



EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Evaluación de los efectos de la capa límite
atmosférica en el confort térmico de una casa con
torre de viento.**

presentada por

Ing. Héctor Vázquez Chávez

como requisito para la obtención del grado de
Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica

Director de tesis

Dra. Sara Lilia Moya Acosta

Codirector de tesis

Dra. Luisana Claudio Pachecano

Codirector de tesis

Dr. Jorge Antonio Ascencio Gutiérrez

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2026.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, 17/junio/2026

Oficio No. SAC/166/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

HÉCTOR VÁZQUEZ CHÁVEZ
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN INGENIERÍA MECÁNICA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"Evaluación de los efectos de la capa límite atmosférica en el confort térmico de una casa con torre de viento"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

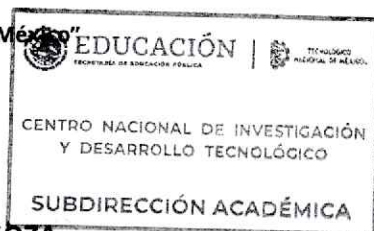
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Departamento de Ingeniería Mecánica
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico





Educación
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., 16/junio/2026

OFICIO No. DIM/121/2026

Asunto: Aceptación de documento de tesis

CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del C. Héctor Vázquez Chávez con número de control M24CE094, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"Evaluación de los efectos de la capa límite atmosférica en el confort térmico de una casa con torre de viento"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.


Dra. Sara Lilia Moya Acosta
Director de tesis


Dr. José María Rodríguez Lelis
Revisor 1


Dra. Luisana Claudio Pachecano
Director de tesis


Dr. Rafael Campos Amezcua
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 1408,
e-mail: dim_cenidet@tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx

DEDICATORIA

A mi esposa, Yaritza Bello, por todo su apoyo, motivación, amor y acompañamiento durante este camino. Sin ti no estaríamos aquí. Gracias por recordarme siempre que la copa está y estará llena. Hoy esa frase sigue teniendo el mismo sentido en mi vida. Gracias por caminar a mi lado, por creer en mí y por sostenerme en los momentos de mayor cansancio. Te amo.

A mi hijo, Bruno Damián, por el amor, la alegría y los momentos que hemos vivido juntos. Aún eres muy pequeño, pero eres muy inteligente, y espero que algún día puedas leer este proyecto y comprender por qué muchas veces no pude jugar contigo cuando pensabas que la computadora era mala. En realidad, este trabajo también me permitió valorar y disfrutar profundamente tus primeros años, porque cada esfuerzo tuvo sentido al verte crecer. Muchas veces te escuché repetir: “Concéntrate. Velocidad. Soy veloz. Un ganador, cuarenta y dos perdedores. Yo desayunos perdedores”. También decías: “Velocidad. Soy más que rápido, más que veloz. ¡Soy un rayo!”. Cada vez que me sentía cansado, recordaba tu carita y, sin saberlo, lograbas hacerme sentir como un rayo. Gracias por ser una de mis mayores motivaciones. Te amo.

A mis padres, María Elena Chávez Martínez y Lorenzo Vázquez Pérez, quienes siempre han estado apoyándonos y al pendiente de nosotros. Aunque hemos estado un poco lejos, quiero que sepan que valoro cada detalle, cada esfuerzo y todo lo que han hecho por mí. Gracias a su formación, valores y ejemplo, hoy soy el padre, esposo y profesionalista que soy. Este logro también es reflejo de su amor, sacrificio y confianza. Los amo.

A mi segunda familia Bello Albarran: mis suegros, Rocío Albarrán Abarca, Bernardo Bello Albarrán, mi Cuñada Sara Bello Albarran , D. Nicolas B.G., Diego García , por apoyarnos y motivarnos a alcanzar nuestros objetivos. Gracias por hacerme sentir en casa y por acompañarnos en este camino. El proceso no fue sencillo, pero su apoyo hizo más llevadera esta etapa. Este logro también es suyo.

A mi hermano Pablo Vazquez, mi cuñada Yessica Ocaña , mis sobrinitos hermosos Emiliano & Leo . Me mostraron que son unos guerreros y no debemos rendirnos y ser constantes. Gracias por siempre creer en mí. Los amo

A mis tíos y amigos, por su cariño, compañía y apoyo. Gracias por estar presentes en mi vida, por sus palabras de ánimo y por formar parte de los momentos importantes que me han permitido seguir adelante.

A la Dra. Sara Lilia Moya Acosta, por creer en mí desde aquella primera charla en la que, aun siendo yo un desconocido, me permitió conocerla y acercarme a su trabajo. Gracias por aceptarme en su grupo de investigación y por permitirme abordar una línea que por muchos años usted ha liderado. Agradezco profundamente la confianza, la orientación y la libertad que me brindó para desenvolverme, proponer ideas y desarrollar este proyecto.

A la Dra. Luisana, gracias por su apoyo durante esta etapa de posgrado, por su valiosa aportación estadística al proyecto y por su constante motivación. Siempre fue muy grato escuchar sus opiniones, incluso aquellas que comenzaban con su característica frase: “No es

regañó, pero...”. Gracias por cada consejo, observación y palabra de aliento, porque todas contribuyeron a fortalecer este trabajo y mi formación.

Al Dr. Jorge Ascencio, gracias por darme la oportunidad de aprender de usted, por brindarme su confianza desde el primer día y por darme mi lugar. Usted fue de los primeros en creer en mi idea y en mi perfil. Agradezco profundamente su apoyo, comunicación, tiempo y experiencia compartida. La vida nos dio una oportunidad más en estos últimos años, y hoy estamos por concluir esta etapa. Gracias por acompañar este proceso y por formar parte fundamental de este logro.

Con amor, respeto y gratitud, dedico esta tesis a quienes han sido parte esencial de mi vida personal y académica; a quienes me acompañan en el presente y a quienes, desde otro plano, siguen estando a nuestro lado.

Este trabajo no representa únicamente horas de estudio, mediciones, simulaciones y correcciones; representa también el sacrificio, amor, la paciencia, la confianza y el respaldo de las personas que creyeron en mí, incluso cuando el camino parecía más difícil.

DE TODO CORAZÓN, GRACIAS.

ESTE LOGRO TAMBIÉN LES PERTENECE.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI), anteriormente CONACYT, por el apoyo económico otorgado, el cual hizo posible la realización de este proyecto de investigación y mi formación durante el programa de maestría.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por brindarme la oportunidad de pertenecer a su comunidad académica, permitirme hacer uso de sus instalaciones y ofrecerme las condiciones necesarias para continuar con mi preparación académica y profesional.

A mi comité revisor, el Dr. José María Rodríguez Lelis y el Dr. Rafael Campos Amezcua, por el tiempo dedicado a la revisión de este trabajo, por sus valiosas observaciones, las cuales enriquecieron su contenido y por el apoyo brindado durante mi estancia en el CENIDET.

Al Dr. Erik Rosado Tamaris, al Dr. Efraín Sima Moo, a la Dra. Yvonne Chávez Chena y al Dr. Miguel Ángel Chagolla Aranda, por sus buenos consejos, por compartir sus conocimientos y experiencia. Por contribuir a mi formación académica durante mi estancia en el CENIDET.

A la Lic. Patricia Armas, por sus enseñanzas en el idioma inglés, por su apoyo, solidaridad y disposición para contribuir a mi desarrollo académico y personal. Agradezco profundamente su paciencia, orientación y compromiso con mi aprendizaje.

A la Sra. Rocío Salazar y a todo el equipo de trabajo del Departamento de Ingeniería Mecánica, por el apoyo brindado, la atención y el acompañamiento durante mi estancia. Su labor diaria es fundamental para que los estudiantes podamos contar con las instalaciones, el soporte y las condiciones necesarias para desarrollar nuestras actividades académicas y de investigación.

Al Dr. Marco Antonio Cruz Sandoval, al Dr. Iván García Kerdan y a los directivos del Tecnológico de Monterrey, por brindarme la oportunidad de desarrollarme profesionalmente en el Campus Santa Fe y por apoyarme durante el desarrollo de mi proyecto académico.

A mis compañeros y amigos “jefes” del laboratorio, Marco Antonio Cruz y Alfonso Iturbe, por brindarme su amistad, consejos y apoyo durante nuestra estancia laboral, así como por las experiencias compartidas dentro y fuera del ámbito profesional.

A la Lic. María de los Ángeles Sánchez Medrano y al Ing. Salvador Montiel García, quienes por más de catorce años han estado presentes en mi vida profesional y personal. Durante estos años han contribuido a mi formación como colaborador y como persona. Gracias por abrirme las puertas de su casa y de su familia, y por hacerme sentir parte de ella.

A mis amigos y compañeros del CENIDET: Ángel Aguilar, Iván Bonifacio Hernández, Santiago Ramírez Capote, Carlos Alberto Sosa, Hugo Coello, José Carrasco, Fernando Espinosa, Oscar Zagal Jiménez, Eleazar Aguilar Cayetano, Daniel Romero, Andrés

Rodríguez, Marte Beltrán, Brisa Atali y Emmanuel Sánchez, por su amistad, apoyo y compañía durante la maestría. Gracias por aceptarme, por las charlas compartidas, por los momentos de convivencia y por el apoyo en cada etapa, incluso en aquellas dudas académicas que parecían más difíciles de resolver que una simulación que no converge.

Finalmente, agradezco de manera especial a Doña Celia, quien ha sido parte importante de la vida cotidiana de muchas generaciones del CENIDET. Gracias por su apoyo, su amabilidad y su buen sazón, que también acompañaron este proceso académico.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABLAS	iv
NOMENCLATURA.....	v
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y CONTEXTO CIENTÍFICO DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.1 Contexto energético y climático	4
1.1.1 Cambio climático y consumo energético.....	4
1.1.2 Sobrecalentamiento urbano.....	5
1.1.3 Vivienda social en clima cálido.....	7
1.2 Problemática térmica en vivienda social	8
1.2.1 Ganancias térmicas en la envolvente.....	8
1.2.2 Persistencia térmica nocturna.....	9
1.2.3 Estratificación térmica interior.....	10
1.3 Ventilación	11
1.3.1 Principios de ventilación natural.....	11
1.3.2 Torres de viento.....	12
1.4 Influencia de la capa límite atmosférica en el entorno urbano	15
1.5 Evolución del enfoque de investigación.....	16
1.5.1 Fundamentación inicial.....	16
1.5.2 Desarrollo experimental.....	17
1.5.3 Integración de la modelación CFD.....	17
1.5.4 Reinterpretación física del sistema	17
1.6 Justificación	18
1.6.1 Justificación científica.....	18
1.6.2 Justificación técnica	18
1.6.3 Justificación social.....	19

1.7 Pregunta de investigación.....	19
1.8 Hipótesis	19
1.9 Objetivo general	19
1.10 Objetivos específicos.....	19
1.11 Alcances y limitaciones	20
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	21
2.1 Atmósfera terrestre	21
2.1.1 <i>Troposfera</i>	22
2.1.2 <i>Interacción superficie-atmósfera</i>	23
2.2 Capa límite atmosférica	23
2.2.1 <i>Capa límite atmosférica (ABL)</i>	23
2.2.2 <i>Subcapas atmosféricas</i>	24
2.2.3 <i>Perfil logarítmico del viento</i>	24
2.2.4 <i>Ley exponencial de Hellmann</i>	25
2.2.5 <i>Teoría de similitud de Monin–Obukhov (MOST)</i>	26
2.3 Rugosidad urbana y flujo cercano al suelo	28
2.3.1 <i>Subcapa urbana rugosa</i>	28
2.3.2 <i>Obstáculos urbanos</i>	29
2.3.3 <i>Canalización del viento</i>	29
2.3.4 <i>Turbulencia urbana</i>	30
2.3.5 <i>Efectos de estela</i>	31
2.4 Microclima urbano	31
2.4.1 <i>Isla térmica urbana</i>	31
2.4.2 <i>Acumulación térmica superficial</i>	32
2.4.3 <i>Disponibilidad de viento útil</i>	33
2.5 Fundamentos de transferencia de calor en recintos	34
2.5.1 <i>Intercambio térmico superficie–aire</i>	34
2.5.2 <i>Radiación térmica interior</i>	34
2.5.3 <i>Convección natural en superficies interiores</i>	36
2.5.4 <i>Cargas térmicas internas</i>	36
2.5.5 <i>Balance térmico total del recinto</i>	38
2.5.6 <i>Remoción de calor sensible mediante ventilación natural</i>	39
2.6 Carta bioclimática de Givoni.....	42
2.6.1 <i>Fundamento bioclimático</i>	43
2.7 Relación higrotérmica entre temperatura del aire y humedad relativa	43
2.7.1 <i>Recuperación de %HR / °C</i>	44

2.8 Fundamentos y configuración numérica para la modelación CFD	45
2.8.1 Convenciones de notación matemática	46
2.8.2 Revisión metodológica CFD en torres de viento y selección del modelo RANS	47
2.8.3 Dominio computacional, hipótesis y simplificaciones	49
2.8.4 Ecuaciones gobernantes del modelo CFD	50
2.8.4.1 Conservación de masa.....	51
2.8.4.2 Conservación de cantidad de movimiento: ecuaciones de Navier–Stokes.....	52
2.8.4.3 Conservación de energía.....	54
2.8.5 Tratamiento de la turbulencia y formulación RANS	56
2.8.6 Modelo $k - \epsilon$ Estandar.....	58
2.8.7 Modelo de radiación Surface-to-Surface	60
2.8.8 Método de volúmenes finitos	61
2.8.9 Acoplamiento presión–velocidad y esquemas numéricos	63
CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO, FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN	65
3.1 Caso de estudio	65
3.1.1 Ubicación geográfica	66
3.1.2 Características climáticas	67
3.1.3 Sistema constructivo.....	69
3.1.4 Distribución arquitectónica.....	70
3.2 Encuesta a habitantes del mismo condominio	71
3.3 Instrumentación experimental	74
3.3.1 Sensores IoT.....	74
3.3.2 Variables monitoreadas	75
3.3.3 Frecuencia de adquisición	75
3.3.4 Ubicación de sensores.....	75
3.4 Monitoreo con UAV	76
3.4.1 Plataforma UAV.....	77
3.4.2 Metodología de vuelo	78
3.4.3 Alturas de monitoreo	79
3.4.4 Procesamiento de datos.....	80
3.5 Termografía infrarroja cuantitativa.....	81
3.5.1 Cámara termográfica	82
3.5.2 Emisividad.....	83
3.5.3 Polígonos digitales.....	83
3.5.4 Temperatura superficial promedio y procesamiento termográfico en Python.....	84

3.6 Monitoreo higrotérmico.....	86
3.6.1 <i>Temperatura interior</i>	87
3.6.2 <i>Humedad relativa</i>	87
3.6.3 <i>Temperatura superficial</i>	87
3.6.4 <i>Variabilidad temporal</i>	87
3.7 Indicadores derivados.....	87
3.7.1 <i>Índice de calor</i>	87
3.7.2 <i>Déficit de presión de vapor</i>	88
3.7.3 <i>Estratificación térmica</i>	89
3.7.4 <i>Correlaciones térmicas</i>	89
3.8 Procesamiento estadístico.....	90
3.8.1 <i>Series temporales</i>	90
3.8.2 <i>Correlación de Pearson</i>	90
3.8.3 <i>Rosas de viento</i>	91
3.8.4 <i>Estadística circular</i>	91
3.9 Estimación de carga térmica en espacios habitacionales.....	92
3.9.1 <i>Definición de la condición de confort de referencia</i>	92
3.9.2 <i>Caracterización geométrica del recinto</i>	92
3.9.3 <i>Modelo de transferencia de calor superficie-aire</i>	93
3.9.4 <i>Estimación del coeficiente radiativo equivalente</i>	95
3.9.5 <i>Estimación del coeficiente convectivo interior</i>	96
3.9.6 <i>Integración del balance térmico y evaluación de la ventilación natural</i>	98
3.10 Modelo de carta bioclimática ajustada a Morelos.....	99
3.10.1 <i>Integración de datos monitoreados</i>	100
CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL.....	102
4.1 Integración de resultados experimentales.....	102
4.2 Monitoreo higrotérmico comparativo durante mayo.....	102
4.2.1 <i>Evolución conjunta de temperatura interior y exterior</i>	104
4.2.2 <i>Evolución conjunta de humedad relativa interior y exterior</i>	104
4.2.3 <i>Índice de Calor y Déficit de Presión de Vapor durante el periodo cálido</i>	105
4.2.4 <i>Diferenciales Interior–Exterior</i>	106
4.2.5 <i>Diferenciales Planta Alta–Planta Baja</i>	107
4.2.6 <i>Persistencia térmica y retardo de respuesta interior</i>	109
4.3 Evaluación bioclimática mediante carta de Givoni.....	111
4.3.1 <i>Carta bioclimática con datos exteriores monitoreados</i>	112
4.3.2 <i>Carta bioclimática con datos interiores monitoreados</i>	113

