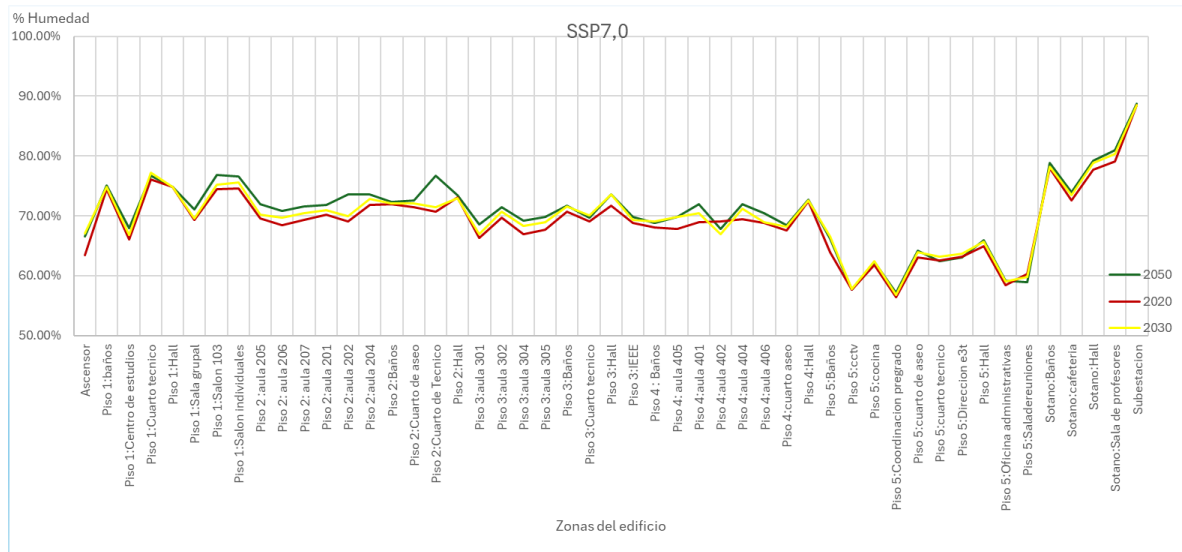
Humedad relativa [%] SSP2-4.5



Nota: Figura 11. Tomada del Anexo C

Figura 11.

Humedad relativa [%] SSP3-7.0



Nota: Figura 12. Tomada del Anexo C

Las figuras 11 y 12 presentan la variación de la humedad relativa interior promedio en los diferentes espacios del edificio para los escenarios analizados (2020, 2030 y 2050), bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. A partir de los resultados obtenidos, se evidencia un aumento progresivo de la humedad relativa interior en los diferentes espacios del edificio, con incrementos aproximados entre el 3 % y el 7 % al comparar el escenario actual con los escenarios futuros.

Este comportamiento es consistente con lo establecido en el TAR del IPCC, que señala que, bajo condiciones de calentamiento global, el aire incrementa su capacidad de retención de vapor de agua en aproximadamente un 7 % por cada grado Celsius de aumento de la temperatura. Considerando que en el análisis de la temperatura interior se identificó un incremento cercano a 1 °C entre los escenarios 2020 y 2050, el aumento observado en la humedad relativa interior del Edificio E3T se ajusta de manera coherente con las relaciones termodinámicas descritas por el IPCC. La relación directa entre el incremento de la temperatura interior y el aumento de la humedad relativa evidencia la intensificación del ciclo

hidrológico a escala local, en la que un aire más cálido favorece tasas de evaporación más altas y una mayor presencia de vapor de agua en el ambiente. En el caso del Edificio E3T, este fenómeno se ve reforzado por las condiciones climáticas exteriores proyectados y por los mecanismos de intercambio de aire entre el interior y el exterior de la edificación, especialmente en los espacios con mayor ventilación natural.

Desde una perspectiva aplicada, el aumento de la humedad relativa interior resulta particularmente relevante, ya que puede agravar las condiciones de inconfort térmico en los ocupantes y generar una mayor exigencia sobre los sistemas de climatización. En escenarios futuros, incluso incrementos moderados de la humedad relativa pueden traducirse en una percepción térmica más severa y en una mayor demanda energética destinada al control ambiental interior mediante el uso de los sistemas de aire acondicionado.

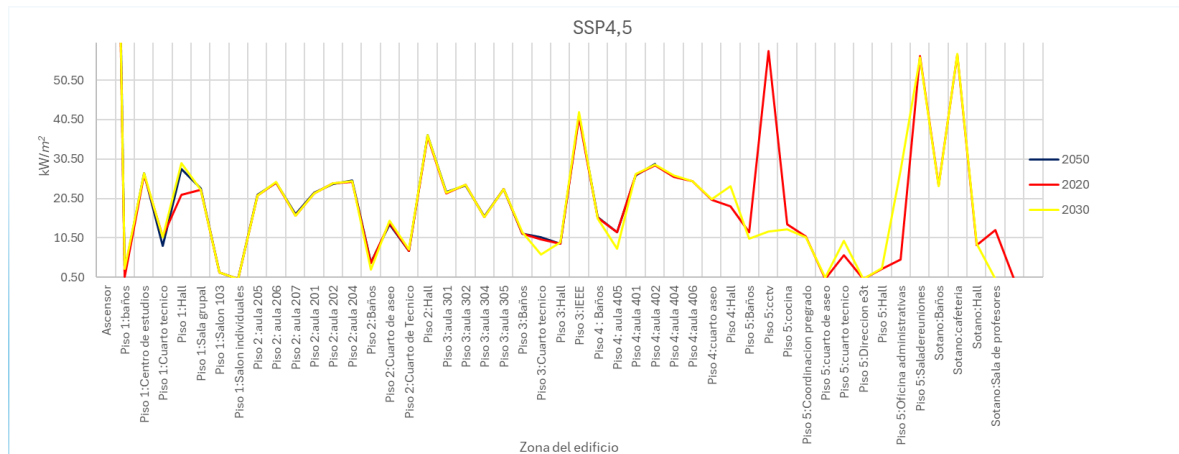
En consecuencia, los resultados obtenidos permiten concluir que el comportamiento de la humedad relativa interior del Edificio E3T se ajusta a las tendencias y relaciones establecidas por el IPCC, lo que, valida las diferencias asociadas al uso, a la ocupación y a las condiciones de ventilación de los espacios. Los valores más críticos se presentan en áreas como las zonas de estudio individual, el centro de estudios y las oficinas, donde la ocupación prolongada y la menor ventilación natural favorecen la acumulación de humedad en el ambiente interior. En un nivel de impacto intermedio se encuentran las aulas, así como los baños y cuartos de aseo, espacios que pueden presentar niveles variables de humedad, pero con una renovación de aire que limita su permanencia. Finalmente, los valores más bajos de humedad relativa se registran en los halls y en los espacios con ventilación natural predominante, donde el mayor intercambio de aire con el exterior reduce la acumulación de vapor de agua.