4.3.3 Comparación psicrométrica Interior–Exterior	113
4.3.4 Correlación higrotérmica del sistema estudiado	114
4.4 Termografía infrarroja y respuesta térmica de la envolvente	115
4.4.1 Superficies críticas de la envolvente	116
4.4.2 Resultados de Temperatura superficial promedio por polígonos digitales, 17 de mayo 7 pm.....	116
4.4.3 Evolución térmica superficial en días críticos	118
4.5 Caracterización del viento y disponibilidad de ventilación natural.....	120
4.5.1 Velocidad y dirección del viento por horario.....	121
4.5.2 Perfil vertical del viento hasta 120 m.....	123
4.5.3 Monitoreo simultáneo a diferentes alturas.....	125
4.5.4 Canalización urbana y flujo cercano a la vivienda.....	130
4.5.5 Viento disponible y escenario favorable.	131
4.6 Memoria térmica y estimación física de cargas en la envolvente	132
4.6.1 Carga total por envolvente.....	133
4.6.2 Caso real a las 19:00 en sitio.....	136
CAPÍTULO 5. MODELACIÓN CFD Y RESULTADOS NUMÉRICOS	138
Integración de la evidencia experimental en el modelo CFD.....	138
5.1 Síntesis del modelo físico y numérico.....	139
5.2 Escenarios de simulación CFD.....	140
5.3 Geometría computacional y dominio de aire interior.....	140
5.4 Condiciones de frontera derivadas del monitoreo experimental	143
5.5 Estudio de independencia de malla y configuración numérica.....	146
5.6 Validación CFD del caso base.....	149
5.7 Resultados del caso base sin torre.	150
5.7.1 Distribución de temperatura	150
5.7.2 Campo de velocidad interior.....	151
5.8 Resultados del escenario con torre de viento.....	153
5.8.1 Distribución de temperatura con torre.....	153
5.8.2 Campo de velocidad con torre	156
5.8.3 Trayectorias de flujo y energía cinética turbulenta	158
5.9 Alcances y limitaciones del sistema pasivo simulado	160
5.9.1 Análisis Bajo estándar ASHRAE 55-2023.....	161
5.9.2 Análisis de reducción térmica bajo criterios bioclimáticos: Carta de Givoni	162
CAPÍTULO 6. DISCUSIONES DE RESULTADOS	165

6.1 Relación entre la capa límite atmosférica y el comportamiento térmico de la vivienda	165
6.2 Influencia de la envolvente en la acumulación térmica interior	165
6.3 Interpretación física del efecto de la torre de viento	166
6.4 Alcances reales de la estrategia pasiva evaluada	166
6.5 Implicaciones para vivienda social en clima cálido subhúmedo	166
6.6 Síntesis general de la discusión	167
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	168
7.1 Conclusiones generales	168
7.2 Aportaciones científicas	170
7.3 Limitaciones del estudio	170
7.4 Recomendaciones a trabajos futuros	170
REFERENCIAS	172

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. 1. DEMANDA ENERGÉTICA GLOBAL ASOCIADA AL ACONDICIONAMIENTO TÉRMICO DE EDIFICACIONES. FUENTE: ELABORADO POR STATISTA CON DATOS DE INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA, 2018)	5
FIGURA 1. 2. PERFIL CONCEPTUAL DE ISLA TÉRMICA URBANA. (OKE, 1982).....	6
. FIGURA 1. 3 EFECTO DE ISLA DE CALOR URBANA Y SU INFLUENCIA SOBRE EL MICROCLIMA URBANO.	7
FIGURA 1. 4. DIFERENCIAL DE TEMPERATURA SUPERFICIALES EN TECHO , SUPERFICIES CON VARIACIÓN DE COLOR.	9
FIGURA 1. 5. ESTRATIFICACIÓN TÉRMICA EN UN ESPACIO CERRADO GENERADA POR EFECTOS DE CONVECCIÓN NATURAL Y FLOTACIÓN TÉRMICA.....	10
FIGURA 1. 6. PRINCIPIO DE VENTILACIÓN Y EXTRACCIÓN DE AIRE EN UNA TORRE DE VIENTO PERSA.....	12
FIGURA 1. 7. INTEGRACIÓN DE TORRE DE VIENTO (WIND CATCHER) Y SISTEMA SUBTERRÁNEO DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO MEDIANTE QANAT EN ARQUITECTURA TRADICIONAL PERSA.	13
FIGURA 1. 8. ANÁLISIS CONTEMPORÁNEO DE TECNOLOGÍAS PASIVAS INTEGRADAS A TORRES DE VIENTO.	14
FIGURA 1. 9. MODELO DE EXPERIMENTACIÓN, UBICADO EN CENIDET, MÉXICO.	14
FIGURA 2. 1 ESQUEMA VERTICAL DE LAS CAPAS ATMOSFÉRICAS.	22
FIGURA 2. 2. PERFIL VERTICAL SIMPLIFICADO DE LA TROPOSFERA.	22
FIGURA 2. 3. ESTRUCTURA DE LA CAPA LÍMITE Y CAPA SUPERFICIAL. ((FUENTE STULL 1988)......	24
FIGURA 2. 4. PERFIL LOGARÍTMICO VERTICAL DE VELOCIDAD DEL VIENTO BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL.....	25
FIGURA 2. 5. REGÍMENES DE ESTABILIDAD ATMOSFÉRICA SEGÚN LA TEORÍA DE SIMILITUD DE MONIN–OBUKHOV (MOST) Y SU INFLUENCIA SOBRE LA MEZCLA TURBULENTA Y EL PERFIL VERTICAL DEL VIENTO EN ENTORNOS URBANOS.....	27
FIGURA 2. 6. COMPARACIÓN CONCEPTUAL ENTRE EL PERFIL LOGARÍTMICO IDEALIZADO DE MOST Y EL PERFIL DE VIENTO OBSERVADO DENTRO DE LA SUBCAPA RUGOSA URBANA.	28
FIGURA 2. 7. REPRESENTACIÓN DE CAPA RUGOSA. ADAPTADA DE (Oke, 1987)	29
FIGURA 2. 8. EJEMPLO DE CANALIZACIONES URBANAS, PROPUESTO POR Oke, T.R	30
FIGURA 2. 9. ESQUEMA DE COMPORTAMIENTO DE EFECTO ESTELA EN CONTORNO URBANO	31
FIGURA 2. 10. INTENSIDAD ESPACIAL DE LA ISLA DE CALOR URBANA (ICU) EN LA MEGALÓPOLIS MÉXICO DURANTE EL PERIODO 1950–2020.	32
FIGURA 3. 1. VISTA AÉREA DEL SEGMENTO NORTE DEL FRACCIONAMIENTO EN EL CUAL SE UBICA EL CASO DE ESTUDIO	66
FIGURA 3. 2. UBICACIÓN GEOGRÁFICA Y ORIENTACIÓN DE LA CASA DE ESTUDIO. VISTA FACHADA PRINCIPAL ORIENTACIÓN NORMAL 160°	67
FIGURA 3. 3. TIPO DE CLIMA EN EL ESTADO DE MORELOS. FUENTE: CINPRO CON INFORMACIÓN DE INEGI (2013).BASE HISTÓRICA.....	67
FIGURA 3. 4. REPORTES CLIMÁTICOS DURANTE OLA CALOR 2026. MORELOS.	68
FIGURA 3. 5. SIMULACIÓN DE TEMPERATURA NIVEL SUPERFICIE, SOFTWARE AUTODESK FORMA. BASE COPERNICUS & ERAS	69
FIGURA 3. 6 FACHADA PRINCIPAL DEL PROTOTIPO HABITACIONAL TIPO DÚPLEX DE INTERÉS SOCIAL CONSIDERADO COMO CASO DE ESTUDIO.....	70
.FIGURA 3. 7. DISTRIBUCIÓN DE CASA ANALIZADA. IZQUIERDA: PLANTA BAJA. DERECHA: PLANTA ALTA.....	71
FIGURA 3. 8. PERCEPCIÓN TÉRMICA DE HABITANTES DEL CONJUNTO HABITACIONAL. MESES IDENTIFICADOS COMO MÁS CALUROSOS DENTRO DE LA VIVIENDA.	72
FIGURA 3. 9. PERCEPCIÓN TÉRMICA DE HABITANTES DEL CONJUNTO HABITACIONAL. HORARIO EN QUE SE PERCIBE MAYOR CALOR.	72
FIGURA 3. 10. PERCEPCIÓN TÉRMICA DE HABITANTES DEL CONJUNTO HABITACIONAL. INTENSIDAD PERCIBIDA DEL CALOR INTERIOR	73
FIGURA 3. 11. PERCEPCIÓN TÉRMICA DE HABITANTES DEL CONJUNTO HABITACIONAL. ZONA DE LA VIVIENDA CON MAYOR ACUMULACIÓN TÉRMICA.....	73
FIGURA 3. 12. PERCEPCIÓN TÉRMICA DE HABITANTES DEL CONJUNTO HABITACIONAL. SITUACIONES EXPERIMENTADAS DURANTE EL PERIODO MÁS CALUROSO.....	74
FIGURA 3. 13. UBICACIÓN DE SENSORES. SALA, CUARTO PB, ESCALERAS, CUARTO CRÍTICO PA, CUARTO B PA.....	76

FIGURA 3. 14. UAV UTILIZADO DJI MAVIC AIR 2.....	77
FIGURA 3. 15. INTERFAZ MONITOREO DE VIENTO -AIRDATA APP.	78
FIGURA 3. 16. VISTA DE ESTACIÓN METEOROLÓGICA CENIDET MIM.	78
FIGURA 3. 17. RENDER DE PLANEACIÓN DE ALTURAS DE MONITOREO.	80
FIGURA 3. 18. RENDER DE PLANEACIÓN PARA VUELO A 120 M .IZQUIERDA PERFILES DE VIENTO TEÓRICOS.....	80
FIGURA 3. 19. EXPERIMENTO DE MORÓN ET AL. (2018) TERMOGRAFÍA Y RÉPLICA CON MODELACIÓN NUMÉRICA DE SUPERFICIES.	82
FIGURA 3. 20. CÁMARA TERMOGRÁFICA UTILIZADA.	82
FIGURA 3. 21. METODOLOGÍA DE POLÍGONOS APLICADA EN EL MONITOREO DE TEMPERATURA, RUIZ TORRES ET AL. (2019).	84
FIGURA 3. 22. FLUJO DE PROCESAMIENTO EN PYTHON PARA LA CONVERSIÓN DE IMÁGENES TERMOGRÁFICAS EN DATOS DE TEMPERATURA SUPERFICIAL PROMEDIO.	86
FIGURA 3. 23. CARTA BIOCLIMÁTICA BASE DE GIVONI AJUSTADA A LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE MORELOS. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA CON BASE EN GIVONI (1992, 1998), ASHRAE (2021) Y VÁZQUEZ-CHÁVEZ ET AL. (2026B).	100
FIGURA 4. 1. MONITOREO TEMPORAL DE TEMPERATURA DEL AIRE Y HUMEDAD RELATIVA DURANTE MAYO EN SENSOR EXTERIOR E INTERIORES DE LA VIVIENDA.....	103
FIGURA 4. 2. TEMPERATURA PROMEDIO DIARIA POR SENSOR DURANTE EL PERIODO DE MONITOREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	104
FIGURA 4. 3. HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO DIARIA POR SENSOR DURANTE EL PERIODO DE MONITOREO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.	105
FIGURA 4. 4. ÍNDICE DE CALOR PROMEDIO DIARIO POR SENSOR DURANTE MAYO..	106
FIGURA 4. 5. DIFERENCIAL DE TEMPERATURA INTERIOR–JARDÍN POR HORA DURANTE EL PERIODO DE MONITOREO.	107
FIGURA 4. 6. DIFERENCIAL DE TEMPERATURA PLANTA ALTA–PLANTA BAJA POR HORA DURANTE EL PERIODO DE MONITOREO..	108
FIGURA 4. 7. DIFERENCIAL DE HUMEDAD RELATIVA PLANTA ALTA–PLANTA BAJA POR HORA DURANTE EL PERIODO DE MONITOREO.	108
FIGURA 4. 8. DESFASE TÉRMICO E HIGROTÉRMICO INTERIOR–EXTERIOR MEDIANTE CORRELACIÓN POR RETRASO HORARIO.	109
FIGURA 4. 9. COMPARACIÓN HORARIA DE TEMPERATURA ENTRE EXTERIOR Y CUARTO CRÍTICO DEL SEGUNDO PISO PARA EL 17 DE MAYO.....	110
FIGURA 4. 10. COMPARACIÓN HORARIA DE HUMEDAD RELATIVA ENTRE EXTERIOR Y CUARTO CRÍTICO DEL SEGUNDO PISO PARA EL 17 DE MAYO.	110
FIGURA 4. 11. REGISTRO HORARIO DE TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL 17 DE MAYO PARA SENSOR EXTERIOR E INTERIORES DE LA VIVIENDA.....	111
FIGURA 4. 12. CARTA BIOCLIMÁTICA DE GIVONI PARA EL SENSOR EXTERIOR EN JARDÍN DURANTE EL 17 DE MAYO.....	112
FIGURA 4. 13. CARTA BIOCLIMÁTICA DE GIVONI PARA EL CUARTO CRÍTICO DEL SEGUNDO PISO DURANTE EL 17 DE MAYO.....	113
FIGURA 4. 14. CORRELACIÓN HIGROTÉRMICA DEL SISTEMA EXTERIOR E INTERIOR.	115
FIGURA 4. 15. LEVANTAMIENTO TERMOGRÁFICO- SUPERFICIE CRÍTICA EXTERNA E INTERNA.	116
FIGURA 4. 16. COMPARATIVA DE TEMPERATURAS DE SUPERFICIE TECHO EXTERIOR – INTERNO - MONITOREO 17 DE MAYO.	119
FIGURA 4. 17. COMPARATIVA DE TEMPERATURAS DE SUPERFICIE MURO ESTE -EXTERIOR – INTERNO - MONITOREO 17 DE MAYO.	119
FIGURA 4. 18. HORARIO DE VUELO, DURANTE MONITOREO DE MAYO.	120
FIGURA 4. 19. ROSA DE VIENTO GLOBAL PARA LA CONDICIÓN MATUTINA (07:00 H): ESTABILIZACIÓN ATMOSFÉRICA Y BRISA DE VALLE..	121
FIGURA 4. 20. ROSA DE VIENTO GLOBAL PARA LA CONDICIÓN DIURNA (14:00 H): MÁXIMA CARGA TÉRMICA EXTERIOR Y CIRCULACIÓN TÉRMICA URBANA.	122
FIGURA 4. 21. ROSA DE VIENTO GLOBAL PARA LA CONDICIÓN VESPERTINA–NOCTURNA (19:00 H): TRANSICIÓN ATMOSFÉRICA Y MAYOR VARIABILIDAD DIRECCIONAL.	122
FIGURA 4. 22. PERFIL VERTICAL PROMEDIO DE VELOCIDAD DEL VIENTO ENTRE 1 Y 120 M DE ALTURA.	123
FIGURA 4. 23. PERFIL VERTICAL PROMEDIO DE DIRECCIÓN DEL VIENTO ENTRE 1 Y 120 M PARA LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS MONITOREADAS.....	124
FIGURA 4. 24. VARIABILIDAD DIRECCIONAL DEL VIENTO PARA LAS TRES CONDICIONES ATMOSFÉRICAS EVALUADAS.....	124
FIGURA 4. 25. ROSAS DE VIENTO NOCTURNAS OBTENIDAS SIMULTÁNEAMENTE A 1.2 M, 4.5 M Y 11.0 M DE ALTURA.....	126

FIGURA 4. 26. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA DIRECCIÓN DEL VIENTO DURANTE EL PERIODO NOCTURNO.	127
FIGURA 4. 27. HISTOGRAMAS DE VELOCIDAD DEL VIENTO PARA LAS TRES ALTURAS MONITOREADAS.	128
FIGURA 4. 28. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LA VELOCIDAD DEL VIENTO DURANTE EL PERIODO NOCTURNO EVALUADO.....	129
FIGURA 4. 29. IDENTIFICACIÓN DE VIENTO EFECTIVO NORMAL A LAS ABERTURAS DE LA VIVIENDA Y SELECCIÓN DE CONDICIONES DE FRONTERA PARA SIMULACIÓN CFD.....	132
FIGURA 5. 1. DISEÑO MODELO BASE-DOMINIO SOLIDO (MUROS).....	141
FIGURA 5. 2. DISEÑO MODELO BASE-DOMINIO FLUIDO AIRE	142
FIGURA 5. 3. DISEÑO MODELO BASE + TORRE DE VIENTO-DOMINIO SOLIDO (MUROS).....	142
FIGURA 5. 4. DISEÑO MODELO BASE+ TORRE DE VIENTO -DOMINIO FLUIDO AIRE.	143
FIGURA 5. 5. CONDICIONES DE FRONTERA -VIENTO 17 MAYO 7 PM.	145
FIGURA 5. 6. CONDICIONES DE FRONTERA, TEMPERATURA PROMEDIO DE PROCESAMIENTO DE SUPERFICIE- 17 MAYO 2025. ...	146
FIGURA 5. 7. VISUALIZACIÓN DE ESTRUCTURA DE MALLADO.....	147
FIGURA 5. 8. CRITERIOS DE EVALUACIÓN EN LA CALIDAD DE MALLA.	148
FIGURA 5. 9. VISTA ESTE DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE LA SIMULACIÓN BASE , MALLA 0.09.	150
FIGURA 5. 10. VISTA FRONTAL (CUARTO CRITICO-SALA) DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE LA SIMULACIÓN BASE. 0.09M...	150
FIGURA 5. 11. CORTE (CUARTO CRITICO-SALA- ESCALERA) DE VELOCIDAD DE LA SIMULACIÓN BASE. 0.09M	151
FIGURA 5. 12. CORTE MEDIO PA. VELOCIDAD DE LA SIMULACIÓN BASE. 0.09M	152
FIGURA 5. 13. CORTE MEDIO PB. VELOCIDAD DE LA SIMULACIÓN BASE. 0.09M.....	152
FIGURA 5. 14. MODELO ISOMÉTRICO DE TEMPERATURA DEL CASO BASE.....	152
FIGURA 5. 15. VISTA ESTE DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE , MALLA 0.09.....	154
FIGURA 5. 16. VISTA FRONTAL (CUARTO CRITICO-SALA) DEL PERFIL DE TEMPERATURA DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE. 0.09M.	155
FIGURA 5. 17. CORTE (CUARTO CRITICO-SALA- ESCALERA) DE TEMPERATURA DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE. 0.09M. ..	155
FIGURA 5. 18. CORTE MEDIO PA. TEMPERATURA DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE DE VIENTO. 0.09M.....	156
FIGURA 5. 19. CORTE MEDIO PB. TEMPERATURA DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE DE VIENTO. 0.09M.....	156
FIGURA 5. 20. CORTE MEDIO PA-ESCALERAS. MURO ESTE . VELOCIDAD DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE. 0.09M.....	157
FIGURA 5. 21. CORTE MEDIO PA-ESCALERAS . VELOCIDAD DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE. 0.09M	157
FIGURA 5. 22. CORTE MEDIO PA. TURBULENCIA DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE. 0.09M.	158
FIGURA 5. 23. VISTA ESTE DEL PERFIL DE TURBULENCIA DE LA SIMULACIÓN BASE + TORRE , MALLA 0.09.....	159
FIGURA 5. 24. MODELO ISOMÉTRICO DE TURBULENCIA DEL CASO BASE + TORRE DE VIENTO.	159
FIGURA 5. 25. MODELO ISOMÉTRICO DE TEMPERATURA DEL CASO BASE + TORRE DE VIENTO.	160
FIGURA 5. 26. ESTIMACIÓN DE CONFORT MEDIANTE CBE-THERMAL COMFORT TOOL. 1) ESTIMACIÓN DE CASO BASE. 2) ESTIMACIÓN DE BASE + TORRE DE VIENTO.	162
FIGURA 5. 27. DISTRIBUCIÓN DE CONDICIONES HIGROTÉRMICAS DEL CASO CRÍTICO DE ANÁLISIS, SIN TORRE Y CON TORRE DE VIENTO	163
FIGURA 5. 28. ACERCAMIENTO DE FIGURA 5.27 - COMPORTAMIENTO HIGROTÉRMICAS MODELO BASE Y TORRE DE VIENTO. .	163

LISTA DE TABLAS

TABLA 3. 1. RELACIÓN DE PÍXEL POR CADA SUPERFICIE DEL CASO DE ESTUDIO.....	85
TABLA 3. 2. CARACTERÍSTICAS DE SUPERFICIES DE CASO DE ESTUDIO. ..	93
TABLA 3. 3. ZONAS BIOCLIMÁTICAS , ESTABLECIDAS PARA LAS CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DE MORELOS, MEX.....	100
TABLA 4. 1. RELACIÓN ENTRE TEMPERATURA DEL AIRE Y HR POR SENSOR DURANTE E.	115
TABLA 4. 2. SÍNTESIS DE SUPERFICIES TERMOGRÁFICAS SEGMENTADAS Y TEMPERATURAS SUPERFICIALES PROM. A LAS 19:00 H.....	118
TABLA 5. 1. SETUP DE CONDICIONES DE FRONTERA.	144
TABLA 5. 2. ESTADÍSTICAS DE LAS MALLAS UTILIZADAS.	148
TABLA 5. 3. EVALUACIÓN DE CONSERVACIÓN DE MASA EN MALLA DE 0.08, 0.09 Y 0.1 PARA ELECCIÓN DE MALLA ÓPTIMA.	148
TABLA 5. 4. RESULTADOS DE VARIABLES DE INTERÉS PARA INDEPENDENCIA DE MALLA.	149
TABLA 5. 5. TEMPERATURAS SIMULADAS DE TRES MALLAS SELECCIONADAS.	149
TABLA 5. 6. COMPARATIVA DE TEMPERATURAS MONITOREADAS 17 DE MAYO Y TEMPERATURAS DE SIMULACIÓN BASE.	149
TABLA 5. 7. RESULTADOS DE SIMULACIÓN BASE + TORRE DE VIENTO Y COMPARATIVA CASOS MONITOREADOS Y BASE SIMULADA.	153
TABLA 5. 8. TEMPERATURAS Y VARIABLES NECESARIAS PARA ESTIMACIÓN DE CONFORT, MEDIANTE ASHRAE 55- CBE THERMAL COMFORT TOOL.	161

NOMENCLATURA

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
ABL	Atmospheric Boundary Layer / Capa límite atmosférica
CFD	Computational Fluid Dynamics / Dinámica de fluidos computacional
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning
HR	Humedad relativa
MAE	Mean Absolute Error / Error absoluto medio
MAPE	Mean Absolute Percentage Error / Error porcentual absoluto medio
PA	Planta alta
PB	Planta baja
PMV	Predicted Mean Vote / Voto medio previsto
PPD	Predicted Percentage of Dissatisfied / Porcentaje previsto de insatisfechos
PRESTO!	Pressure Staggering Option
QIRT	Quantitative Infrared Thermography / Termografía infrarroja cuantitativa
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RMSE	Root Mean Square Error / Raíz del error cuadrático medio
ROI	Region of Interest / Región de interés
S2S	Surface-to-Surface Radiation
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
UAV	Unmanned Aerial Vehicle / Vehículo aéreo no tripulad

UNIDADES

Unidad	Significado
$^{\circ}C$	Grado Celsius
$\frac{clo}{kg}$	Unidad de aislamiento térmico de la vestimenta
$\frac{J}{kg}$	Joule por kilogramo
$\frac{J}{kgK}$	Joule por kilogramo Kelvin
$\frac{K}{kg}$	Kelvin
$\frac{m^3}{kg}$	Kilogramo por metro cúbico
$\frac{m}{kg}$	Kilopascal
$\frac{m^2}{m^2}$	Metro
$\frac{m^2}{m^2}$	Metro cuadrado
$\frac{s}{m^2}$	Metro cuadrado por segundo
$\frac{s^2}{m^2}$	Metro cuadrado por segundo cuadrado
$\frac{s^3}{m^2}$	Metro cuadrado por segundo cúbico
$\frac{s^3}{m}$	Metro por segundo
$\frac{s}{m}$	Metro por segundo cuadrado
$\frac{met}{Pa}$	Unidad de tasa metabólica
Pa	Pascal
$Pa \cdot s$	Pascal segundo

s	Segundo
$\frac{W}{W}$	Watt
$\frac{mK}{W}$	Watt por metro Kelvin
$\frac{m^2}{W}$	Watt por metro cuadrado
$\frac{m^2K}{W}$	Watt por metro cuadrado Kelvin
$\frac{m^2K^4}{W}$	Watt por metro cuadrado Kelvin a la cuarta potencia
$\frac{m^3}{W}$	Watt por metro cúbico
$\frac{\%}{K}$	Porcentaje
$\frac{1}{K}$	Inverso de Kelvin

LETRAS

Símbolo	Definición	Unidad
A_i	Área de la superficie i	m^2
c_p	Calor específico a presión constante	$\frac{J}{kgK}$
C_o	Constante empírica dependiente de la orientación de la superficie	Según correlación
C_{μ}	Constante o función del modelo de turbulencia	Adimensional
e_i	Error térmico puntual	$^{\circ}C$
$ e_i $	Error absoluto puntual	$^{\circ}C$
f_{cl}	Factor de área de la ropa	Adimensional
$\vec{g}$	Vector de aceleración gravitacional	$\frac{m}{s^2}$
g_y	Componente vertical de la gravedad en el eje y	$\frac{m}{s^2}$
G_b	Producción de turbulencia por flotación	Según formulación
G_k	Producción de energía cinética turbulenta por gradientes de velocidad	Según formulación
h	Entalpía específica	$\frac{J}{kg}$
$h_{c,i}$	Coefficiente convectivo interior de la superficie i	$\frac{W}{m^2K}$
$h_{r,i}$	Coefficiente radiativo equivalente interior de la superficie i	$\frac{W}{m^2K}$
$h_{t,i}$	Coefficiente total interior de transferencia de calor	$\frac{W}{m^2K}$
I_{cl}	Aislamiento térmico de la vestimenta	clo
k	Energía cinética turbulenta	$\frac{m^2}{s^2}$
k_{ef}	Conductividad térmica efectiva	$\frac{W}{mK}$
M	Tasa metabólica	met
n	Número de puntos de comparación	Adimensional
n_o	Exponente empírico dependiente de la orientación	Adimensional
o	Orientación o condición térmica de la superficie	Adimensional
p	Presión estática	Pa

Símbolo	Definición	Unidad	Símbolo	Definición	Unidad
p_a	Presión parcial de vapor de agua	$Pao\ kPa$	$T_{s,max}$	Temperatura superficial máxima dentro de una región de interés	$^{\circ}C$
$p_{r,out}$	Presión definida en la frontera de salida	Pa	$T_{s,medida}$	Temperatura superficial medida experimentalmente	$^{\circ}C$
p^n	Presión de la iteración previa	Pa	$T_{s,min}$	Temperatura superficial mínima dentro de una región de interés	$^{\circ}C$
p'	Corrección de presión	Pa	$T_{s,promedio}$	Temperatura superficial promedio dentro de una región de interés	$^{\circ}C$
q''	Flujo de calor por unidad de área	$\frac{W}{m^2}$	u	Componente de velocidad en el eje x	$\frac{m}{s}$
$q''_{r,i}$	Flujo radiativo neto por unidad de área de la superficie i	$\frac{W}{m^2}$	u'_i	Fluctuación turbulenta de velocidad	$\frac{m}{s}$
$Q_{s-a,i}$	Carga térmica asociada a la superficie i	W	u_{τ}	Velocidad de fricción	$\frac{m}{s}$
$\dot{Q}_{conv}$	Transferencia de calor convectiva	W	v	Componente de velocidad en el eje y	$\frac{m}{s}$
$\dot{Q}_{envolvente}$	Carga térmica aportada por la envolvente	W	v_a	Velocidad del aire	$\frac{m}{s}$
$\dot{Q}_{internas}$	Cargas internas generadas por ocupantes, iluminación u otros equipos	W	$\vec{V}$	Vector velocidad del aire	$\frac{m}{s}$
$\dot{Q}_{rad}$	Transferencia de calor radiativa	W	$\vec{V}^*$	Velocidad estimada	$\frac{m}{s}$
$\dot{Q}_{s-a,i}$	Potencia térmica transferida desde la superficie i hacia el aire interior	W	$\vec{V}^{n+1}$	Velocidad corregida	$\frac{m}{s}$
$\dot{Q}_{total}$	Carga térmica total del recinto	W	w	Componente de velocidad en el eje z	$\frac{m}{s}$
$\vec{r}$	Vector desde el centroide de la celda aguas arriba hacia la cara	m	W	Trabajo mecánico externo del ocupante	$\frac{W}{m^2}$
S_h	Término fuente de energía	$\frac{W}{m^3}$	Y_M	Contribución por efectos de compresibilidad	Según formulación
S_k	Término fuente de la ecuación de k	Según formulación	y	Distancia normal desde la pared	m
S_T	Término fuente térmico	$\frac{W}{m^3}$	y^+	Distancia adimensional a la pared	Adimensional
S_{ε}	Término fuente de la ecuación de ε	Según formulación			
t	Tiempo	s			
T	Temperatura del aire	K o $^{\circ}C$			
T_0	Temperatura de operación o referencia para Boussinesq	K			
T_a	Temperatura del aire	$^{\circ}C$			
$T_{CFD,i}$	Temperatura simulada mediante CFD en el punto i	$^{\circ}C$			
$T_{exp,i}$	Temperatura experimental en el punto i	$^{\circ}C$			
$T_{\Gamma wall}$	Temperatura impuesta en las paredes del dominio	$^{\circ}C$ o K			
T_{op}	Temperatura operativa	$^{\circ}C$			
T_{ref}	Temperatura de referencia de confort o setpoint	$^{\circ}C$			
$T_{ref,K}$	Temperatura de referencia convertida a escala absoluta	K			
$T_{r,i,K}$	Temperatura radiativa efectiva del entorno interior	K			
T_{rm}	Temperatura media radiante	$^{\circ}C$			
T_s	Temperatura superficial medida mediante termografía	$^{\circ}C$			
$T_{s,i}$	Temperatura superficial interior medida de la superficie i	$^{\circ}C$			
$T_{s,i,K}$	Temperatura superficial interior absoluta de la superficie i	K			

RESUMEN

Esta investigación evalúa los efectos de la capa límite atmosférica urbana sobre el comportamiento térmico e higrotérmico de una vivienda de interés social con torre de viento ubicada en Emiliano Zapata, Morelos, México. El estudio parte de la problemática de sobrecalentamiento en vivienda social de clima cálido subhúmedo, donde la acumulación térmica de la envolvente, la persistencia nocturna y la baja disponibilidad de viento útil limitan la efectividad de la ventilación natural. La metodología integró monitoreo higrotérmico continuo, encuesta de percepción térmica, caracterización del viento mediante vehículo aéreo no tripulado, por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle, (UAV) y termografía infrarroja cuantitativa, carta bioclimática de Givoni, estimación física de carga térmica y modelación CFD en ANSYS Fluent. El modelo numérico se configuró con condiciones de frontera derivadas del monitoreo experimental, temperaturas superficiales obtenidas mediante termografía y una malla seleccionada de 0.09 m por su equilibrio entre calidad geométrica, estabilidad numérica y costo computacional. Los resultados mostraron que el viento cercano a la vivienda se encuentra condicionado por la rugosidad urbana, la canalización local y la variabilidad direccional; a 11 m de altura, la captación propuesta registró velocidades promedio cercanas a 1.50 m/s bajo condición favorable. La envolvente presentó temperaturas superficiales superiores a 60 °C en cubierta exterior y una carga sensible interior estimada de 6,499.56 W, dominada por la azotea. La simulación con torre de viento redujo la temperatura en planta alta, con disminuciones de 3.63 °C en la habitación crítica y 3.20 °C en la habitación secundaria. La temperatura operativa del punto crítico disminuyó de 39.15 °C a 34.96 °C; asimismo, el PMV pasó de 2.72 a 1.70 y el PPD de 97 % a 62 %. No obstante, el escenario con torre no alcanzó confort según ASHRAE 55-2023. Se concluye que la torre de viento modifica favorablemente el flujo interior y reduce la severidad térmica, pero su desempeño está limitado por la capa urbana rugosa y la carga térmica acumulada en la envolvente. Por ello, la hipótesis debe reinterpretarse: la torre no debe descartarse, aunque requiere estrategias pasivas complementarias para aproximar la vivienda a condiciones de confort.

Palabras clave: capa límite atmosférica; torre de viento; ventilación pasiva; monitoreo climático; vivienda social; confort térmico; CFD; termografía infrarroja; UAV, Higrotermia.

ABSTRACT

This research evaluates the effects of the urban atmospheric boundary layer on the thermal and aerodynamic behavior of a social housing dwelling with a wind tower located in Emiliano Zapata, Morelos, Mexico. The study addresses overheating in warm sub-humid social housing, where heat storage in the envelope, nocturnal thermal persistence, and limited useful wind availability restrict the effectiveness of natural ventilation. The methodology integrated continuous hygrothermal monitoring, thermal perception surveys, wind characterization using an unmanned aerial vehicle, quantitative infrared thermography, Givoni bioclimatic chart analysis, physical thermal-load estimation, and CFD modeling in ANSYS Fluent. The numerical model was configured using boundary conditions derived from experimental monitoring, surface temperatures obtained from thermography, and a 0.09 m mesh selected for its balance between geometric quality, numerical stability, and computational cost. The results showed that wind near the dwelling is conditioned by urban roughness, local channeling, and directional variability; at 11 m height, the proposed intake reached average velocities close to 1.50 m/s under favorable conditions. The envelope showed exterior roof surface temperatures above 60 °C and an estimated indoor sensible load of 6,499.56 W, dominated by the roof. The wind tower simulation reduced temperatures on the upper floor, with decreases of 3.63 °C in the critical room and 3.20 °C in the second upper-floor room. The operative temperature at the critical point decreased from 39.15 °C to 34.96 °C; similarly, PMV decreased from 2.72 to 1.70 and PPD from 97 % to 62 %. However, the wind tower scenario did not achieve comfort according to ASHRAE 55-2023. It is concluded that the wind tower favorably modifies indoor airflow and reduces thermal severity, but its performance is limited by the urban roughness layer and the thermal load stored in the envelope. Therefore, the hypothesis must be reinterpreted: the wind tower should not be discarded, but it requires complementary passive strategies to bring the dwelling closer to thermal comfort conditions.

Keywords: atmospheric boundary layer; wind tower; passive ventilation; social housing; thermal comfort; CFD; infrared thermography.