4.3 Ganancias térmicas del edificio

Las ganancias térmicas corresponden a la energía que ingresa y se acumula en el interior del edificio por efectos del entorno exterior y de fuentes internas, principalmente por radiación solar en superficies acristaladas, transferencia de calor a través de la cubierta y de los muros exteriores. En el Edificio E3T, estas ganancias influyen directamente en el confort térmico y en la carga que deben compensar los sistemas de climatización, y constituyen un parámetro clave en el análisis energético, especialmente frente a escenarios de cambio climático que modifican los flujos de calor y la demanda de refrigeración.

Figura 12.

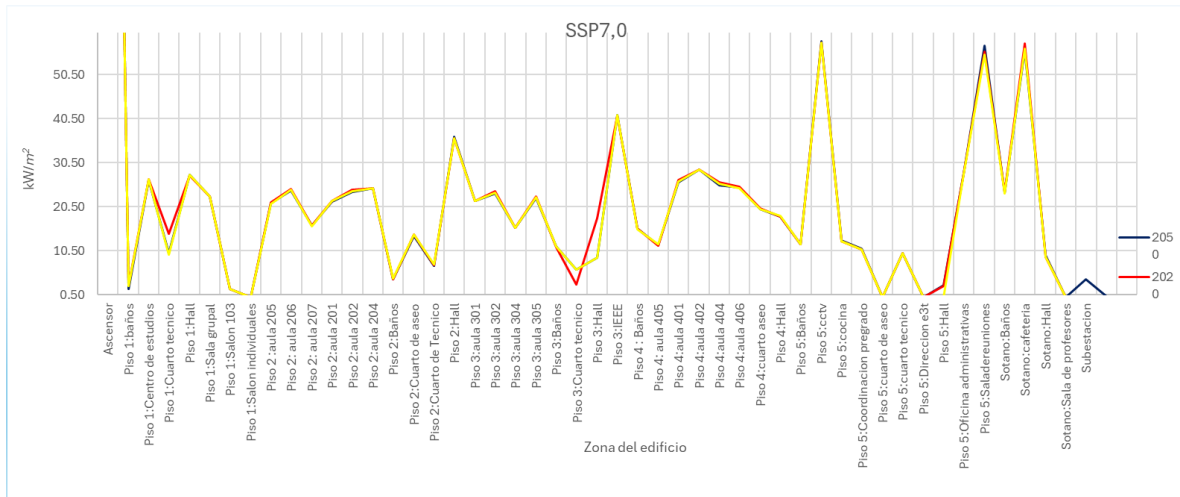
Ganancias térmicas [kW/m²] SSP2-4.5



Nota: Figura 13. Tomada del Anexo C

Figura 13.

Ganancias térmicas [kW/m²] SSP3-7.0



Nota: Figura 14. Tomada del Anexo C

Las figuras 13 y 14 presentan la comparación de las ganancias térmicas totales del edificio para los diferentes escenarios climáticos analizados, considerando los periodos 2020, 2030 y 2050 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0. A partir de los resultados obtenidos, se evidencia que las ganancias térmicas presentan un comportamiento relativamente estable en los distintos espacios del edificio, sin observarse incrementos significativos al comparar el escenario climático actual con las proyecciones futuras.

Este comportamiento se explica principalmente porque las características constructivas, geométricas y de diseño del Edificio E3T se mantienen constantes en todos los escenarios de simulación. Elementos como la orientación del edificio, la relación ventana-muro, los materiales que conforman la envolvente térmica, el espesor de los cerramientos y la presencia de estrategias pasivas de diseño bioclimático limitan la variabilidad de las ganancias térmicas, aun cuando se presentan cambios progresivos en las condiciones climáticas exteriores.

Adicionalmente, aunque los escenarios de cambio climático considerados proyectan variaciones en la temperatura ambiente y la humedad relativa, los resultados del análisis climático previo indican que la radiación solar máxima diaria presenta una tendencia relativamente estable o ligeramente decreciente en los escenarios futuros. Esta condición contribuye a que las ganancias térmicas asociadas a la radiación solar no experimenten incrementos sustanciales, lo que refuerza el comportamiento estable observado en las simulaciones energéticas.

Desde una perspectiva comparativa, la estabilidad de las ganancias térmicas resulta un hallazgo relevante, ya que permite identificar que el aumento de la temperatura interior y de la humedad relativa observado en los escenarios futuros no se encuentra directamente asociado a un incremento significativo de las cargas térmicas externas, sino que se debe principalmente a la modificación de las condiciones climáticas de referencia y a la mayor capacidad del aire para almacenar calor y vapor de agua. En este sentido, el incremento de la temperatura interior responde más a la elevación de la temperatura exterior base que a un aumento de los flujos de calor a través de la envolvente.

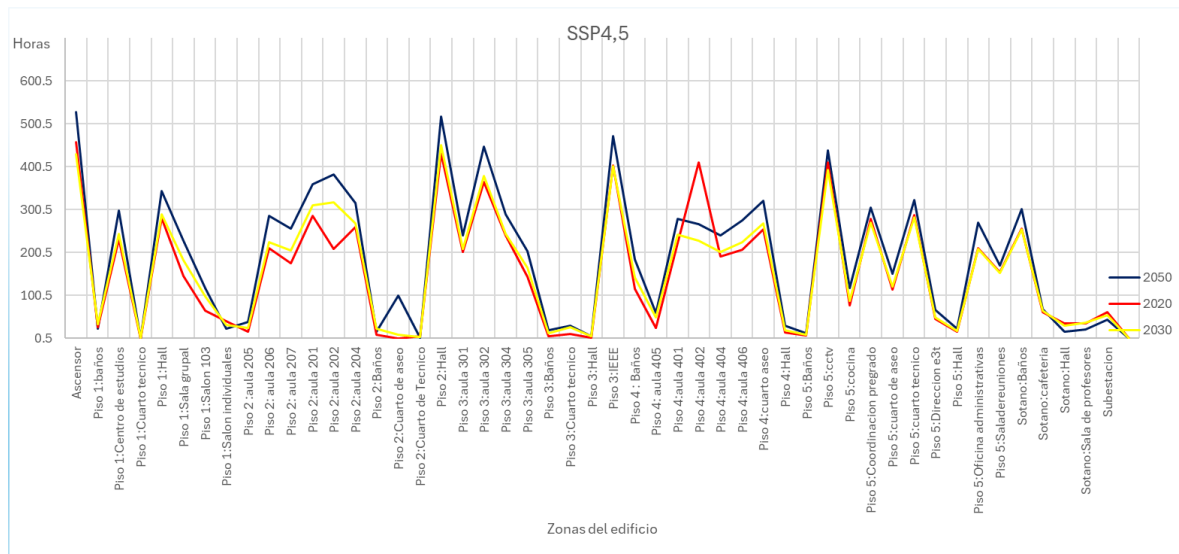
Este resultado evidencia el buen desempeño térmico de la envolvente del Edificio E3T frente a escenarios de cambio climático, así como la efectividad de las estrategias de diseño pasivo implementadas. Asimismo, refuerza la importancia de considerar la interacción entre las variables climáticas y las características constructivas del edificio en el análisis integral del comportamiento térmico y energético y de evitar interpretaciones simplistas basadas únicamente en el aumento de la temperatura exterior.