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas décadas, el incremento sostenido de la temperatura global y la transformación acelerada de las ciudades han modificado las condiciones bajo las cuales se evalúa el desempeño térmico de las edificaciones. El cambio climático ha intensificado la exposición de la población a periodos de calor más severos, mientras que el sector de la construcción continúa representando una proporción importante del consumo energético y de las emisiones asociadas a la operación de edificios [1], [2]. En este escenario, la alta demanda de acondicionamiento ambiente se ha convertido en uno de los componentes más relevantes del consumo energético en vivienda y edificios, especialmente en regiones cálidas donde el enfriamiento mecánico se utiliza como respuesta directa al discomfort térmico [3], [4].

El problema no se limita al aumento de la temperatura atmosférica global. En las ciudades, la sustitución de superficies naturales por materiales como concreto, asfalto, recubrimientos impermeables y cubiertas de alta absorción solar altera el balance energético superficial y genera condiciones microclimáticas distintas a las observadas en entornos rurales o periurbanos [5], [6]. La isla de calor urbana, asociada al almacenamiento de energía en materiales urbanos, la reducción de evapotranspiración y la liberación de calor antropogénico, favorece el incremento de temperatura exterior y reduce la capacidad de enfriamiento nocturno de las ciudades [7]. Estos procesos intensifican el sobrecalentamiento urbano y afectan de manera simultánea la demanda energética, la calidad ambiental exterior y la operación térmica de los espacios habitables [8]-[10].

En este contexto, la vivienda de interés social ubicada en clima cálido o cálido-subhúmedo constituye un caso particularmente sensible. Su diseño suele estar condicionado por criterios de bajo costo, rapidez constructiva, repetibilidad y alta densidad urbana, lo que puede limitar la incorporación de estrategias bioclimáticas desde la etapa de proyecto. El diseño con clima, el confort adaptativo y el análisis térmico de edificaciones han mostrado que las condiciones interiores no dependen únicamente de la temperatura del aire exterior, sino también de la orientación, la envolvente, la ventilación disponible, la humedad relativa, la radiación y las expectativas de adaptación de los ocupantes [11]-[15].

Uno de los mecanismos principales del sobrecalentamiento habitacional se relaciona con las ganancias térmicas de la envolvente. En viviendas construidas con sistemas de alta masa térmica, la cubierta y los muros expuestos pueden absorber energía solar durante el día y transferirla gradualmente hacia el interior mediante conducción, convección y radiación [16]. La magnitud de este proceso depende de las propiedades termo físicas y ópticas de los materiales, entre ellas la conductividad térmica, la capacidad calorífica, la absorción solar, la reflectancia y la emisividad. Por ello, el uso de superficies frías, recubrimientos reflectivos y materiales con mayor control de absorción solar se ha documentado como una estrategia capaz de reducir la temperatura superficial y la carga térmica asociada al enfriamiento de edificios [17], [18].

La acumulación energética en la envolvente también puede prolongar las condiciones de discomfort durante la noche. Cuando muros y cubiertas liberan calor después del periodo de máxima radiación, la vivienda puede mantener temperaturas interiores elevadas aun cuando el ambiente exterior comienza a descender. Este fenómeno resulta relevante porque coincide con horarios de descanso y puede afectar el bienestar de los ocupantes, la calidad del sueño y la percepción térmica interior [19].

En viviendas de dos niveles, además, el aire calentado por superficies interiores tiende a desplazarse hacia las zonas superiores por efecto de flotación térmica, generando estratificación y acumulación de calor en planta alta. Frente a esta problemática, las estrategias pasivas de acondicionamiento

térmico representan una alternativa de interés porque buscan mejorar la habitabilidad sin depender exclusivamente de sistemas mecánicos de enfriamiento. Entre estas estrategias se encuentran el control solar, la ventilación cruzada, el aprovechamiento de masa térmica con disipación nocturna, el enfriamiento evaporativo, el uso de patios, la vegetación y los dispositivos de captación o extracción de aire. La ventilación natural ocupa un papel central dentro de este conjunto, ya que permite renovar el aire interior, favorecer la remoción de calor sensible y modificar la distribución térmica del recinto mediante diferencias de presión inducidas por viento o por flotación térmica [20]-[22].

Dentro de las tecnologías pasivas de ventilación, las torres de viento han sido empleadas históricamente en regiones cálidas y áridas como dispositivos capaces de captar, conducir o extraer aire. Su funcionamiento tradicional no dependía únicamente de la geometría de la torre, sino de una integración arquitectónica más amplia que incluía muros masivos, patios, sombreamiento, agua, enfriamiento evaporativo y, en algunos casos, sistemas subterráneos de acondicionamiento. Desde el punto de vista físico, el desempeño de una torre de viento depende de la velocidad y dirección del viento disponible, la altura del dispositivo, la distribución de aberturas, los gradientes térmicos y la interacción con la edificación [23]-[25]. Revisiones recientes señalan que estos sistemas pueden mejorar su desempeño cuando se integran con otras tecnologías pasivas o de baja energía, por lo que no deben interpretarse como una solución universal ni aislada del clima de aplicación [26].

En México existen antecedentes relevantes sobre el estudio de torres de viento y ventilación pasiva en vivienda, particularmente en investigaciones desarrolladas en contextos cálidos y semiáridos. Estos trabajos han abordado la capacidad de las torres para inducir ventilación, la interacción con humidificación, la convección natural y forzada, así como el cumplimiento de condiciones de confort térmico bajo configuraciones experimentales y numéricas [27]-[29]. Sin embargo, trasladar el principio de funcionamiento de una torre de viento a viviendas urbanas de baja altura en clima cálido subhúmedo requiere considerar que el viento disponible puede ser menor, más variable y afectado por obstáculos urbanos que en los escenarios tradicionales o idealizados.

La disponibilidad real de viento útil está directamente relacionada con la capa límite atmosférica y con la rugosidad del entorno construido. En los primeros metros sobre la superficie, el flujo atmosférico no se comporta como una corriente uniforme, sino como un campo modificado por fricción, estabilidad térmica, obstáculos, canalización, estelas y turbulencia urbana [30], [31]. La forma urbana puede modificar la velocidad media, la dirección predominante y la intensidad de mezcla del viento cercano al suelo, generando diferencias importantes respecto a los registros obtenidos en estaciones meteorológicas regionales o en condiciones de frontera idealizadas [32], [33].

Por esta razón, el análisis de una estrategia pasiva de ventilación debe considerar no solo el dispositivo propuesto, sino también la atmósfera que realmente influye en su operación.

A partir de lo anterior, la presente investigación aborda el comportamiento térmico y aerodinámico de una vivienda de interés social ubicada en Emiliano Zapata, Morelos, incorporando una perspectiva multiescala que relaciona clima, microclima urbano, capa límite atmosférica, envolvente térmica y ventilación pasiva. El estudio parte de una problemática habitacional concreta: la presencia de sobrecalentamiento interior, acumulación térmica en planta alta, persistencia nocturna y baja disponibilidad de viento útil durante condiciones críticas. Bajo este enfoque, la torre de viento se analiza como una estrategia pasiva con potencial de modificar el flujo interior y reducir parcialmente la severidad térmica, pero no como una solución garantizada de confort.

Metodológicamente, el trabajo integra monitoreo higrotérmico, caracterización del viento local mediante vehículo aéreo no tripulado, termografía infrarroja cuantitativa, estimación de carga térmica y simulación mediante dinámica de fluidos computacional. La termografía infrarroja permite caracterizar la respuesta superficial de la envolvente y relacionar las temperaturas medidas con

procesos de acumulación y transferencia de calor [34], [35]. La modelación CFD, por su parte, permite representar el comportamiento del aire interior, la distribución de temperatura, las recirculaciones y la interacción entre condiciones de frontera experimentales y geometría del recinto, mediante formulaciones numéricas basadas en volúmenes finitos, modelos de turbulencia y configuraciones propias de ANSYS Fluent [36]-[40].

La aportación principal de esta tesis consiste en evaluar el desempeño de una torre de viento bajo condiciones reales de operación urbana, en lugar de asumir condiciones atmosféricas idealizadas. Para ello, se vinculan mediciones locales de viento, temperaturas superficiales de la envolvente, comportamiento higrotérmico interior y simulación CFD del volumen de aire. Esta integración permite analizar si la torre modifica la ventilación interior, si reduce la temperatura en zonas críticas y cuáles son los factores físicos que limitan su desempeño. De esta manera, la hipótesis inicial no se descarta en términos absolutos, sino que se reinterpreta: la torre puede generar un cambio en el comportamiento térmico y aerodinámico del recinto, pero su capacidad para aproximarse al confort depende de la disponibilidad real de viento, la carga térmica acumulada y las condiciones microclimáticas del entorno urbano.

En consecuencia, la investigación contribuye al análisis de estrategias pasivas para vivienda social en clima cálido subhúmedo mediante una aproximación que integra evidencia experimental y modelación numérica. Sus resultados permiten discutir el alcance real de las torres de viento en contextos urbanos de baja velocidad de viento, así como la necesidad de complementarlas con otras estrategias pasivas orientadas a reducir la carga térmica de la envolvente, mejorar la disipación nocturna y controlar el sobrecalentamiento interior. Bajo esta perspectiva, la tesis no plantea la torre de viento como una solución aislada, sino como un componente dentro de un sistema ambiental más amplio en el que atmósfera, ciudad, vivienda y envolvente determinan conjuntamente las condiciones de confort térmico.

CAPÍTULO 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y CONTEXTO CIENTÍFICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Contexto energético y climático

Durante las últimas décadas, el crecimiento de las ciudades y el incremento sostenido de la temperatura global han modificado de manera significativa las condiciones bajo las cuales operan las edificaciones. Este fenómeno ha generado nuevos retos relacionados con el consumo energético, el confort térmico y la habitabilidad de los espacios construidos, particularmente en regiones donde las altas temperaturas ambientales coinciden con procesos acelerados de urbanización (IPCC, 2021; UNEP, 2024).

Las ciudades concentran actualmente la mayor parte de la población mundial y continúan expandiéndose a un ritmo sin precedentes. Como consecuencia, extensas áreas naturales han sido sustituidas por infraestructura urbana compuesta principalmente por concreto, asfalto y otros materiales con elevada capacidad de almacenamiento térmico. Diversos estudios han señalado que los efectos del cambio climático y del crecimiento urbano no actúan de manera independiente. Por el contrario, ambos procesos se potencian mutuamente, favoreciendo fenómenos como el sobrecalentamiento urbano, la formación de islas de calor y la disminución de la capacidad de enfriamiento nocturno de las ciudades (Oke, 1982; Santamouris, 2013; Velasco & Roth, 2010).

Estas condiciones no solo incrementan el consumo energético de las edificaciones, sino que también afectan la calidad ambiental de los espacios habitables y reducen la efectividad de diversas estrategias pasivas de acondicionamiento térmico.

En este contexto, comprender la relación existente entre atmósfera, entorno urbano y comportamiento térmico de las edificaciones resulta fundamental para el desarrollo de soluciones energéticamente eficientes y adaptadas a las condiciones climáticas locales. Esta necesidad es particularmente importante en la vivienda social, donde las limitaciones económicas suelen restringir el acceso a sistemas mecánicos de climatización y donde las estrategias pasivas podrían representar una alternativa viable para mejorar las condiciones de habitabilidad y confort térmico.

A partir de este escenario general, los siguientes apartados abordan los principales procesos asociados al cambio climático, el consumo energético en edificaciones y el sobrecalentamiento urbano, con el propósito de establecer el contexto climático y energético que da origen a la presente investigación.

1.1.1 Cambio climático y consumo energético

El cambio climático ha pasado de ser una proyección científica para convertirse en una realidad observable en distintas regiones del planeta. Durante las últimas décadas se ha documentado un incremento sostenido de la temperatura media global, acompañado por modificaciones en los patrones de precipitación, cambios en la frecuencia de eventos climáticos extremos y alteraciones en diversos sistemas ambientales (IPCC, 2021). Aunque estos fenómenos poseen una escala global, sus efectos se manifiestan de manera particular en las ciudades, donde la concentración de población, infraestructura y actividades económicas incrementa la vulnerabilidad frente al aumento de las temperaturas.

En este contexto, el sector energético desempeña un papel central. Históricamente, el desarrollo económico y urbano ha estado asociado a un incremento progresivo en el consumo de energía,

principalmente a partir del uso de combustibles fósiles. Como consecuencia, las emisiones derivadas de la generación eléctrica, el transporte, la industria y la operación de edificios han contribuido significativamente al aumento de la concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (IPCC, 2021; International Energy Agency [IEA], 2022).

De acuerdo con la International Energy Agency (2022) y el United Nations Environment Programme [UNEP] (2023), los edificios consumen aproximadamente una tercera parte de la energía final utilizada globalmente y generan una proporción importante de las emisiones asociadas al sector energético, relación que se sintetiza en la distribución de la demanda energética global (Figura 1.1).

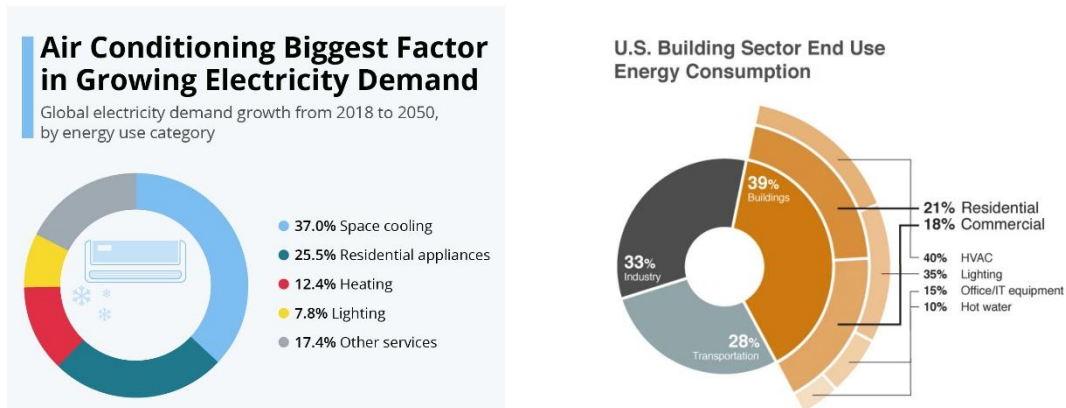


Figura 1.1. Demanda energética global asociada al acondicionamiento térmico de edificaciones. Fuente: Elaborado por Statista con datos de International Energy Agency (IEA, 2018)

Pérez-Lombard, Ortiz y Pout (2008) señalan que los sistemas de calefacción, ventilación y aire acondicionado constituyen una de las principales cargas energéticas en edificios residenciales y comerciales. Esta tendencia se ha intensificado conforme aumenta la temperatura ambiental y se incrementa la demanda de confort térmico por parte de los usuarios. En consecuencia, el enfriamiento de espacios interiores se ha convertido en uno de los segmentos de mayor crecimiento dentro del consumo energético mundial, especialmente en países localizados en zonas cálidas y en ciudades con procesos acelerados de urbanización.

Bajo este escenario, la búsqueda de soluciones pasivas capaces de reducir la dependencia de sistemas mecánicos de enfriamiento adquiere una importancia creciente. Estrategias como el aprovechamiento de la ventilación natural, el diseño bioclimático, el control de ganancias solares y la mejora de la envolvente térmica han sido identificadas como alternativas viables para disminuir el consumo energético y mejorar las condiciones de habitabilidad en edificaciones localizadas en climas cálidos (Givoni, 1998; Olgyay, 2015).

Por lo tanto, comprender la relación existente entre cambio climático, consumo energético y desempeño térmico de las edificaciones constituye un paso fundamental para el desarrollo de estrategias pasivas adaptadas a las condiciones climáticas actuales y futuras.

1.1.2 Sobre calentamiento urbano

El crecimiento acelerado de las ciudades durante las últimas décadas ha transformado significativamente la interacción entre la superficie terrestre y la atmósfera. La sustitución progresiva de áreas naturales por edificaciones, vialidades y superficies impermeables ha modificado los mecanismos de intercambio de energía, favoreciendo la acumulación de calor en los entornos urbanos

y dando origen a fenómenos de sobrecalentamiento que afectan tanto al ambiente exterior como a las edificaciones (Oke, 1987; Arnfield, 2003).

El sobrecalentamiento urbano se manifiesta cuando las temperaturas registradas dentro de una ciudad son superiores a las observadas en áreas rurales o periurbanas cercanas. Este comportamiento se encuentra asociado a diversos factores, entre los que destacan la reducción de cobertura vegetal, el aumento de superficies con alta capacidad de almacenamiento térmico, la disminución de los procesos de enfriamiento por evapotranspiración y la liberación de calor antropogénico derivado de actividades humanas, transporte y consumo energético (Oke, 1982; Santamouris, 2013). Estos factores configuran el perfil térmico característico de la isla de calor urbana, con temperaturas que aumentan progresivamente desde las áreas rurales hacia el núcleo urbano (Figura 1.2).