4.4 Inconfort en las zonas

El inconfort térmico se define como el malestar experimentado por parte de los ocupantes cuando las condiciones térmicas se desvían de los rangos de confort aceptables. En este estudio, el indicador se basa en la norma ASHRAE 55, considerando un 90 % de aceptabilidad y rangos de temperatura operativa dependientes de la temperatura exterior. La evaluación se realiza de forma horaria por zona mediante simulaciones energéticas, identificando las horas fuera de confort y permitiendo analizar la evolución temporal del inconfort y el impacto de las condiciones climáticas futuras en el desempeño térmico del edificio.

Figura 14.

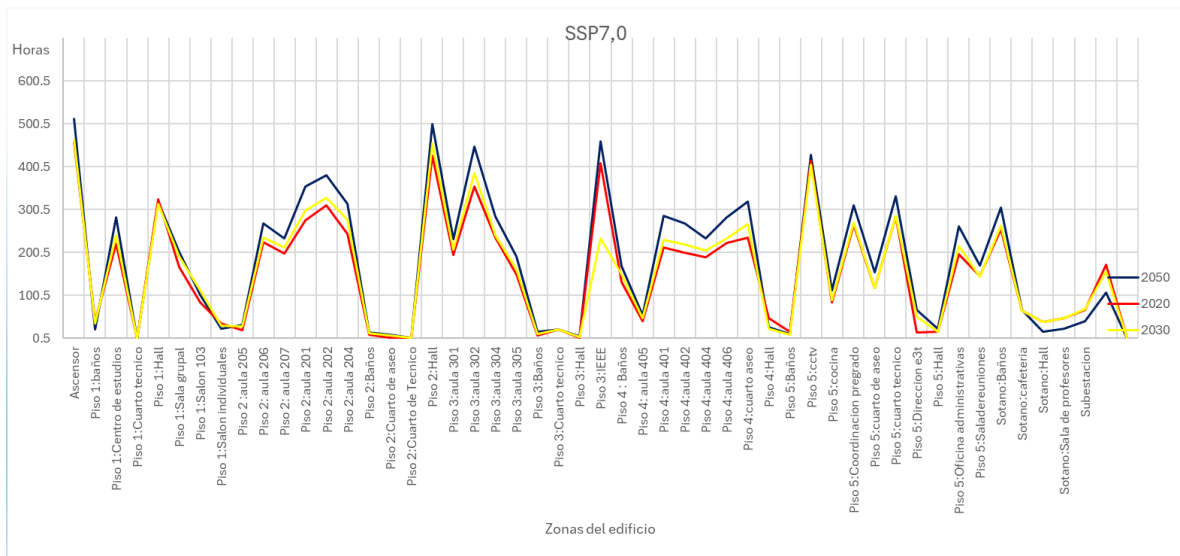
Inconfort [horas] SSP2-4.5



Nota: Figura 15. Tomada del Anexo C

Figura 15.

Inconfort [horas] SSP3-7.0



Nota: Figura 16. Tomada del Anexo C

El análisis de los resultados muestra un aumento progresivo de las horas de inconfort térmico en las distintas zonas del edificio para los escenarios climáticos SSP2-4.5 y SSP3-7.0 entre 2020 y 2050, siendo este último el que presenta los mayores valores. Este comportamiento, ilustrado en las Figuras 15 y 16, indica que, conforme avanzan las proyecciones climáticas, un mayor número de horas no cumple con los criterios de confort de la norma ASHRAE 55 (90 % de aceptabilidad), incrementando el porcentaje de ocupantes potencialmente inconformes. El análisis por zonas evidencia que el inconfort es más elevado en aulas no acondicionadas y en espacios cerrados con alta ocupación, mientras que las áreas con baja afluencia y aquellas con ventilación natural mantienen niveles más estables y reducidos, lo que resalta la influencia del uso y la ventilación en el desempeño térmico de los espacios.

4.5 Consumo energético

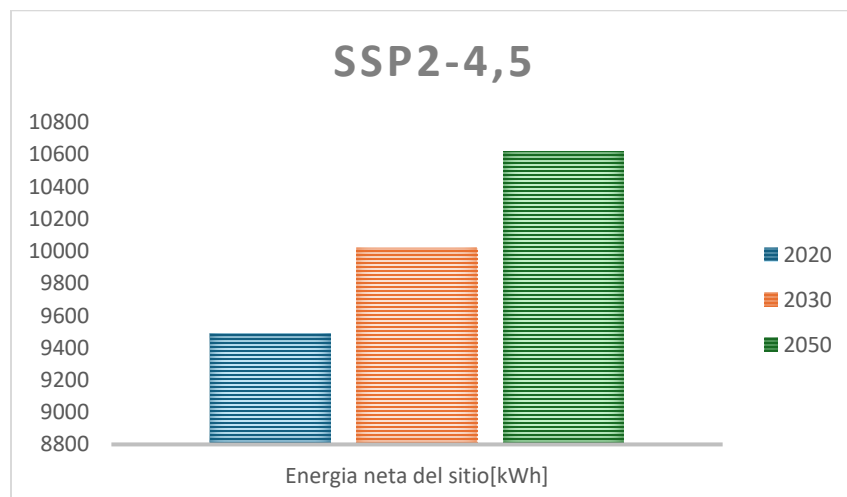
El consumo energético del edificio se analiza a partir de los resultados de las simulaciones energéticas, lo que permite evaluar el desempeño del modelo y su

representatividad frente al comportamiento real del edificio. Adicionalmente, este análisis considera distintos escenarios climáticos y evidencia un incremento del consumo energético en condiciones futuras. A partir de estos resultados, se identifican los principales componentes del consumo energético: iluminación, cargas internas y refrigeración, así como un componente adicional asociado a la generación de energía mediante paneles solares.

El Anexo C-análisis de indicadores presenta la distribución del consumo energético del edificio, con especial énfasis en el consumo asociado a la refrigeración, que representa un aporte significativo al consumo energético total y cuya implementación no está permitida en todas las zonas del edificio. Este consumo está incluido en el consumo energético total analizado. Por su parte, el consumo energético neto se obtiene al descontar de la energía generada por los paneles solares el consumo energético total, lo que permite evaluar el aporte de la generación fotovoltaica a la reducción de la demanda del edificio. De esta manera, el consumo energético neto integra todos los usos finales, incluida la refrigeración, y refleja el balance energético del edificio, como se muestra en las gráficas correspondientes.

Figura 16.

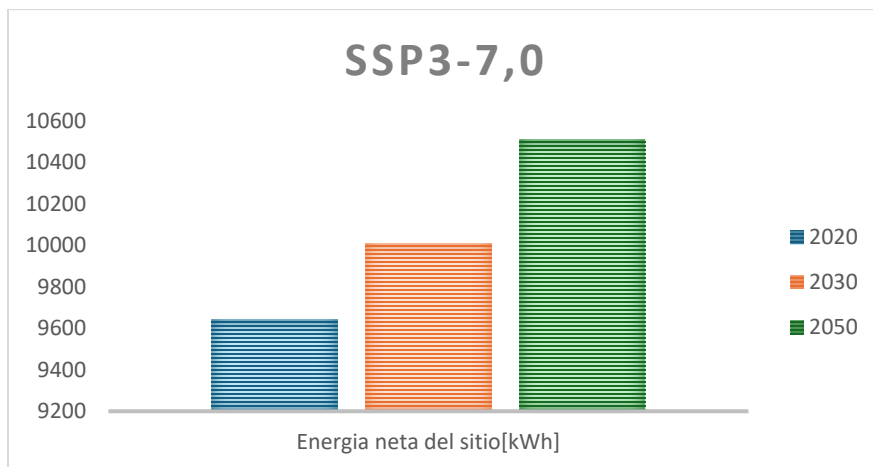
Energía neta del sitio[kWh/año] SSP2-4.5



Nota: Figura 17. Tomada del Anexo C

Figura 17.