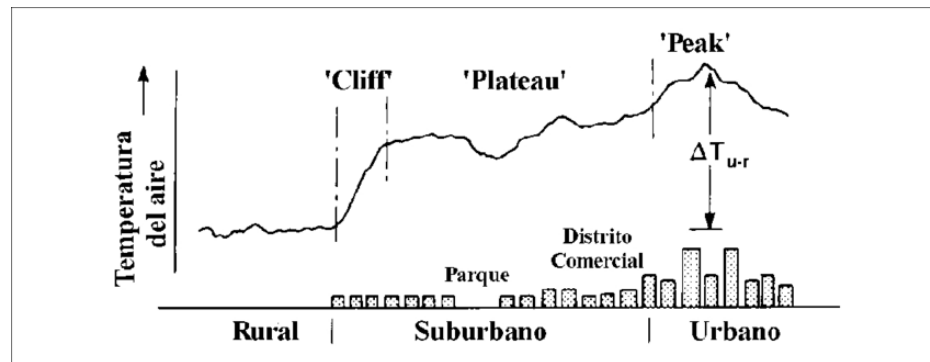


Figura 1. 2. Perfil conceptual de isla térmica urbana. (Oke, 1982)

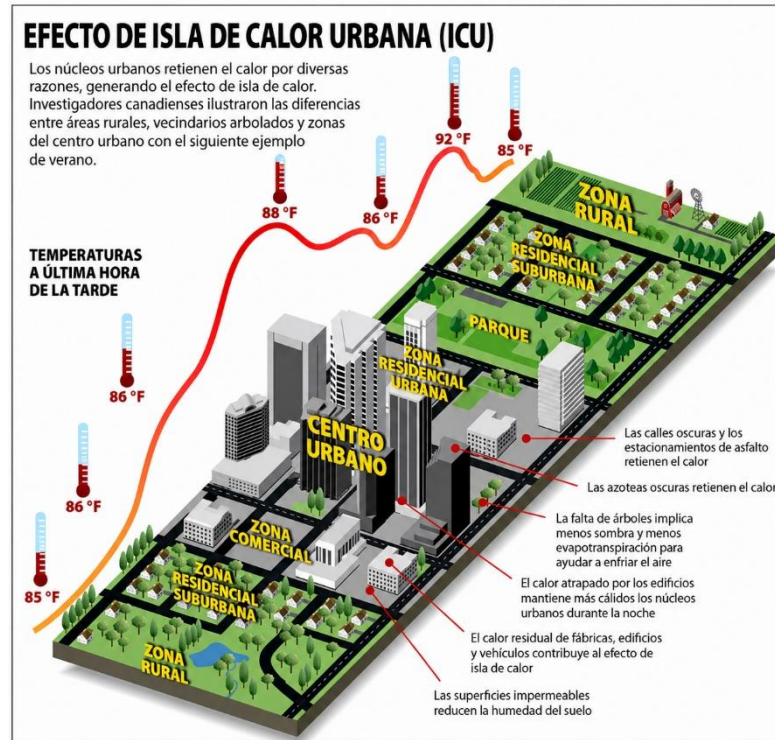
Uno de los fenómenos más estudiados dentro de este contexto es la Isla de Calor Urbana (ICU), definida como la diferencia de temperatura existente entre zonas urbanizadas y sus alrededores menos intervenidos. De acuerdo con Oke (1982), este fenómeno representa una de las expresiones más evidentes de la modificación climática inducida por las ciudades y constituye una consecuencia directa de los cambios en el balance energético superficial. Estudios posteriores han demostrado que la intensidad de la ICU puede incrementarse en ciudades densamente urbanizadas y bajo condiciones atmosféricas favorables para la acumulación de calor, particularmente durante periodos nocturnos (Arnfield, 2003; Santamouris, 2015).

Además del incremento térmico, el sobrecalentamiento urbano también modifica el comportamiento del viento cercano a la superficie debido al aumento de rugosidad urbana generado por edificaciones y obstáculos urbanos. Bajo estas condiciones, el flujo atmosférico puede presentar reducción de velocidad, recirculaciones y mayores niveles de turbulencia, afectando la disponibilidad de viento útil para ventilación natural y alterando los procesos de dispersión de calor dentro de la ciudad (Oke, 1987; Stull, 1988; Garratt, 1992).

Estas condiciones han sido documentadas en diversas ciudades del mundo y también en regiones metropolitanas de México. Particularmente, los estudios desarrollados en la Megalópolis del centro del país han mostrado cómo la urbanización modifica simultáneamente la temperatura, la circulación atmosférica y la calidad ambiental de las zonas urbanas. Investigaciones realizadas por Velasco y Roth (2010), así como trabajos recientes de Martínez Arroyo y colaboradores, han evidenciado que el crecimiento urbano puede intensificar procesos de acumulación térmica y generar condiciones microclimáticas diferenciadas dentro de una misma región metropolitana.

La relevancia de este fenómeno trasciende el ámbito climático. El incremento de la temperatura urbana repercute directamente en el consumo energético de las edificaciones, reduce la capacidad de

enfriamiento nocturno y aumenta la exposición de la población a condiciones de discomfort térmico (Santamouris, 2013; IPCC, 2021). En conjunto, estos procesos muestran que la isla de calor modifica tanto el microclima exterior como la exposición térmica de las edificaciones y sus ocupantes (Figura 1.3).



. Figura 1. 3 Efecto de isla de calor urbana y su influencia sobre el microclima urbano.

Fuente: Adaptado de Lemmen, D. S., & Warren, F. J. (2004). *Climate Change Impacts and Adaptation*. Government of Canada; y Martínez-Arroyo, M. A., et al., estudios sobre clima urban

1.1.3 Vivienda social en clima cálido

Las condiciones climáticas influyen directamente en el desempeño térmico de las edificaciones y en la calidad ambiental de los espacios habitables. En regiones de clima cálido y cálido-subhúmedo, las elevadas temperaturas ambientales y la intensa radiación solar representan factores que pueden comprometer las condiciones de confort térmico dentro de la vivienda (Givoni, 1998; Olgyay, 2015).

Esta situación adquiere especial relevancia en la vivienda social, donde los proyectos habitacionales suelen desarrollarse bajo criterios de optimización económica, estandarización constructiva y alta densidad urbana. Como resultado, aspectos como la orientación, la ventilación natural y el desempeño térmico de la envolvente pueden verse condicionados por restricciones de diseño y presupuesto (Nicol & Humphreys, 2002; de Dear & Brager, 2002).

Diversos estudios han señalado que las estrategias pasivas de acondicionamiento térmico representan una alternativa viable para mejorar las condiciones de habitabilidad y reducir la dependencia de sistemas mecánicos de climatización, particularmente en regiones donde el acceso a estos equipos puede estar limitado por factores económicos (Givoni, 1998; ASHRAE, 2021).

Bajo este contexto, la vivienda social localizada en climas cálidos constituye un escenario de interés para el estudio de soluciones pasivas orientadas a mejorar el desempeño térmico interior. En los apartados siguientes se analiza la problemática térmica asociada a este tipo de edificaciones, así como los mecanismos de ganancia de calor que influyen en su comportamiento energético y ambiental.

1.2 Problemática térmica en vivienda social

El desempeño térmico de la vivienda constituye uno de los factores que mayor influencia ejercen sobre la calidad ambiental interior y el bienestar de sus ocupantes. En regiones de clima cálido, las elevadas temperaturas exteriores, combinadas con las características constructivas de la edificación y las condiciones del entorno urbano, pueden favorecer la aparición de ambientes interiores con temperaturas superiores a las consideradas aceptables para el confort térmico (Givoni, 1998; ASHRAE, 2021).

Diversos estudios han demostrado que las viviendas localizadas en zonas urbanas cálidas suelen experimentar procesos de acumulación térmica a lo largo del día, particularmente cuando la ventilación natural disponible resulta insuficiente para disipar el calor almacenado en la envolvente y en los espacios interiores (Santamouris, 2013; Oke, 1987). Como consecuencia, las temperaturas interiores pueden mantenerse elevadas incluso durante periodos nocturnos, reduciendo la capacidad de recuperación térmica de la vivienda y afectando directamente las condiciones de habitabilidad.

Las consecuencias del sobrecalentamiento interior trascienden el ámbito energético. Diversas investigaciones han señalado que la exposición prolongada a temperaturas elevadas puede afectar el confort, el descanso, la productividad y el bienestar general de los ocupantes, especialmente durante periodos de calor intenso (WHO, 2021; ASHRAE, 2021). Por esta razón, comprender los mecanismos responsables de la ganancia y acumulación de calor dentro de la vivienda constituye un paso fundamental para el desarrollo de estrategias pasivas orientadas a mejorar su desempeño térmico.

1.2.1 Ganancias térmicas en la envolvente

Las ganancias térmicas en la envolvente representan uno de los principales mecanismos de calentamiento en viviendas localizadas en climas cálidos. La cubierta, los muros expuestos y las superficies exteriores reciben radiación solar durante varias horas del día, absorben parte de esa energía y posteriormente la transfieren hacia el interior mediante conducción, convección y radiación térmica (Incropera et al., 2007; ASHRAE, 2021).

La magnitud de este proceso depende de las propiedades térmicas de los materiales, entre ellas la conductividad térmica, la capacidad calorífica, la densidad, la absorción solar, la emisividad y el color superficial. En este sentido, materiales con alta absorción de radiación solar y baja reflectancia pueden alcanzar temperaturas superficiales considerablemente superiores a la temperatura del aire exterior, incrementando el flujo de calor hacia el interior de la vivienda (Givoni, 1998; Santamouris, 2013).

La exposición directa a la radiación solar favorece la acumulación de energía durante el día y puede generar temperaturas superficiales elevadas, especialmente cuando existen recubrimientos oscuros o impermeabilizantes con alta absorción solar. En el caso de cubiertas con impermeabilizante rojo, se han identificado temperaturas superficiales superiores a 60 °C durante periodos de alta radiación, lo cual evidencia la severidad del intercambio térmico entre exterior, envolvente y ambiente interior.

El contraste entre superficies con distinta coloración evidencia la influencia de las propiedades ópticas del recubrimiento sobre la temperatura alcanzada por la cubierta (Figura 1.4). El efecto del color y de

las propiedades ópticas de las superficies ha sido ampliamente documentado en estudios sobre cubiertas frías y materiales urbanos reflectivos. Akbari et al. (2001) señalan que las superficies frías y los árboles urbanos pueden reducir la temperatura del aire urbano y disminuir la demanda energética destinada al enfriamiento. De manera similar, Synnefa et al. (2007) indican que los materiales fríos, caracterizados por alta reflectancia solar y alta emitancia infrarroja, pueden utilizarse como estrategia de mitigación del sobrecalentamiento urbano y reducción de temperatura superficial.

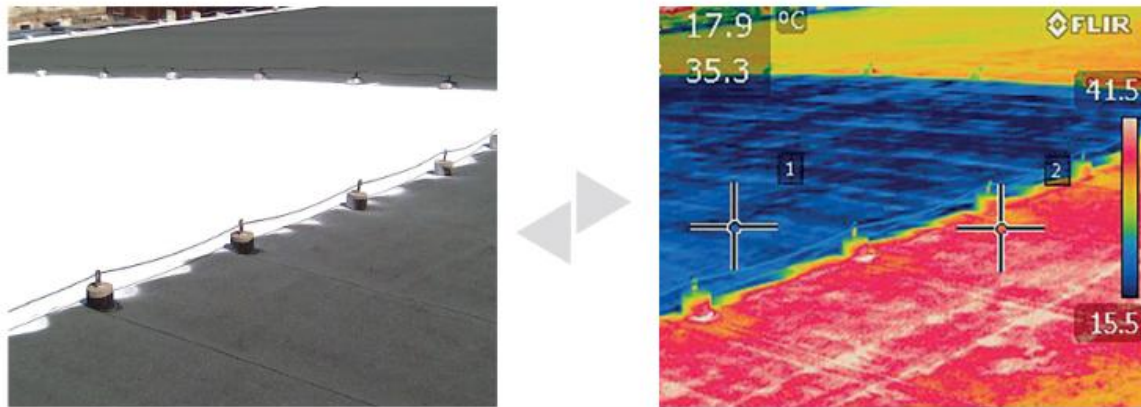


Figura 1. 4. Diferencial de temperatura superficiales en techo , superficies con variación de color.

Este comportamiento no solo incrementa la temperatura de la superficie exterior, sino que también condiciona la respuesta térmica interna de la vivienda. La energía absorbida por la envolvente puede transmitirse progresivamente hacia los espacios habitables, generando un desfase entre el momento de máxima radiación exterior y el periodo de mayor acumulación térmica interior. Este fenómeno resulta especialmente importante durante horarios vespertinos y nocturnos, cuando la temperatura exterior puede comenzar a disminuir, pero los elementos constructivos continúan liberando calor hacia el interior.

1.2.2 Persistencia térmica nocturna

La persistencia térmica nocturna se presenta cuando los materiales de la envolvente continúan liberando calor hacia el ambiente interior aun después de que la radiación solar directa ha disminuido. Este fenómeno es consecuencia de la energía acumulada durante el día en elementos como cubiertas, muros y superficies expuestas, cuya respuesta térmica no ocurre de forma inmediata, sino con cierto retardo asociado a sus propiedades termo-físicas (Incropera et al., 2007; ASHRAE, 2021).

En climas cálidos, la noche representa un periodo importante para la recuperación térmica de la vivienda. Bajo condiciones favorables, la disminución de la temperatura exterior y la ventilación nocturna pueden contribuir a disipar parte del calor almacenado durante el día. Sin embargo, cuando la envolvente mantiene una temperatura elevada o el aire exterior permanece térmicamente comprometido por el entorno urbano, la capacidad de enfriamiento natural se reduce de manera significativa (Givoni, 1998; Oke, 1987).

Este comportamiento se vuelve más crítico en zonas urbanizadas, donde la isla de calor urbana puede limitar el enfriamiento nocturno del ambiente exterior. La presencia de superficies impermeables, materiales de alta masa térmica y baja cobertura vegetal favorece la liberación gradual de calor hacia la atmósfera durante la noche, manteniendo temperaturas urbanas superiores a las de zonas menos densificadas (Oke, 1982; Santamouris, 2013).

Desde el punto de vista habitacional, la persistencia térmica nocturna es especialmente relevante porque coincide con los periodos de descanso de los ocupantes. Por esta razón, la evaluación térmica de una vivienda en clima cálido no debe limitarse al análisis de temperaturas máximas diurnas. También resulta necesario considerar la capacidad real del sistema constructivo para disipar calor durante la noche. Esta condición permite comprender por qué algunas edificaciones permanecen térmicamente cargadas durante varias horas y por qué la ventilación pasiva puede verse limitada cuando intenta actuar sobre un espacio que aún conserva energía acumulada en su envolvente.

La persistencia térmica nocturna también influye en la distribución vertical de temperatura dentro de la vivienda, ya que el aire calentado por superficies interiores tiende a desplazarse hacia zonas superiores por efecto de flotación térmica.

1.2.3 Estratificación térmica interior

La estratificación térmica interior corresponde a la formación de zonas o capas de aire con diferente temperatura dentro de un mismo espacio habitable. Este fenómeno se produce principalmente por efectos de flotación térmica, ya que el aire caliente presenta menor densidad y tiende a desplazarse hacia las zonas superiores, mientras que el aire de menor temperatura permanece en niveles inferiores (Incropera et al., 2007; ASHRAE, 2021).

En viviendas de más de un nivel, este comportamiento puede intensificarse debido a la conexión vertical entre espacios interiores, como escaleras, doubles alturas o zonas de transición. Cuando la envolvente libera calor hacia el interior, el aire cercano a superficies calientes incrementa su temperatura y asciende por convección natural, favoreciendo la acumulación de calor en planta alta o en zonas próximas a la cubierta. Este comportamiento genera una distribución vertical no uniforme del aire interior, con temperaturas mayores en la parte superior del recinto (Figura 1.5).

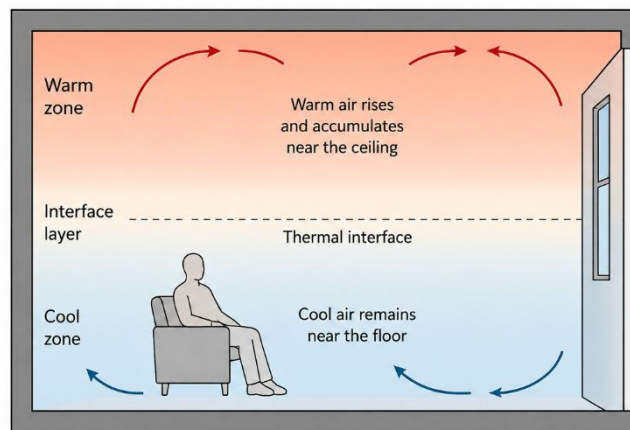


Figura 1. 5. Estratificación térmica en un espacio cerrado generada por efectos de convección natural y flotación térmica

Fuente: Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentos de transferencia de calor y masa* (6.ª ed.).

La estratificación térmica no depende únicamente de la temperatura del aire, sino también de la geometría interior, la ubicación de aberturas, la altura de los espacios, la intensidad de las ganancias térmicas y la disponibilidad de ventilación. En ausencia de mezcla suficiente, el aire caliente puede permanecer acumulado en zonas superiores durante periodos prolongados, reduciendo la efectividad de la ventilación natural y dificultando la disipación del calor almacenado en la vivienda (Awbi, 2003; Linden, 1999).

1.3 Ventilación

Los fenómenos térmicos descritos en la vivienda social ganancias de calor en la envolvente, acumulación energética, persistencia térmica nocturna y estratificación interior, muestran que el sobrecalentamiento no depende únicamente de la temperatura exterior, sino de la forma en que la edificación recibe, almacena y redistribuye energía dentro de sus espacios. Bajo esta condición, las estrategias de acondicionamiento térmico deben considerar simultáneamente el control de ganancias solares, la capacidad de disipación de calor y el movimiento del aire interior.