Energía neta del sitio [kWh/año] SSP3-7.0



Nota: Figura 18. Tomada del Anexo C

El análisis de los resultados muestra un incremento del consumo energético neto del sitio en ambos escenarios climáticos (SSP2-4.5 y SSP3-7.0) a lo largo de los periodos 2020, 2030 y 2050. Este comportamiento, presentado en las Figuras 17 y 18, indica que, aunque el escenario SSP3-7.0 registra mayores niveles absolutos de consumo, el aumento relativo es más pronunciado en el escenario SSP2-4.5, con incrementos cercanos al 11,92 %, frente al 9,01 % observado en el SSP3-7.0.

Este comportamiento se debe a que el escenario SSP2-4.5 parte de un consumo energético base menor, por lo que un aumento moderado de la demanda de refrigeración genera un crecimiento porcentual más alto. En cambio, en el escenario SSP3-7.0 el consumo inicial ya es elevado debido a condiciones climáticas más severas, lo que reduce el crecimiento en términos porcentuales, aunque el consumo total sea mayor. Este incremento del consumo energético está asociado al aumento de la demanda de refrigeración, que se intensifica a medida que las condiciones climáticas futuras presentan temperaturas exteriores

más altas. Como consecuencia, el edificio requiere un mayor aporte energético para mantener las condiciones de confort térmico establecidas, lo que se refleja directamente en el aumento del consumo energético neto, aun considerando el aporte de la generación fotovoltaica.

4.6 Análisis de aporte de aires de mayor capacidad

Este análisis tiene como propósito evaluar la influencia de los sistemas de aire acondicionado sobre el consumo energético del edificio en los distintos escenarios climáticos considerados. Aunque todos los equipos de climatización se encuentran en operación, el estudio se centra en los de mayor capacidad, ubicados en el cuarto piso y en el salón de individuales, debido a su mayor incidencia en el consumo energético total. A partir de esta selección, se analiza el comportamiento energético simulado de estos equipos, con el fin de identificar su aporte al consumo del edificio y evaluar la evolución de dicho consumo en los diferentes escenarios planteados.

Tabla 7.

Datos de energía consumida por refrigeración[kWh]

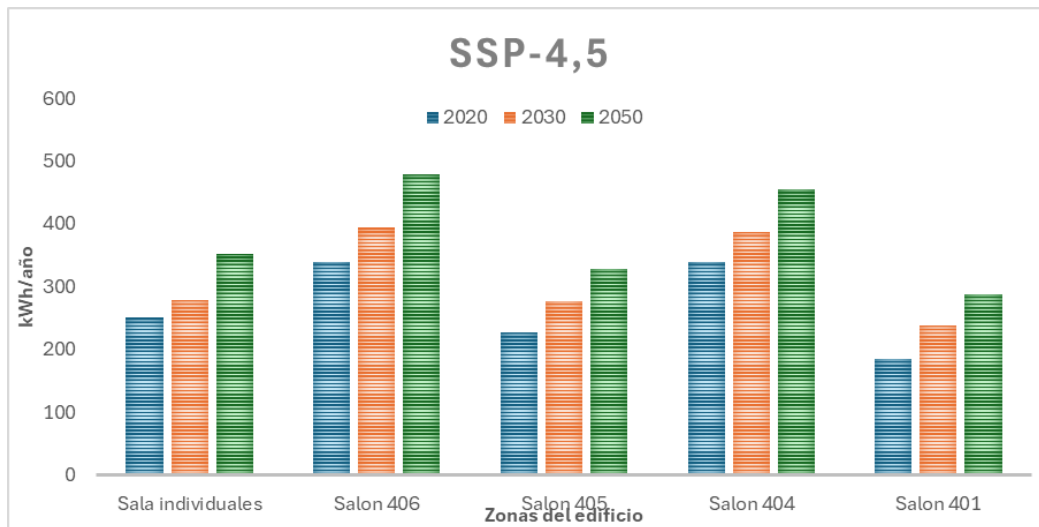
Energía consumida por refrigeración (kWh)		
Periodo de tiempo(años)	SSP2-4.5	SSP3-7.0
2020	3317,84	3455,71
2030	3795,24	3317,84
2050	4496,04	4373,96

La Tabla 7 presenta la energía consumida por los sistemas de aire acondicionado del edificio en su conjunto. Posteriormente, se analiza el desglose del consumo energético correspondiente al cuarto piso y al salón de individuales, dado que en estos espacios se encuentran los equipos de aire acondicionado de mayor capacidad del edificio. Dichos equipos corresponden a dos unidades con capacidad de refrigeración de 32 000 BTU cada

una, que representan el mayor aporte al consumo energético asociado a la refrigeración dentro de la edificación.

Figura 18.

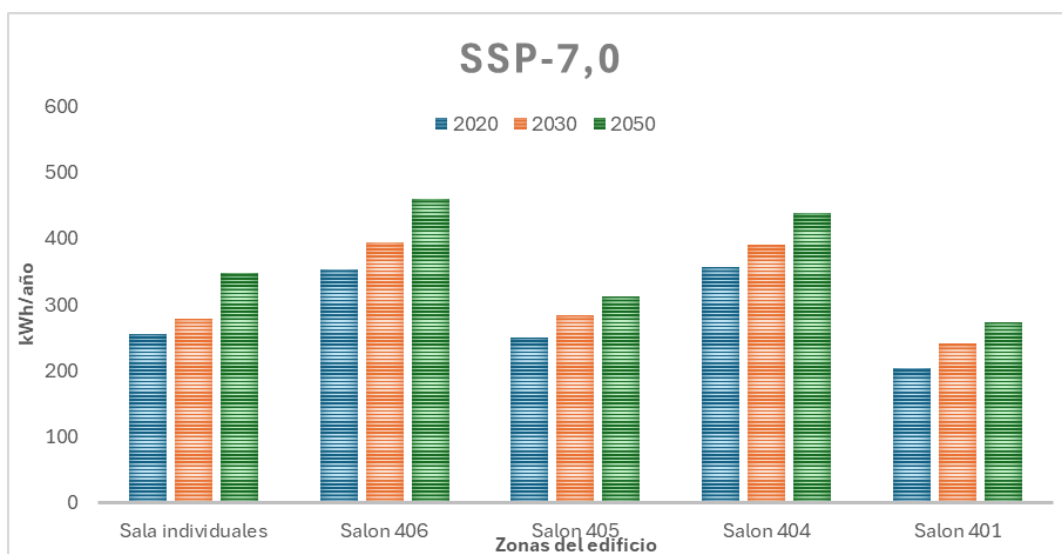
Refrigeración por zona [kWh/año] SSP2-4.5



Nota: Figura 19. Tomada del Anexo C

Figura 19.

Refrigeración por zona [kWh/año] SSP3-7.0



Nota: Figura 20. Tomada del Anexo C

El análisis de los resultados presentados en las Figuras 19 y 20 evidencia un aumento significativo del consumo energético destinado a refrigeración en los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0, con incrementos cercanos al 40 % en 2050 respecto a 2020. Esta tendencia se atribuye al aumento de la temperatura exterior y de la carga térmica del edificio bajo escenarios de cambio climático, y evidencia que las estrategias de diseño sostenible actuales no logran compensar completamente dichas condiciones. El mayor consumo energético es coherente con el incremento del inconfort térmico, reflejando una mayor dependencia de los sistemas de aire acondicionado para mantener condiciones de confort aceptables. Estos resultados resaltan la necesidad de fortalecer las medidas de eficiencia energética y las estrategias de adaptación térmica, incluyendo soluciones pasivas, optimización de los sistemas de refrigeración e incorporación de nuevas tecnologías.

4.7 Emisiones de CO₂ del edificio

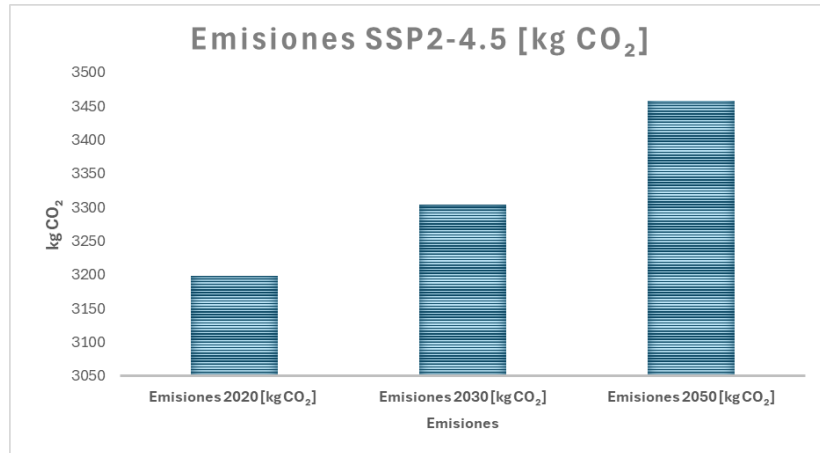
Las emisiones de CO₂ equivalente constituyen un indicador fundamental del impacto ambiental asociado al consumo energético de una edificación, al permitir estimar su contribución a los gases de efecto invernadero derivados de la energía eléctrica utilizada durante su operación. En este estudio, las emisiones se estimaron a partir del factor de emisión del Sistema Interconectado Nacional (SIN), publicado por la UPME, correspondiente al año 2024, con un valor de 0,22 kg CO₂/kWh. Este factor refleja la combinación de tecnologías de generación del sistema eléctrico colombiano, que incluye tanto fuentes renovables como centrales térmicas.

El cálculo de las emisiones se realizó multiplicando el consumo energético anual del edificio, obtenido mediante simulaciones en DesignBuilder, por el factor de emisión

adoptado. Este procedimiento se aplicó de manera consistente a todos los escenarios climáticos y periodos de análisis, lo que permitió comparar el escenario base (2020) con las proyecciones para 2030 y 2050 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP3-7.0.

Figura 20.

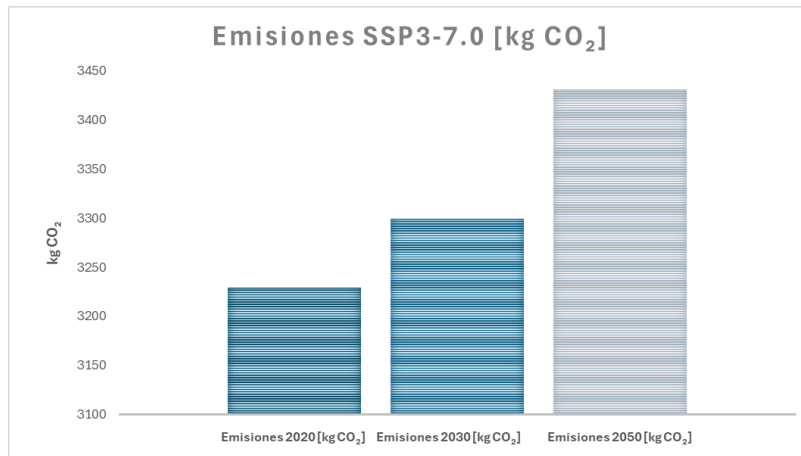
Emisiones de CO₂ [kg CO₂] para el escenario SSP2-4.5



Nota: Figura 21. Tomada del Anexo C

Figura 21.

Emisiones de CO₂ [kg CO₂] para el escenario SSP3-7.0



Nota: Figura 22. Tomada del Anexo C

El análisis de los resultados muestra la evolución de las emisiones de CO₂ del Edificio E3T para los distintos escenarios y periodos de simulación. Este comportamiento, ilustrado en las Figuras 21 y 22, evidencia un incremento gradual y sostenido de las emisiones a medida que avanzan los años de análisis, siendo el escenario 2050 el que presenta los valores más elevados.

En comparación con el escenario actual, se registran aumentos aproximados del 8,10 % en el escenario SSP2-4.5 y del 6,26 % en el escenario SSP3-7.0, lo que refleja el impacto del aumento de la demanda energética, principalmente asociada a la operación de los sistemas de climatización, bajo condiciones futuras de cambio climático. El mayor incremento porcentual de las emisiones de CO₂ observado en el escenario SSP2-4.5, en comparación con el SSP3-7.0, se explica por la diferencia en los valores base de consumo energético y de emisiones. En el escenario SSP2-4.5, el aumento de la demanda de refrigeración se produce sobre niveles iniciales más bajos, lo que genera un crecimiento relativo mayor en términos porcentuales. Por el contrario, en el escenario SSP3-7.0, aunque las emisiones son más elevadas debido a condiciones climáticas más severas, el incremento porcentual es menor al partir de un consumo energético ya elevado.

Desde una perspectiva integral, el análisis de las emisiones de CO₂ complementa los resultados obtenidos en los indicadores y evidencia que el impacto del cambio climático sobre el edificio E3T no se limita a los aspectos de confort y eficiencia energética, sino que también conlleva un aumento progresivo de las emisiones de gases de efecto invernadero. En este sentido, los resultados refuerzan la necesidad de implementar estrategias de adaptación y mitigación que contribuyan a reducir el consumo energético y, por ende, las emisiones asociadas a la operación del edificio en escenarios futuros.

5. Procedimiento para la evaluación del impacto del cambio climático sobre edificaciones educativas de clima cálido tropical

Este capítulo describe el procedimiento para evaluar el impacto del cambio climático en el desempeño energético de edificaciones educativas ubicadas en un clima tropical cálido. Este procedimiento se estructuró a partir de la investigación desarrollada en el marco de este proyecto y se plantea como un medio replicable, orientado a la realización de estudios con énfasis en edificaciones de características similares.