Dentro de las alternativas de bajo consumo energético, las estrategias pasivas han sido ampliamente estudiadas como recursos para mejorar las condiciones de habitabilidad en climas cálidos. Estas estrategias buscan aprovechar principios físicos como la orientación solar, la sombra, la reflectancia superficial, la masa térmica controlada, la evaporación y la ventilación natural, con el propósito de reducir la dependencia de sistemas mecánicos de enfriamiento (Givoni, 1998; Olgyay, 2015; ASHRAE, 2021).

Entre estas estrategias, la ventilación natural ocupa un lugar relevante debido a su capacidad para renovar el aire interior, favorecer la remoción de calor sensible y modificar la distribución térmica dentro del volumen habitable. Su funcionamiento puede estar inducido por la acción del viento, por diferencias de presión entre fachadas o por efectos de flotación térmica generados por diferencias de temperatura y densidad del aire (Awbi, 2003; Linden, 1999).

1.3.1 Principios de ventilación natural

La ventilación natural se basa en el movimiento del aire generado por diferencias de presión y temperatura entre el interior y el exterior de una edificación. A diferencia de los sistemas mecánicos de climatización, este mecanismo aprovecha las condiciones ambientales disponibles para renovar el aire interior, remover parte del calor acumulado y favorecer la mezcla térmica dentro del espacio habitable (Awbi, 2003; ASHRAE, 2021).

Desde el punto de vista físico, la ventilación natural puede producirse principalmente por dos mecanismos: la acción del viento y la flotación térmica. La ventilación inducida por viento ocurre cuando el flujo atmosférico incide sobre la envolvente de la edificación y genera diferencias de presión entre fachadas, promoviendo el ingreso de aire por zonas de presión positiva y su salida por zonas de presión negativa. Por otro lado, la ventilación por flotación térmica, también conocida como efecto chimenea, se origina cuando el aire caliente interior asciende debido a su menor densidad, favoreciendo su extracción por aberturas superiores y el ingreso de aire a menor temperatura por zonas inferiores (Linden, 1999; Etheridge, 2012).

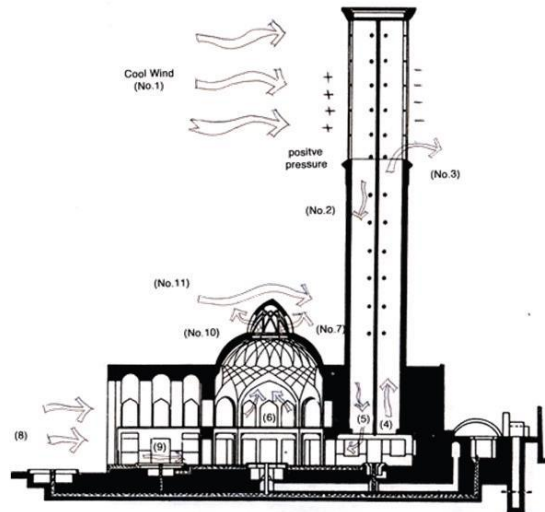
El desempeño de estos mecanismos depende de la relación entre la edificación y su entorno. Variables como la velocidad y dirección del viento, la ubicación de las aberturas, la diferencia de temperatura interior / exterior, la altura entre entradas y salidas, y la geometría del espacio interior modifican directamente el caudal de aire disponible y la capacidad de disipación térmica del sistema (Givoni, 1998; Awbi, 2003). Por esta razón, la ventilación natural no puede evaluarse únicamente a partir de la existencia de ventanas o aberturas, sino mediante la interacción entre flujo atmosférico, configuración arquitectónica y comportamiento térmico del recinto.

En viviendas localizadas en climas cálidos, la ventilación natural puede contribuir a reducir la acumulación de calor cuando el aire exterior presenta condiciones favorables y existe una trayectoria efectiva de circulación. Sin embargo, su efectividad puede disminuir cuando el viento disponible es bajo, la dirección del flujo no coincide con las aberturas principales, el aire exterior se encuentra térmicamente comprometido o la envolvente continúa liberando calor hacia el interior. En estos casos, la ventilación puede renovar el aire, pero no necesariamente eliminar por completo el sobrecalentamiento acumulado en los materiales constructivos.

Dentro de esta familia de estrategias de ventilación natural se encuentran las torres de viento, dispositivos pasivos empleados históricamente para captar, conducir o extraer aire mediante diferencias de presión y gradientes térmicos. Aunque su uso tradicional se asocia con regiones áridas de Medio Oriente, su posible aplicación en otros contextos climáticos requiere analizar las condiciones locales de viento, temperatura, entorno urbano y comportamiento térmico de la del ambiente y su configuración. (Bahadori, 1985; Calautit & Hughes, 2014).

1.3.2 Torres de viento

Las torres de viento, conocidas tradicionalmente como badgirs o windcatchers, constituyen una de las estrategias pasivas de ventilación más representativas de la arquitectura tradicional en regiones cálidas y áridas de Medio Oriente. Su funcionamiento combina la captación del viento mediante las aberturas superiores con la conducción o extracción del aire a través del espacio interior (Figura 1.6). Su presencia histórica en ciudades como Yazd, Irán, evidencia el desarrollo de soluciones arquitectónicas adaptadas a condiciones climáticas severas, donde la ventilación, el sombreado,



la masa térmica y el enfriamiento evaporativo formaban parte de un mismo sistema ambiental.

Figura 1. 6. Principio de ventilación y extracción de aire en una torre de viento persa.

En su contexto original, las torres de viento no funcionaban únicamente como elementos aislados de captación de aire. Su desempeño estaba asociado a una arquitectura climáticamente integrada, caracterizada por muros masivos, patios interiores, pasillos sombreados, depósitos de agua, sistemas subterráneos tipo qanat, vientos regionales promedio entre 5-7 m/s, alto diferencial de temperatura diurna. Esta integración permitía que el aire captado por la torre interactuara con superficies frescas o húmedas antes de ingresar al espacio habitable, mejorando su capacidad de enfriamiento en climas áridos con baja humedad relativa y alta amplitud térmica entre día y noche (Givoni, 1998; Bahadori 1985; Mirnezami, 2022). La integración entre la torre, la masa térmica y los sistemas subterráneos permitía preacondicionar el aire antes de su ingreso al espacio habitable (Figura 1.7).

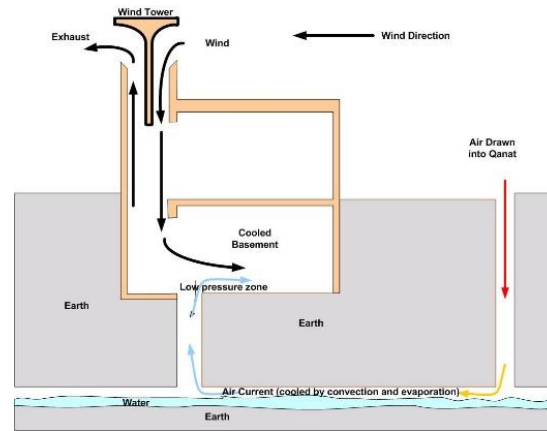


Figura 1. 7. Integración de torre de viento (wind catcher) y sistema subterráneo de enfriamiento evaporativo mediante qanat en arquitectura tradicional persa.

El principio general de funcionamiento de una torre de viento se basa en la interacción entre el flujo atmosférico exterior y la edificación. Cuando el viento incide sobre la parte superior de la torre, se generan zonas de presión positiva y negativa que pueden inducir el ingreso o la extracción de aire. En condiciones sin viento, algunos diseños también pueden operar parcialmente por flotación térmica, debido al ascenso del aire caliente acumulado en el interior. Se ha reportado que la efectividad de estos mecanismos depende de la velocidad del viento disponible, la dirección predominante, la geometría interna de la torre, la ubicación de salidas y la diferencia térmica entre interior y exterior (Bahadori, 1985; Calautit & Hughes, 2014).

Bahadori (1985) representa una de las referencias fundamentales en el estudio moderno de las torres de viento, al analizar su funcionamiento como dispositivo pasivo capaz de inducir ventilación natural y enfriamiento mediante diferencias de presión, orientación del viento y configuración geométrica. Sus aportaciones permitieron pasar de una interpretación principalmente arquitectónica e histórica hacia una comprensión físico-técnica del sistema, considerando variables como altura de la torre, dirección del viento, distribución de aberturas y transferencia de calor.

La literatura contemporánea ha retomado el estudio de las torres de viento mediante ensayos experimentales, pruebas en túnel de viento y simulaciones numéricas. En particular, gran parte de los estudios recientes se apoya en Computational Fluid Dynamics (CFD) para analizar patrones de velocidad, distribución de presión, recirculaciones internas, comportamiento térmico y variaciones geométricas del dispositivo. Este tipo de herramientas ha permitido evaluar torres multidireccionales, configuraciones con particiones internas, cambios de altura, variaciones en la relación al tamaño y diferentes estrategias de integración con la edificación (Calautit & Hughes, 2014; Hedayat et al., 2015).

No obstante, las revisiones recientes también han señalado limitaciones importantes. Li et al. (2025) que toma como referencias más de 110 artículos internacionales de alto impacto, Li et al nos indican que, aunque los windcatchers han sido ampliamente estudiados como sistemas de ventilación natural, su desempeño térmico mejora cuando se integran con otras tecnologías pasivas o de baja energía, tales como enfriamiento evaporativo, intercambiadores tierra-aire, materiales de cambio de fase, recuperación de calor o estrategias de deshumidificación, dependiendo del clima de aplicación. Esta observación es relevante porque confirma que la torre de viento debe evaluarse como un conjunto de tecnologías y no como una solución universal o aislada; su desempeño depende del clima, de la carga térmica de la edificación y de la forma en que se combine con otras estrategias pasivas., tal y como

se proyecta en los lugares que originaron dicha metodología. Esta integración contemporánea combina distintas tecnologías pasivas con métodos experimentales y numéricos para evaluar su desempeño térmico y aerodinámico (Figura 1.8).

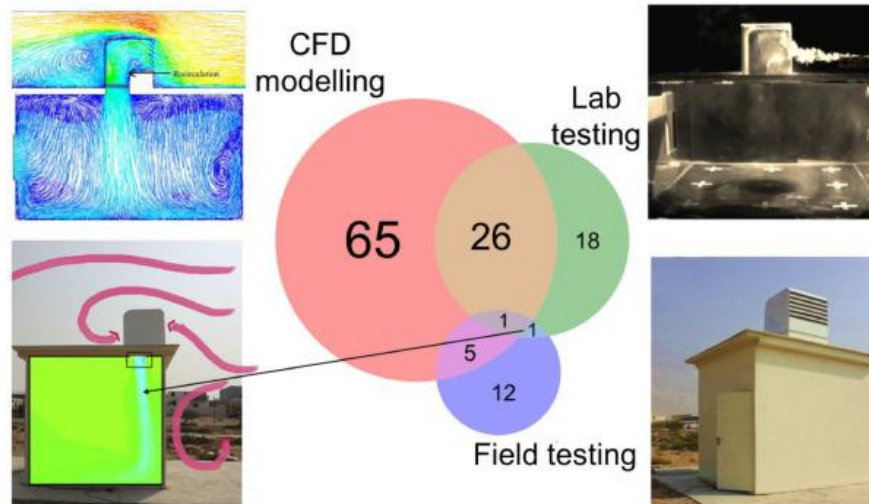


Figura 1. 8. Análisis contemporáneo de tecnologías pasivas integradas a torres de viento.

En México, el estudio de torres de viento también cuenta con antecedentes relevantes. Reyes Herrera (2015) analizó la incorporación de torres de viento en vivienda de interés social en Monterrey, combinando simulaciones CFD y experimentos en túnel de viento para evaluar patrones de flujo, modelos de turbulencia y condiciones de confort térmico. Por su parte, Carreto Hernández (2023) desarrolló estudios de convección natural y forzada en un sistema caseta–torre de viento, considerando configuraciones con y sin humidificación, lo que permitió evaluar la interacción entre ventilación, temperatura y humedad relativa. Asimismo, Morales (2025) profundizó en el efecto de la humidificación del aire en torres de viento para satisfacer condiciones de confort térmico en viviendas de Monterrey. Estos trabajos nacionales emplearon modelos experimentales tipo caseta–torre para estudiar la interacción entre convección, ventilación y humidificación bajo condiciones controladas (Figura 1.9).

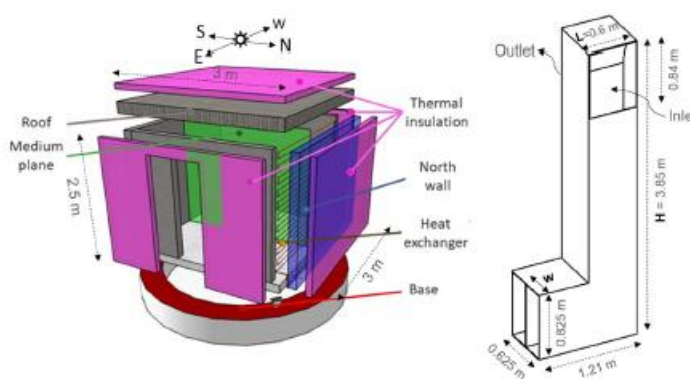


Figura 1. 9. Modelo de experimentación, ubicado en CENIDET, México.

Estos antecedentes muestran diferentes metodologías aplicadas en las torres de viento, de igual manera nos muestra que su desempeño depende de múltiples condiciones físicas: disponibilidad de viento útil, orientación, temperatura exterior, humedad relativa, control de carga térmica acumulada y configuración de la vivienda o recinto analizado. Por ello, la presente investigación no parte de la torre de viento como solución garantizada, sino como un dispositivo pasivo cuyo comportamiento

debe evaluarse bajo condiciones reales de clima, microclima urbano y capa límite atmosférica cercana a la superficie.

Aunque los estudios numéricos (Figura 1. 8) han permitido avanzar de manera importante en la comprensión del desempeño de las torres de viento, una parte considerable de estos trabajos define sus condiciones de frontera a partir de valores promedio, datos meteorológicos de referencia, escenarios normativos o condiciones idealizadas de velocidad y dirección del viento. Esta aproximación resulta útil para comparar configuraciones geométricas, evaluar tendencias generales de flujo y reducir la complejidad computacional; sin embargo, también puede limitar la representación de las condiciones atmosféricas reales bajo las cuales opera una vivienda en un entorno urbano específico.

En sistemas de ventilación pasiva, esta simplificación adquiere especial relevancia porque el desempeño de la torre depende directamente del viento disponible en la escala local. La velocidad, la dirección, la turbulencia, la estabilidad atmosférica y la influencia de la rugosidad urbana pueden modificar de manera significativa la capacidad de captación o extracción de aire. Por ello, utilizar únicamente valores promedio o condiciones de referencia puede conducir a interpretaciones incompletas cuando el sistema se traslada a contextos urbanos con baja disponibilidad de viento, alta variabilidad direccional o sobrecalentamiento de la envolvente.

A partir de esta limitación, la presente investigación incorpora como aportación central la caracterización experimental del comportamiento atmosférico cercano a la vivienda, considerando no solo la temperatura interior o las condiciones térmicas de la envolvente, sino también la dinámica real del viento dentro del entorno urbano inmediato. Este enfoque permite relacionar el desempeño potencial de la torre de viento con la capa límite atmosférica, la rugosidad urbana, la variabilidad direccional y la disponibilidad efectiva de viento útil.

De esta manera, el estudio de las torres de viento conduce necesariamente al análisis de la atmósfera cercana a la superficie, ya que su desempeño depende directamente de las condiciones del flujo de aire que incide sobre la edificación. Antes de evaluar la capacidad de una torre para inducir ventilación natural, resulta indispensable comprender el comportamiento de los fenómenos atmosféricos que intervienen en el intercambio de energía, momentum y masa en el entorno construido. Por esta razón, en este apartado se presenta una descripción general de los principales elementos atmosféricos relacionados con la problemática de análisis, con el propósito de establecer una base conceptual que permita interpretar, de manera inicial, la interacción entre el viento, la temperatura, la rugosidad urbana y el comportamiento térmico del recinto estudiado.

1.4 Influencia de la capa límite atmosférica en el entorno urbano

El análisis de las torres de viento y de la ventilación natural conduce necesariamente al estudio del comportamiento del aire antes de su ingreso a la vivienda. En condiciones reales, el viento disponible no corresponde a un flujo uniforme ni constante, sino a una dinámica atmosférica influenciada por la superficie terrestre, la rugosidad urbana, la estabilidad térmica y las condiciones microclimáticas del entorno inmediato.

Esta consideración resulta especialmente importante en vivienda social localizada en zonas urbanas densificadas, donde edificaciones, vialidades, bardas, vegetación dispersa y superficies calientes modifican la velocidad, dirección y turbulencia del flujo cercano al suelo. Bajo estas condiciones, la disponibilidad de viento útil para ventilación pasiva puede diferir significativamente de los valores reportados por estaciones meteorológicas regionales o utilizados como condiciones idealizadas en estudios numéricos.

Por ello, la presente investigación incorpora el análisis de la capa límite atmosférica y del entorno urbano como parte del planteamiento del problema. Esta aproximación permite relacionar el desempeño potencial de la torre de viento con la dinámica real del viento, la rugosidad superficial, el microclima urbano y el comportamiento térmico de la envolvente.

Los fundamentos físicos asociados a estos fenómenos se desarrollan con mayor detalle en el Capítulo 2, donde se abordan la estructura de la atmósfera, la capa límite atmosférica, los perfiles verticales del viento, la rugosidad urbana, la turbulencia, el microclima y la disponibilidad de viento útil para ventilación pasiva.

1.5 Evolución del enfoque de investigación

Las interacciones que se generan en la capa límite atmosférica modifican significativamente las condiciones térmicas y el comportamiento del viento cercano a la superficie en entornos urbanos densificados. Estas condiciones afectan directamente la disponibilidad de ventilación natural y el desempeño de estrategias pasivas utilizadas para disipación térmica en vivienda. En regiones de clima cálido, donde el almacenamiento energético urbano y las altas temperaturas superficiales favorecen procesos de persistencia térmica nocturna, resulta necesario analizar las condiciones reales de operación del entorno construido mediante aproximaciones experimentales y herramientas de análisis físico.

Bajo este contexto, el presente trabajo evolucionó desde una aproximación inicial enfocada en ventilación pasiva hacia un análisis integral del comportamiento térmico y atmosférico asociado a la capa límite urbana. El desarrollo de la investigación incorporó progresivamente monitoreo ambiental, caracterización experimental del viento, análisis térmico de la envolvente y simulación numérica mediante CFD, permitiendo reinterpretar el comportamiento físico del sistema bajo condiciones reales de operación.

1.5.1 Fundamentación inicial

La investigación surgió inicialmente a partir del interés por evaluar el potencial de estrategias pasivas de ventilación en vivienda social ubicada en clima cálido. Entre estas estrategias, las torres de viento representaban una alternativa de interés debido a su utilización histórica en regiones áridas del Medio Oriente y a su capacidad para inducir movimiento de aire mediante diferencias de presión y gradientes térmicos (Bahadori, 1985).

Sin embargo, las primeras revisiones bibliográficas y observaciones preliminares mostraron que el desempeño de estos sistemas depende directamente de las condiciones atmosféricas locales, particularmente de la disponibilidad de viento útil y del comportamiento del flujo cercano a la superficie. Asimismo, se identificó que las condiciones urbanas presentes en zonas densificadas podían modificar significativamente la velocidad y dirección del viento respecto a las condiciones reportadas en estaciones meteorológicas regionales.

Paralelamente, el análisis térmico preliminar de la vivienda permitió identificar condiciones de sobrecalentamiento asociadas a ganancias térmicas en cubierta, acumulación energética en materiales constructivos y persistencia térmica durante horarios nocturnos. Estas observaciones llevaron a considerar que el comportamiento térmico interior no dependía únicamente de la ventilación natural, sino también de la interacción entre envolvente térmica, microclima urbano y dinámica atmosférica local.

1.5.2 Desarrollo experimental

Con el propósito de caracterizar las condiciones reales de operación de la vivienda, se desarrolló una etapa experimental orientada al monitoreo térmico y análisis del comportamiento del viento en el entorno inmediato de la edificación. Esta etapa incorporó mediciones de temperatura y humedad relativa tanto en el interior como en el exterior de la vivienda, permitiendo identificar patrones de sobrecalentamiento, persistencia térmica nocturna y diferencias térmicas entre niveles interiores.

De manera paralela, se realizaron monitoreos de viento mediante vuelos con dron a diferentes horarios del día, con el objetivo de analizar la magnitud, dirección y variabilidad temporal del flujo atmosférico cercano a la superficie. Estas mediciones permitieron identificar condiciones de baja velocidad del viento, variabilidad direccional y efectos de canalización asociados a la geometría urbana circundante.

Los resultados experimentales evidenciaron que el comportamiento del viento en el sitio de estudio se encontraba fuertemente influenciado por la rugosidad urbana y por las condiciones presentes dentro de la capa límite atmosférica urbana. Asimismo, se observó que las condiciones térmicas interiores presentaban una relación directa con el almacenamiento energético de la envolvente y con la limitada capacidad de disipación térmica mediante ventilación natural durante ciertos periodos del día.

A partir de estas observaciones, el problema de investigación evolucionó desde una aproximación centrada únicamente en ventilación pasiva hacia un análisis más amplio de la interacción entre comportamiento térmico de la vivienda, microclima urbano y dinámica atmosférica local.

1.5.3 Integración de la modelación CFD

Con base en los resultados obtenidos durante la etapa experimental, se incorporó el uso de simulación (CFD) como herramienta para analizar el comportamiento del flujo de aire y la distribución térmica al interior de la vivienda bajo condiciones de frontera derivadas del monitoreo real.

La integración del modelo CFD permitió representar fenómenos asociados a ventilación natural, estratificación térmica, recirculaciones interiores y transferencia de calor entre superficies y aire interior. Para ello, se consideraron temperaturas superficiales medidas experimentalmente en muros, cubiertas y piso, así como condiciones de viento obtenidas a partir de los monitoreos atmosféricos realizados con dron. La incorporación de CFD permitió complementar las observaciones experimentales y proporcionar una interpretación física más detallada de los fenómenos térmicos y aerodinámicos presentes en la vivienda bajo condiciones reales de operación.

1.5.4 Reinterpretación física del sistema

La integración de resultados experimentales y simulaciones numéricas permitió reinterpretar el comportamiento del sistema de ventilación pasiva bajo las condiciones reales del entorno urbano estudiado. Los análisis mostraron que el desempeño térmico de la vivienda no dependía únicamente de la presencia de una torre de viento o de aperturas para ventilación natural, sino de la interacción simultánea entre dinámica atmosférica, comportamiento térmico de la envolvente y microclima urbano.

Las condiciones de viento registradas evidenciaron que el flujo atmosférico cercano a la superficie presentaba velocidades reducidas, alta variabilidad direccional y comportamiento influenciado por la rugosidad urbana. Bajo estas condiciones, la capacidad de extracción y renovación de aire asociada a estrategias pasivas resultó limitada durante ciertos periodos críticos de sobrecalentamiento.

Asimismo, el análisis térmico permitió identificar que la acumulación energética en muros y cubiertas favorecía procesos de persistencia térmica nocturna y estratificación interior, manteniendo temperaturas elevadas aun después de la disminución de la radiación solar exterior. Estos resultados mostraron que el comportamiento térmico interior se encontraba fuertemente condicionado por la respuesta dinámica de la envolvente y por la limitada disponibilidad de viento útil dentro de la capa límite urbana.

A partir de esta reinterpretación física, el problema de investigación evolucionó hacia una visión integral del confort térmico en vivienda social, considerando la interacción entre atmósfera, entorno urbano, envolvente térmica y estrategias pasivas de ventilación bajo condiciones reales de operación.

1.6 Justificación

El sobrecalentamiento en viviendas de interés social ubicadas en climas cálidos representa una problemática relevante por su impacto en la habitabilidad, el consumo energético y la calidad de vida de los ocupantes. En el caso de estudio, localizado en Emiliano Zapata, Morelos, se identificaron condiciones interiores de alta temperatura, persistencia térmica nocturna y limitada ventilación natural, principalmente en la planta alta de la vivienda.

Ante esta condición, las estrategias pasivas de ventilación natural representan una alternativa de interés, debido a que pueden contribuir a reducir la dependencia de sistemas mecánicos de acondicionamiento térmico. Entre estas estrategias, las torres de viento han sido estudiadas en distintos contextos climáticos; sin embargo, su desempeño no puede asumirse de forma directa en viviendas urbanas de baja altura ni en climas cálidos subhúmedos.

La efectividad de una torre de viento depende de la disponibilidad real de viento, la rugosidad urbana, la orientación de la vivienda, la temperatura exterior, la humedad relativa y la carga térmica acumulada en la envolvente. Por ello, resulta necesario evaluar su comportamiento bajo condiciones reales de operación, considerando tanto el ambiente exterior como la respuesta térmica interior de la vivienda.

Esta investigación se justifica al integrar monitoreo experimental, caracterización del viento mediante UAV, termografía infrarroja, estimación de carga térmica y simulación CFD para analizar el potencial y las limitaciones de una torre de viento como estrategia pasiva en una vivienda ubicada en Emiliano Zapata, Morelos.

1.6.1 Justificación científica

Desde el punto de vista científico, el trabajo aporta una interpretación multiescala del problema térmico en vivienda, integrando la capa límite atmosférica urbana, la rugosidad del entorno construido, el microclima local, la envolvente térmica y el comportamiento del aire interior.

Esta integración permite analizar la ventilación pasiva no como un fenómeno aislado, sino como el resultado de la interacción entre el viento disponible, las condiciones higrótérmicas exteriores y la carga térmica del edificio. La investigación contribuye a comprender cómo una torre de viento puede modificar el comportamiento térmico y aerodinámico interior, así como a identificar los factores que condicionan su desempeño en una vivienda real de clima cálido subhúmedo.

1.6.2 Justificación técnica

Técnicamente, el estudio permite establecer una metodología para obtener condiciones de frontera más representativas en simulaciones CFD a partir de datos experimentales. El uso de sensores higrotérmicos, termografía infrarroja y vuelos con UAV permitió caracterizar el comportamiento térmico de la vivienda y el viento disponible a diferentes alturas.

Con esta información se configuró un modelo CFD del volumen de aire interior, lo que permitió comparar el caso base y el escenario con torre de viento. Los resultados obtenidos aportan criterios técnicos para evaluar la viabilidad, el alcance y las limitaciones de estrategias pasivas de ventilación natural en viviendas de baja altura.

1.6.3 Justificación social

Desde el punto de vista social, el estudio responde a una problemática frecuente en viviendas de interés social localizadas en zonas cálidas: el incremento de temperatura interior y la dependencia creciente de ventiladores o sistemas de aire acondicionado. Estas soluciones incrementan el consumo eléctrico y pueden representar una carga económica para los usuarios.

La evaluación de estrategias pasivas resulta pertinente porque permite explorar alternativas de bajo consumo energético. No obstante, este trabajo también reconoce que dichas estrategias deben evaluarse con rigor antes de implementarse, ya que una torre de viento puede presentar limitaciones asociadas al bajo viento disponible, ingreso de polvo o fauna, necesidad de filtros y posibles pérdidas de flujo.

1.7 Pregunta de investigación

¿Cómo influyen la capa límite atmosférica urbana, la disponibilidad real de viento y la carga térmica de la envolvente en el comportamiento térmico y aerodinámico de una vivienda con torre de viento ubicada en Emiliano Zapata, Morelos?

1.8 Hipótesis

La incorporación de una torre de viento en una vivienda de interés social ubicada en Emiliano Zapata, Morelos, puede favorecer la ventilación natural y reducir parcialmente la temperatura interior. Sin embargo, su capacidad para aproximar el recinto a condiciones de confort térmico dependerá de la disponibilidad real de viento dentro de la capa límite atmosférica urbana y de la carga térmica acumulada en la envolvente.

1.9 Objetivo general

Evaluar los efectos de la capa límite atmosférica urbana y de la carga térmica de la envolvente sobre el comportamiento térmico y aerodinámico de una vivienda con torre de viento ubicada en Emiliano Zapata, Morelos, mediante monitoreo experimental, caracterización del viento, análisis térmico y simulación CFD.

1.10 Objetivos específicos

1. Caracterizar el comportamiento higrotérmico interior y exterior de la vivienda durante el periodo cálido de estudio.

2. Identificar la respuesta térmica de la envolvente mediante termografía infrarroja cuantitativa y estimación de carga térmica superficial.
3. Caracterizar la velocidad y dirección del viento local mediante vuelos con UAV a diferentes alturas y horarios representativos.
4. Analizar la relación entre el sistema urbano, canalización del viento y disponibilidad de flujo útil para ventilación pasiva.
5. Desarrollar un modelo CFD del volumen de aire interior de la vivienda con condiciones de frontera derivadas del monitoreo experimental.
6. Comparar el comportamiento térmico y aerodinámico del caso base y del escenario con torre de viento.
7. Evaluar la reducción térmica obtenida mediante criterios de confort térmico y análisis bioclimático, considerando ASHRAE 55 y carta de Givoni.

1.11 Alcances y limitaciones

El estudio se desarrolló en una vivienda de interés social ubicada en Emiliano Zapata, Morelos. Por lo tanto, los resultados corresponden a las condiciones geométricas, constructivas, climáticas y urbanas específicas del caso de estudio. El fraccionamiento cuenta con 4,467 casas con la misma metodología constructiva.

El monitoreo higrotérmico se realizó durante el periodo cálido analizado, mediante sensores interiores y exteriores de temperatura y humedad relativa. La caracterización del viento se efectuó mediante vuelos con UAV en horarios representativos y a diferentes alturas, con el propósito de identificar la variabilidad del flujo local y su posible aprovechamiento para ventilación pasiva.

La termografía infrarroja se utilizó para caracterizar temperaturas superficiales de la envolvente y apoyar la estimación de cargas térmicas. La simulación CFD se limitó al volumen de aire interior, considerando condiciones de frontera derivadas del monitoreo experimental y temperaturas superficiales medidas.

El trabajo no incluyó la construcción física de una torre de viento, pruebas en túnel de viento ni la evaluación experimental de una torre instalada. Tampoco se evaluaron modificaciones constructivas de la envolvente, sistemas de humidificación, filtros, aspersión, materiales aislantes o tecnologías complementarias.

Los resultados no deben interpretarse como una validación universal del desempeño de torres de viento, sino como una evaluación específica de su potencial y limitaciones bajo las condiciones reales de la vivienda estudiada. El análisis permitió determinar si la torre de viento simulada modifica el flujo interior y reduce la severidad térmica del recinto bajo las condiciones evaluadas.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

La problemática térmica descrita en el capítulo anterior evidencia que el desempeño de una estrategia pasiva de ventilación no puede analizarse únicamente desde la geometría de la vivienda o desde el principio de funcionamiento del dispositivo empleado. En el caso de las torres de viento, la capacidad de captar o extraer aire depende directamente del comportamiento atmosférico disponible en el entorno inmediato de la edificación. Por esta razón, el presente capítulo desarrolla los fundamentos físicos necesarios para comprender cómo la atmósfera cercana a la superficie, la rugosidad urbana, la estabilidad térmica y el microclima modifican la velocidad, dirección y disponibilidad real del viento útil para ventilación natural.

A diferencia de los valores promedio utilizados en aproximaciones generales o en condiciones de frontera idealizadas, el viento que incide sobre una vivienda urbana se encuentra condicionado por obstáculos, superficies calientes, variaciones de altura, canalizaciones, recirculaciones y procesos turbulentos propios de la capa rugosa urbana. Estos fenómenos explican por qué la caracterización local del viento resulta indispensable para evaluar el desempeño térmico de una estrategia pasiva en condiciones reales de operación.

Bajo este enfoque, el capítulo inicia con una descripción general de la atmósfera terrestre y de la región inferior donde ocurre la interacción directa entre superficie y flujo de aire. Posteriormente, se abordan la capa límite atmosférica, los perfiles verticales del viento, la rugosidad urbana, la turbulencia, el microclima y la disponibilidad de viento útil. Esta base conceptual permitirá interpretar posteriormente los datos obtenidos mediante monitoreo experimental, así como justificar las condiciones de frontera utilizadas en la modelación CFD de la vivienda con torre de viento.

2.1 Atmósfera terrestre

La atmósfera terrestre corresponde a la envoltura gaseosa que rodea al planeta y que participa en procesos fundamentales de transferencia de energía, circulación del aire y regulación climática. Su comportamiento depende de la interacción entre radiación solar, superficie terrestre, dinámica de fluidos y procesos termodinámicos que ocurren a diferentes escalas espaciales y temporales (Wallace & Hobbs, 2006).

Desde el punto de vista térmico y dinámico, la atmósfera se encuentra dividida en diferentes capas definidas principalmente por la variación de temperatura con la altura. Estas capas corresponden a la troposfera, estratosfera, mesosfera, termosfera y exosfera, cada una con características físicas particulares relacionados con presión, densidad, temperatura y comportamiento del flujo atmosférico.

Dentro de estas regiones, la troposfera representa la capa de mayor interés para el presente estudio debido a que en ella ocurren los principales fenómenos meteorológicos y procesos de interacción entre atmósfera y superficie terrestre. Asimismo, es dentro de esta región donde se desarrolla la capa límite atmosférica, la cual controla gran parte del comportamiento del viento cercano a la superficie y de los procesos de intercambio energético asociados al entorno urbano. La organización vertical de estas capas se establece principalmente a partir de sus gradientes térmicos característicos (Figura 2.1).