5.1 Preliminares: Herramientas requeridas

Para hacer un uso adecuado del procedimiento es necesario establecer una serie de requerimientos técnicos y de información de entrada asociada a la edificación educativa a evaluar, los cuales se relacionan a continuación:

- Información sobre el diseño arquitectónico y geométrico del edificio, así como sobre las características constructivas de la envolvente (muros, cubiertas, pisos, ventanas).
- Inventario de cargas, iluminación, sistemas de climatización y sistemas fotovoltaicos (si existen).
- Régimen de uso y ocupación del edificio, incluidos los horarios de funcionamiento de las distintas zonas.
- Registros de consumo energético real obtenidos a partir de medidores de energía o de facturas de consumo energético.

Adicionalmente, se requiere el uso de software de simulación energética y de herramientas de predicción y análisis climático, como las siguientes:

- Software dinámico de simulación energética (DesignBuilder).

- Software para la obtención de datos climáticos y el análisis de las condiciones climáticas (Meteonorm, Climate Consultant y CBE Clima Tool).

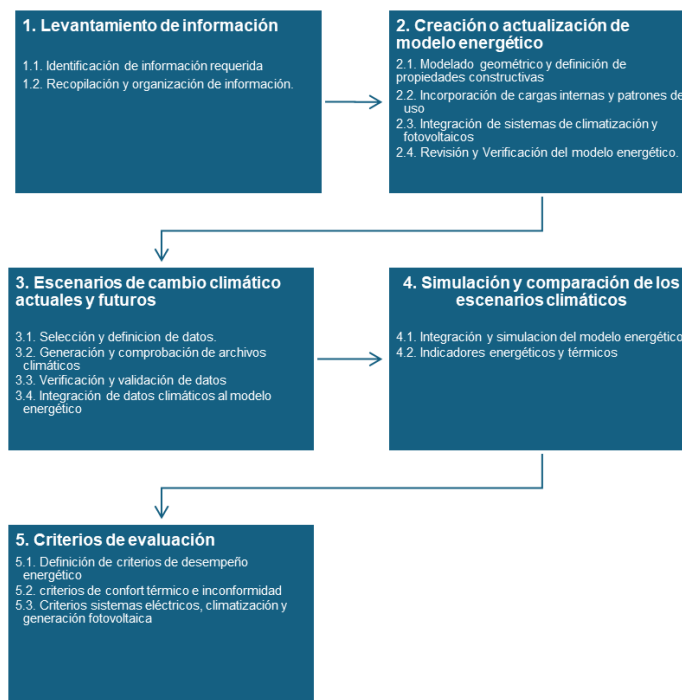
En caso de no tener acceso a esta herramienta, se podrá hacer uso de cualquier software de simulación dinámica y de generación de datos climáticos que se tenga disponible.

5.2 Descripción del procedimiento

El procedimiento se estructura en seis fases secuenciales, las cuales se presentan en la Figura 23: levantamiento de información y validación del modelo; creación o actualización del modelo energético; definición de escenarios climáticos actuales y futuros; simulación y comparación del desempeño energético bajo dichos escenarios; análisis de los criterios de evaluación; y, finalmente, presentación de los resultados. Cada una de las fases está compuesta por actividades que permiten alcanzar su objetivo.

Figura 22.

Procedimiento



Nota. Creación propia.

A continuación, se explican con más detalle las fases y actividades clave del procedimiento.

5.2.1 Fase 1 levantamiento de información

El proceso inicia con la recopilación de la información necesaria para el modelado energético de la edificación, incluyendo la geometría, los materiales constructivos y los sistemas del edificio. Asimismo, se consideran las cargas internas, la iluminación, los perfiles de uso y ocupación, los sistemas de climatización y los datos de los medidores de energía, que sirven como referencia para la validación posterior del modelo.

5.2.1.1 Actividad 1 identificación de la información requerida. La primera actividad del paso 1 consiste en identificar el conjunto de datos necesarios para establecer el modelo energético de la edificación educativa. Esta información puede variar según el software de simulación disponible. De manera general, se requiere conocer las características del diseño arquitectónico y geométrico del edificio, las características constructivas de la envolvente, el inventario de los sistemas de iluminación y de los equipos eléctricos, las características de los sistemas de climatización, los patrones de ocupación y horarios de uso, así como los registros de consumo energético.

5.2.1.2 Actividad 2 recopilación y organización de información. En esta actividad se recopila la información técnica detallada del edificio, relacionada con su diseño. En materia de arquitectura y materialidad, se requieren planos arquitectónicos, fichas técnicas de materiales, documentación de diseño, visitas de campo e inspecciones visuales en las

distintas zonas de la edificación. Esta información incluye la definición de las áreas por zona, la identificación y ubicación de las cargas eléctricas y la caracterización de los sistemas energéticos presentes en cada espacio.

En relación con los sistemas del edificio, para cada zona se deben registrar las potencias instaladas correspondientes a los diferentes tipos de cargas eléctricas, tales como potencia de computadores, equipos ofimáticos, equipos de cocina y cargas misceláneas, expresadas en Watts. Estas potencias se utilizan para estimar las ganancias internas de calor, que se incorporan al modelo energético según el uso y los horarios de operación de cada zona. Adicionalmente, el modelo energético requiere recopilar información sobre la ocupación de los espacios, incluyendo el número de personas y la densidad de ocupación por zona, definida en función del área disponible y del uso del espacio. Finalmente, se recomienda que la información de áreas, potencias instaladas y densidad de ocupación se organice y se unifique en una base de datos inventariada, asignando cada parámetro a la zona correspondiente del edificio.

5.2.2 Fase 2 creación o actualización de modelo energético

Con la información obtenida en la Fase 1, se construye o actualiza el modelo energético de la edificación educativa, incorporando cargas reales, perfiles de ocupación y sistemas de iluminación y climatización de las zonas analizadas. Para ello, se requiere información detallada de la envolvente del edificio, incluyendo materiales, espesores, propiedades térmicas y coeficientes de transmisión

5.2.2.1 Actividad 1 modelado geométrico y definición de propiedades constructivas. En el software de simulación energética seleccionado se ingresa la geometría

del edificio, definiendo áreas, alturas, orientación y distribución espacial de acuerdo con los planos arquitectónicos y las verificaciones realizadas en sitio. Posteriormente, se asignan a los elementos de la envolvente del edificio (muros, cubiertas, pisos y ventanas) las propiedades térmicas correspondientes a los materiales constructivos, tales como la conductividad térmica, la densidad, el calor específico y el coeficiente de transmitancia térmica. En los casos en que no se disponga de información detallada sobre los materiales, se emplean valores de referencia provenientes de normativas técnicas o de bases de datos reconocidas, garantizando su coherencia con el contexto constructivo del edificio. La geometría y las propiedades constructivas podrán simplificarse únicamente cuando dicha simplificación no afecte significativamente el comportamiento térmico del modelo.

5.2.2.2 Actividad 2 incorporación de cargas internas y patrones de uso Ingresar.

En el software de simulación los datos de cargas correspondientes a iluminación, equipos eléctricos y ocupación, así como los horarios de operación asociados a cada uno de estos componentes. El ingreso de esta información debe realizarse por espacio o zona del modelo.

5.2.2.3 Actividad 3 integración de sistemas de climatización y fotovoltaicos.

Definir las zonas con sistemas de refrigeración, considerando el modelo de la unidad y la capacidad de los equipos instalados. Asimismo, incorporar el coeficiente de desempeño (COP) de cada unidad, que se considera en el software DesignBuilder, junto con la definición de los *setpoints* de temperatura y los horarios de operación del sistema. Adicionalmente, en el caso de que el edificio cuente con paneles solares, estos deberán integrarse al modelo energético, teniendo en cuenta datos como la capacidad, la cantidad y la potencia instaladas en el sistema.

5.2.2.4 Actividad 4 revisión y Verificación del modelo energético. Al finalizar la Fase 2, se recomienda revisar integralmente el modelo energético y sus datos de entrada para verificar la coherencia de la geometría, las cargas, los sistemas y los horarios de operación. Asimismo, se debe validar el modelo comparando los resultados simulados con datos reales de consumo energético, considerando el modelo aceptable cuando el error relativo sea inferior al 10 %. Si este umbral no se cumple, se deben ajustar los parámetros del modelo y repetir el proceso de verificación hasta alcanzar el criterio establecido.

5.2.3 Fase 3 escenarios de cambio climático actuales y futuros

Una vez se haya validado el modelo energético de la edificación educativa a evaluar, se procede a definir y obtener los archivos climáticos asociados a los escenarios climáticos necesarios para evaluar su desempeño energético y térmico, considerando tanto las condiciones climáticas actuales como las proyecciones futuras.

5.2.3.1 Actividad 1 selección y definición de datos. La primera actividad consiste en definir la ubicación geográfica del edificio en el software de generación de datos climáticos Meteonorm, asegurando las coordenadas, los escenarios climáticos permitidos por el IPCC y los periodos de análisis a considerar, tanto actual como futuro.

5.2.3.2 Actividad 2 generación y comprobación de archivos climáticos. Posteriormente, se pueden generar los archivos climáticos mediante el software Meteonorm, los cuales se exportan en formato EPW, compatible con DesignBuilder y otros softwares de simulación energética. Además, se recomienda utilizar simuladores complementarios como Climate Consultant y CBE Climate Tool para la validación y verificación de los datos climáticos empleados en el proceso de simulación.

5.2.3.3 Actividad 3 verificación y validación de datos. Verificar la coherencia de los archivos climáticos generados mediante la revisión de variables clave, como las temperaturas medias, máximas y mínimas, la humedad relativa y la radiación solar. En caso de detectarse valores atípicos o inconsistencias, se ajusta la configuración del escenario climático y se regeneran los archivos correspondientes.

5.2.3.4 Actividad 4 integración de datos climáticos al modelo energético. Importar los archivos climáticos en DesignBuilder u otro software de simulación energética y asociarlos al modelo del edificio. Cada archivo se utiliza de forma independiente durante la ejecución de las simulaciones, lo que permite describir y comparar el comportamiento energético de la edificación bajo condiciones climáticas actuales y futuras.

5.2.4 Fase 4 simulación y comparación de los escenarios climáticos

Esta fase tiene por objetivo ejecutar simulaciones energéticas del edificio educativo en los escenarios climáticos definidos, comparar los resultados y evaluar las condiciones actuales y futuras, considerando diversos indicadores.

5.2.4.1 Actividad 1 integración y simulación del modelo energético. Definir en el software de simulación DesignBuilder los parámetros generales de cálculo, tales como el periodo de simulación (se recomienda que sea de un año), el paso temporal y los resultados necesarios. En este procedimiento, se recomienda que las simulaciones permitan obtener no solo resultados de consumo energético, sino también de desempeño térmico y ambiental. Esta configuración debe mantenerse constante en todos los escenarios climáticos para garantizar la comparabilidad de los resultados. Con ello, se simulan los diferentes escenarios establecidos con sus respectivos periodos de análisis.

Actividad 2 indicadores energéticos y térmicos. En el interior operativo de las simulaciones, extraer los principales indicadores de análisis, entre los cuales se pueden identificar: Consumo eléctrico total anual, Consumo eléctrico asociado a sistemas de climatización, Demanda energética por usos finales, Temperatura interior operativa, Humedad relativa interior, Horas de inconfort térmico, y Emisiones indirectas de CO₂ asociadas al consumo eléctrico

5.2.5 Fase 5 criterios de evaluación

Esta fase tiene como objetivo definir los criterios de evaluación a partir de los indicadores potenciales establecidos en la fase previa, mediante el análisis del desempeño energético de la edificación frente al impacto del cambio climático. Dicho análisis se fundamenta en los resultados de las simulaciones energéticas para escenarios actuales y futuros. Los criterios definidos permiten establecer parámetros de comparación y lineamientos de recomendación que sirven de base para la interpretación posterior de los resultados.

5.2.5.1 Actividad 1 definición de criterios de desempeño energético. Establecer los criterios para la evaluación del desempeño energético de la edificación, considerando indicadores como el consumo eléctrico total anual, el consumo eléctrico asociado a los sistemas de climatización y la demanda energética por usos finales. Estos criterios permiten comparar el comportamiento energético del edificio en los distintos escenarios climáticos definidos.

La evaluación del desempeño energético requiere analizar el consumo eléctrico del edificio de forma desagregada y comparativa entre escenarios climáticos, diferenciando el consumo total del asociado a los sistemas de climatización. El análisis debe realizarse con

condiciones constructivas, operativas y de ocupación constantes, de manera que las variaciones se atribuyan a los cambios climáticos, y verificando la coherencia entre el consumo simulado y los registros reales para asegurar la confiabilidad del modelo

5.2.5.2 Actividad 2 criterios de confort térmico e inconformidad. Establecer el confort térmico de la edificación a partir de indicadores obtenidos directamente del software de simulación, tales como la temperatura operativa interior y el número de horas de inconfort térmico por zona. Las horas de inconfort se determinan automáticamente en DesignBuilder mediante la comparación entre las condiciones interiores simuladas y los rangos de confort establecidos por la norma ASHRAE Standard 55, permitiendo identificar la pérdida de condiciones interiores aceptables bajo los distintos escenarios analizados.

La evaluación del confort térmico requiere definir la condición operativa de cada zona, diferenciando entre espacios climatizados y no climatizados, y considerar los parámetros climáticos propios de cada escenario. El análisis se basa en las horas de inconformidad térmica por zona, utilizando rangos de confort definidos como indicador complementario del consumo energético para interpretar el impacto del cambio climático en las condiciones interiores.

5.2.5.3 Actividad 3 criterios sistemas eléctricos, climatización y generación fotovoltaica. Evaluar el comportamiento de los sistemas eléctricos del edificio, con énfasis en los sistemas de climatización, mediante el análisis de su desempeño y su contribución al incremento del consumo energético bajo los diferentes escenarios climáticos. Este criterio considera la revisión de la capacidad de los equipos de aire acondicionado y su adecuación a las zonas que atienden, a fin de determinar su eficiencia operativa. Adicionalmente, evaluar la influencia de los perfiles de iluminación, considerando el nivel de aprovechamiento de la

iluminación natural en los distintos espacios, especialmente en aquellos en los que esta es suficiente, de manera que el uso de iluminación artificial sea reducido o nulo.

También se debe analizar el aporte del sistema de generación fotovoltaica como estrategia para mitigar el incremento del consumo energético, evaluando su efecto en la reducción del consumo de energía proveniente de la red eléctrica y de las emisiones indirectas de CO₂, y reconociendo las limitaciones asociadas al aumento progresivo de la demanda de climatización.

El análisis de los sistemas eléctricos debe enfocarse en la climatización y las cargas del edificio, considerando los perfiles de ocupación para evaluar su impacto en el consumo bajo distintos escenarios climáticos. En contraste, el sistema fotovoltaico debe evaluarse de manera independiente de la ocupación, ya que su generación depende de las condiciones climáticas y permite estimar su contribución a la reducción del consumo energético y de las emisiones de CO₂.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian que el cambio climático afecta de manera progresiva las condiciones térmicas interiores del Edificio E3T, principalmente a través del incremento simultáneo de la temperatura del aire y la humedad relativa, aun cuando las características constructivas y las ganancias térmicas de la envolvente se mantienen constantes. Esto confirma que las variaciones en las condiciones climáticas externas constituyen un factor determinante del deterioro del confort térmico interior en edificaciones educativas ubicadas en climas cálidos tropicales. Al comparar los resultados obtenidos en este estudio con los reportados en investigaciones previas sobre edificaciones educativas en climas cálidos, se observa que las tendencias generales son consistentes, especialmente en el aumento de la demanda energética de refrigeración en escenarios de cambio climático. No obstante, los resultados difieren en la magnitud de los incrementos y en la respuesta del edificio, lo que evidencia que la incorporación de estrategias de diseño sostenible y de generación fotovoltaica previamente implementadas permite atenuar parcialmente el crecimiento del consumo energético, aunque sin compensarlo por completo en escenarios futuros.

El análisis integrado de los indicadores térmicos, energéticos y ambientales muestra que, si bien el edificio presenta un desempeño favorable desde el punto de vista constructivo y bioclimático, su operación futura se verá progresivamente condicionada por los efectos del cambio climático. Este comportamiento se manifiesta en el incremento de las horas de inconfort térmico, en la mayor demanda energética asociada a los sistemas de refrigeración y en el aumento progresivo de las emisiones indirectas de CO₂, principalmente debido a la mayor operación de los sistemas de climatización. Además, los resultados de las

simulaciones evidencian que los sistemas de aire acondicionado se consolidan como el principal factor de incremento del consumo eléctrico en los escenarios futuros, en particular, los equipos de mayor capacidad ubicados en el cuarto piso y en las zonas individuales. Aunque el edificio cuenta con generación fotovoltaica, el crecimiento de la demanda eléctrica reduce su efecto mitigador tanto en el consumo neto como en las emisiones totales, lo que indica que la adaptación al cambio climático no puede depender únicamente de la generación renovable. Como tal, resulta necesario complementar las estrategias existentes con medidas adicionales de eficiencia energética, gestión de la demanda y optimización de los sistemas de climatización, que permitan mitigar el impacto del cambio climático sobre el desempeño energético y ambiental del edificio.

Posteriormente, desde el punto de vista metodológico, el procedimiento desarrollado demostró ser una herramienta efectiva y replicable para evaluar el impacto del cambio climático en el desempeño energético de edificaciones educativas en climas cálidos tropicales. Su aplicación al edificio E3T permitió identificar tendencias futuras relevantes en consumo energético, dependencia de la refrigeración, emisiones de CO₂ y balance energético, aportando una guía metodológica útil para procesos de diseño, evaluación y toma de decisiones orientadas a la eficiencia energética, sostenibilidad y adaptación climática de infraestructuras educativas.

Referencias bibliográficas

- [1].ipcc. (2022). *impacts, adaptation, and vulnerability*. obtenido de <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>
- [2].crawley, d. b. (2008). *contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs*. obtenido de <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.027>
- [3].aidin sadeghifam, s. m. (2015). uso combinado del diseño de experimentos y la simulación dinámica de edificios en la evaluación de la eficiencia energética en edificaciones residenciales tropicales. *scielo*.
- [4].bushra, n. (2025). *parametric design of urban forms and building-integrated two-stage solar concentrators (tsscs) to assess solar potential, daylight, and energy balance in various climates*. obtenido de elsevier: <https://www.elsevier.com/locate/apenergy>
- [5].gang wang, x. l. (2025). *respuesta del rendimiento del pcm exterior al rendimiento térmico multinivel y al cambio climático en edificios de oficinas*. obtenido de elsevier: <https://www.elsevier.com/locate/est>
- [6].juan david velásquez, p. a. (2021). *restricciones y alternativas para el desarrollo de modelos energéticos basados en datos en colombia*. obtenido de scielo: <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2021.22.1.004>
- [7].júlia santiago de matos monteiro lira, c. p. (2025). *un enfoque novedoso para la evaluación dinámica del ciclo de vida: integración del cambio climático y los*

- patrones de funcionamiento de la refrigeración en el pronóstico del consumo energético de los edificios.* obtenido de elsevier: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S037877882500386x?via%3dihub>
- [8]. ehran kazemi chahardeh, m. a. (2025). *predicción del consumo energético de un edificio educativo mediante el método grupal de manejo de datos basado en datos meteorológicos.* obtenido de elsevier: <https://doi.org/10.1016/j.ijft.2025.101067>
- [9]. xiaofeng liu, y. z. (2022). *método de predicción de consumo energético a corto plazo para edificios educativos basado en aprendizaje profundo .* obtenido de elsevier: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111379>
- [10]. zhuocheng duan *, h. o. (2024). *impact of climate change on energy performance and energy conservation measures effectiveness in australian office buildings.* obtenido de elsevier: <https://www.elsevier.com/locate/energy>
- [11]. ashrae55. (s.f.). *estandar de confort termico.* obtenido de <https://colombia.ashraechapters.org/en/ashrae-publica-la-versin-2017-del-estndar-de-confort-trmico>
- [12]. planeacion, d. n. (2017). *energia y demanda en colombia.* obtenido de https://www.dnp.gov.co/laentidad_/misiones/mision-crecimiento-verde/documents/ejes-tematicos/energia/mcv%20-%20energy%20demand%20situation%20vf.pdf

- [13]. robert t. watson. (2025). *tercer informe del ippc*. obtenido de https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/tar_syrfull_es.pdf
- [14]. rojas, h. a. (2017). *caracterización energética del edificio de ingenierías eléctrica, electrónica y de telecomunicaciones de la universidad industrial de santander aplicando la metodología del sistema de gestión integral de la energía*. bucaramanga: 2017.
- [15]. silva, o. a. (2012). *evaluación de las estrategias de confort visual y térmico establecidos para el edificio de ingeniería eléctrica* . bucaramanga: 2012.
- [16]. upme. (2024). *factores de emisión del sistema interconectado*. obtenido de https://docs.upme.gov.co/serviciociudadano/documents/proyectos_normativos/sopORTE_calculo_factor_de_emision_2024.pdf

Apéndices

Apéndice A. Drive con Apéndices elaborados

<https://drive.google.com/drive/folders/1vZ9QC-QxvKMu2IPTZbZ42ab5cqUQverw?usp=sharing>