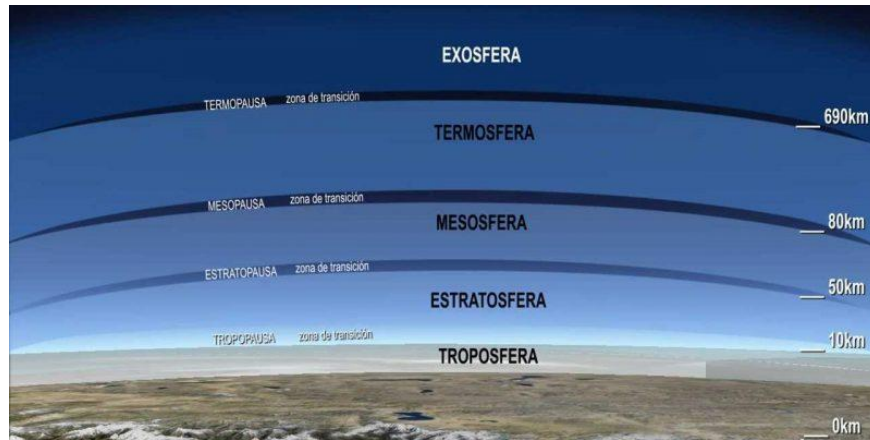


Figura 2. 1 Esquema vertical de las capas atmosféricas.

2.1.1 Troposfera

La troposfera constituye la capa más baja de la atmósfera terrestre y representa la región donde ocurren la mayoría de los fenómenos meteorológicos y procesos de intercambio energético entre superficie y atmósfera (Wallace & Hobbs, 2006). Su espesor varía aproximadamente entre 8 y 18 km dependiendo de la latitud, las condiciones climáticas y la época del año.

Dentro de esta capa se concentra la mayor parte de la masa atmosférica y prácticamente la totalidad del vapor de agua presente en la atmósfera. Como consecuencia, fenómenos como nubosidad, precipitación, turbulencia, convección y circulación del viento se desarrollan principalmente dentro de la troposfera (Stull, 1988). La troposfera ocupa la región inferior de esta estructura y concentra los fenómenos relevantes para el intercambio entre la superficie y la atmósfera (Figura 2.2).

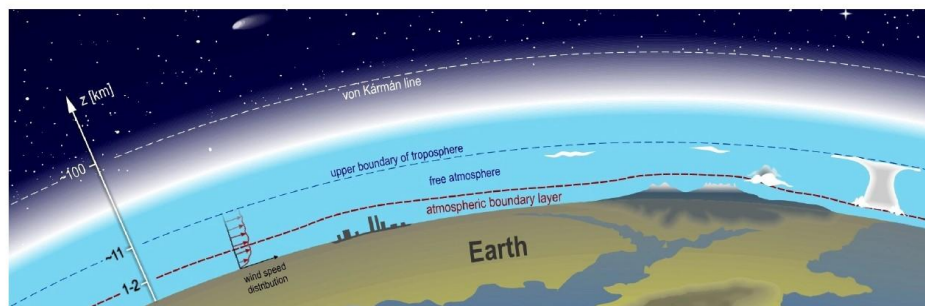


Figura 2. 2. Perfil vertical simplificado de la troposfera.

Desde el punto de vista térmico, la troposfera presenta generalmente una disminución progresiva de temperatura con la altura, fenómeno asociado a la reducción de presión atmosférica y expansión adiabática del aire. Este gradiente térmico vertical influye directamente sobre la estabilidad atmosférica, la generación de turbulencia y el comportamiento del flujo de aire cercano a la superficie.

La región inferior de la troposfera resulta particularmente relevante para el presente estudio debido a que en ella se desarrolla la capa límite atmosférica, donde la superficie terrestre modifica directamente el comportamiento del viento mediante efectos de fricción, calentamiento superficial y rugosidad urbana (Oke, 1987). Bajo estas condiciones, las características térmicas y dinámicas de la troposfera influyen sobre la disponibilidad de viento útil y sobre los mecanismos de ventilación natural presentes en entornos urbanos.

2.1.2 Interacción superficie-atmósfera

La interacción superficie-atmósfera corresponde a los procesos de intercambio de momentum, calor y masa que ocurren entre la superficie terrestre y el flujo atmosférico cercano al suelo. Estas interacciones modifican continuamente las propiedades térmicas y dinámicas del aire dentro de la región inferior de la troposfera (Stull, 1988).

La superficie terrestre ejerce fricción mecánica sobre el flujo atmosférico, provocando reducción progresiva de velocidad y generación de turbulencia conforme el viento se aproxima al suelo. Como consecuencia, el comportamiento del flujo cercano a la superficie difiere significativamente respecto a las condiciones atmosféricas presentes a mayores alturas (Oke, 1987).

De manera simultánea, los intercambios térmicos entre superficie y atmósfera modifican la estabilidad atmosférica y favorecen procesos convectivos que influyen sobre la mezcla vertical del aire. Durante periodos de calentamiento superficial, pueden generarse movimientos ascendentes asociados a diferencias de densidad y flotación térmica, mientras que durante condiciones estables nocturnas la mezcla atmosférica tiende a reducirse (Stull, 1988).

Estas interacciones controlan gran parte del comportamiento dinámico presente dentro de la capa límite atmosférica y condicionan la distribución vertical de velocidad, turbulencia y transferencia energética en el entorno urbano.

2.2 Capa límite atmosférica

2.2.1 Capa límite atmosférica (ABL)

La capa límite atmosférica, también conocida como Atmospheric Boundary Layer (ABL), corresponde a la región de la atmósfera cuya dinámica se encuentra directamente afectada por la superficie terrestre y responde a sus forzamientos en periodos del orden de una hora o menos (Stull, 1988).

El comportamiento de la capa límite depende de variables como radiación solar, estabilidad atmosférica, rugosidad superficial y condiciones topográficas. Como consecuencia, la distribución vertical de velocidad, temperatura y turbulencia puede variar significativamente entre ambientes rurales y urbanos (Oke, 1987).

Dentro de esta región, el flujo atmosférico presenta modificaciones importantes respecto al viento geostrófico presente a mayores alturas. La fricción superficial reduce progresivamente la velocidad del viento conforme disminuye la altura y favorece la generación de estructuras turbulentas responsables del intercambio vertical de momentum y energía.

El espesor de la ABL puede variar desde algunos cientos de metros hasta varios kilómetros dependiendo de las condiciones atmosféricas y del ciclo diurno. Durante condiciones convectivas diurnas, la mezcla turbulenta favorece un mayor desarrollo vertical de la capa límite, mientras que durante periodos nocturnos estables su espesor tiende a disminuir considerablemente debido a la reducción de turbulencia térmica (Arya, 2001).

Desde el punto de vista del presente estudio, la ABL resulta particularmente importante debido a que el comportamiento del viento utilizado para ventilación natural ocurre dentro de esta región atmosférica influenciada por los múltiples fenómenos que se efectúan dentro de esta capa atmosférica.

2.2.2 Subcapas atmosféricas

La capa límite atmosférica presenta una estructura vertical compuesta por diferentes regiones caracterizadas por mecanismos particulares de interacción entre superficie y flujo atmosférico. Estas subdivisiones permiten describir el comportamiento del viento, la turbulencia y los procesos de intercambio energético presentes cerca de la superficie terrestre (Stull, 1988).

La región más cercana al suelo corresponde a la subcapa rugosa, donde el flujo atmosférico se encuentra directamente influenciado por obstáculos superficiales como edificaciones, vegetación y elementos urbanos. Dentro de esta zona, el viento presenta alta variabilidad espacial y fuertes gradientes de velocidad debido a los efectos de fricción y separación del flujo (Oke, 1987).

Por encima de esta región se desarrolla la capa superficial, donde las propiedades turbulentas y los perfiles verticales del viento pueden aproximarse mediante relaciones semiempíricas derivadas de la teoría de similitud atmosférica. En esta zona, la velocidad del viento suele describirse mediante perfiles logarítmicos asociados a parámetros de rugosidad superficial y estabilidad atmosférica.

A mayores alturas se localiza la capa de mezcla, caracterizada por una mayor homogenización turbulenta del flujo atmosférico debido a procesos convectivos y mezcla vertical de momentum y energía. El desarrollo de esta región depende de las condiciones térmicas superficiales y de la estabilidad atmosférica presente durante el ciclo diurno. Estas regiones conforman una estructura vertical en la que disminuye progresivamente la influencia directa de la superficie terrestre (Figura 2.3).

En entornos urbanos, la presencia de edificaciones modifica significativamente el comportamiento de estas subcapas, favoreciendo fenómenos de canalización, recirculación y turbulencia mecánica. Estas condiciones afectan directamente la distribución vertical del viento y la disponibilidad de flujo útil para ventilación natural en edificaciones.

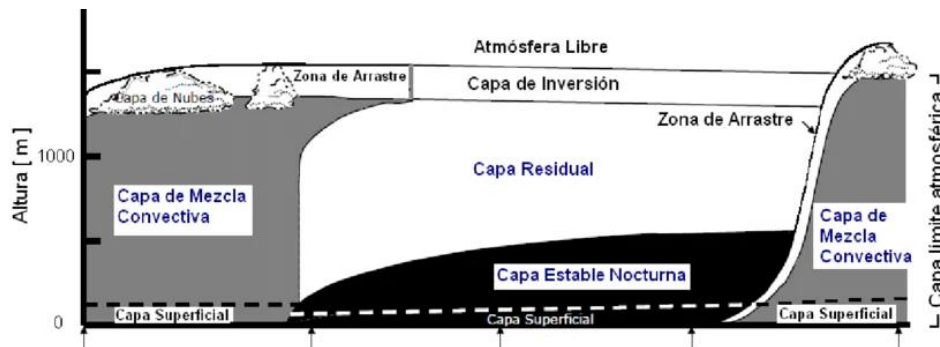


Figura 2. 3. Estructura de la capa límite y capa superficial. ((fuente Stull 1988).

2.2.3 Perfil logarítmico del viento

Dentro de la capa superficial atmosférica, la velocidad del viento presenta una variación vertical asociada principalmente a los efectos de fricción generados por la superficie terrestre. Como consecuencia, el viento tiende a disminuir progresivamente conforme se aproxima al suelo debido a la interacción mecánica entre el flujo atmosférico y la rugosidad superficial (Stull, 1988).

Bajo condiciones atmosféricas neutras, idealizadas y sobre superficies relativamente homogéneas, esta distribución vertical puede describirse mediante el perfil logarítmico del viento, ampliamente

utilizado en meteorología de capa límite y estudios de flujo atmosférico cercano a la superficie (Arya, 2001):

$$U(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \quad (2.1)$$

donde:

$U(z)$ corresponde a la velocidad media del viento a una altura z ,

u_* es la velocidad de fricción,

κ representa la constante de von Kármán,

z_0 corresponde a la longitud de rugosidad superficial,

d representa la altura de desplazamiento asociada a obstáculos urbanos.

Este perfil describe cómo la rugosidad superficial modifica la distribución vertical de velocidad dentro de la capa superficial atmosférica. En superficies urbanas densificadas, valores elevados de rugosidad producen mayores gradientes verticales de velocidad y reducciones importantes del viento cercano al suelo (Oke, 1987). Por ello, a mayor rugosidad superficial, el perfil presenta menores velocidades cerca del suelo y una recuperación gradual conforme aumenta la altura (Figura 2.4).

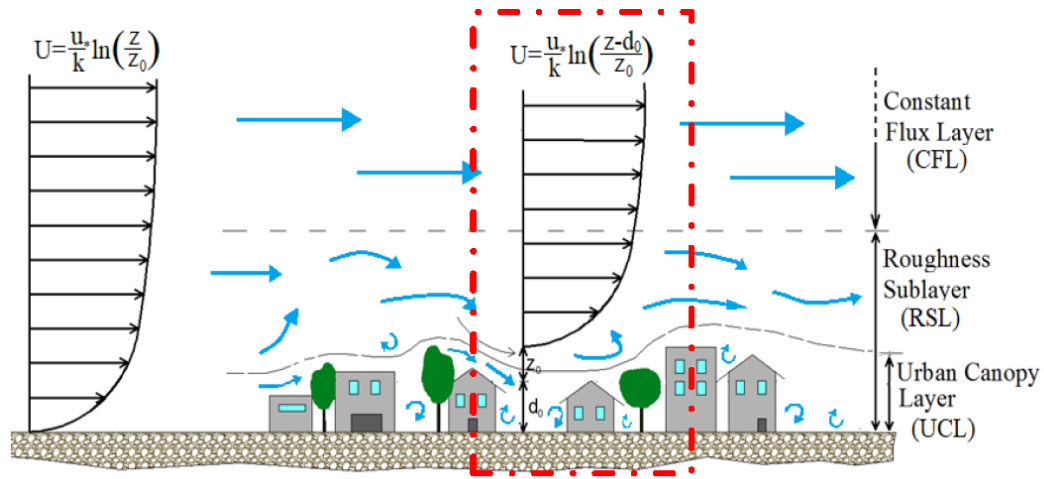


Figura 2. 4. Perfil logarítmico vertical de velocidad del viento bajo diferentes condiciones de rugosidad superficial

La aplicación del perfil logarítmico resulta particularmente relevante en estudios de ventilación natural y caracterización atmosférica debido a que permite interpretar cómo las condiciones urbanas modifican la disponibilidad de viento útil en diferentes alturas sobre la superficie. Asimismo, constituye una de las bases teóricas utilizadas para el análisis del comportamiento atmosférico cercano a edificaciones y estructuras urbanas.

En entornos urbanos, el perfil logarítmico del viento no se desarrolla directamente desde el nivel del suelo debido a la presencia de edificaciones y obstáculos que modifican significativamente el comportamiento del flujo atmosférico cercano a la superficie. Dentro de esta región urbana, el viento presenta recirculaciones, separación del flujo y estructuras turbulentas asociadas a la interacción mecánica entre el aire y la rugosidad superficial. Como consecuencia, el perfil logarítmico comienza a desarrollarse de manera más definida por encima de la subcapa directamente influenciada por los obstáculos urbanos, razón por la cual se incorpora la altura de desplazamiento (d) dentro de la formulación atmosférica utilizada para representar el comportamiento vertical del viento en zonas urbanizadas (Oke, 1987; Stull, 1988).

2.2.4 Ley exponencial de Hellmann

Además del perfil logarítmico, existen formulaciones empíricas utilizadas para estimar la variación vertical de la velocidad del viento a diferentes alturas cuando no se dispone de mediciones atmosféricas directas. Una de las expresiones más utilizadas corresponde a la ley exponencial de Hellmann, ampliamente aplicada en estudios meteorológicos, energía eólica y caracterización atmosférica (Arya, 2001).

$$U(z) = U_{ref} \left(\frac{z}{z_{ref}} \right)^\alpha \quad (2.2)$$

donde:

$U(z)$: velocidad del viento a la altura z (m/s),

U_{ref} : velocidad de referencia medida a una altura conocida (m/s),

z : altura de interés (m),

z_{ref} : altura de referencia (m),

α : exponente de Hellmann asociado a las condiciones de rugosidad superficial.

El valor del exponente α depende de las características del terreno y de las condiciones atmosféricas presentes en la región de estudio. Superficies urbanas densificadas suelen presentar valores mayores debido al incremento de rugosidad y fricción mecánica sobre el flujo atmosférico.

Sin embargo, tanto la ley de Hellmann como el perfil logarítmico representan aproximaciones idealizadas del comportamiento atmosférico, ya que asumen condiciones relativamente homogéneas y perfiles medios de velocidad. En entornos urbanos complejos, el flujo cercano a la superficie puede presentar recirculaciones, turbulencia, canalización y variabilidad direccional que no siempre son representados adecuadamente mediante estas formulaciones simplificadas (Oke, 1987).

Bajo este contexto, las mediciones experimentales directas adquieren especial relevancia para caracterizar el comportamiento real del viento dentro de la capa límite urbana y evaluar la disponibilidad efectiva de viento útil para ventilación natural.

2.2.5 Teoría de similitud de Monin–Obukhov (MOST)

La teoría de similitud de Monin–Obukhov, conocida como *Monin–Obukhov Similarity Theory* (MOST), constituye uno de los principales fundamentos utilizados para describir el comportamiento turbulento y los perfiles atmosféricos dentro de la capa superficial atmosférica (Stull, 1988).

Esta teoría establece que las propiedades dinámicas y térmicas del flujo cercano a la superficie pueden describirse mediante relaciones adimensionales asociadas al intercambio de momentum y calor entre superficie y atmósfera. MOST considera simultáneamente los efectos de fricción mecánica y estabilidad atmosférica sobre el comportamiento turbulento del flujo.

Uno de los parámetros fundamentales de esta teoría corresponde a la longitud de Monin–Obukhov (L), utilizada para caracterizar el régimen de estabilidad atmosférica:

$$L = - \frac{u_*^3 \bar{\theta}_v}{\kappa g \overline{w' \theta'_v}} \quad (2.3)$$

donde:

L : longitud de Monin–Obukhov (m),

u_* : velocidad de fricción (m/s),

$\bar{\theta}_v$: temperatura potencial virtual media (K)

κ : constante de von Kármán

g : aceleración gravitacional (m/s²)

$\overline{w' \theta'_v}$: flujo turbulento vertical de calor sensible.

La estabilidad atmosférica influye directamente sobre la distribución vertical del viento, la intensidad turbulenta y la capacidad de mezcla dentro de la capa superficial atmosférica. Bajo condiciones convectivas, el flujo atmosférico puede presentar alta variabilidad y turbulencia asociada al calentamiento superficial, mientras que condiciones neutras y parcialmente estables suelen favorecer perfiles de viento más organizados y con menor dispersión turbulenta. Estas diferencias entre los regímenes estable, neutro e inestable, así como la desviación del perfil ideal dentro de la subcapa rugosa urbana, condicionan la disponibilidad de viento cerca del suelo (Figuras 2.5 y 2.6).

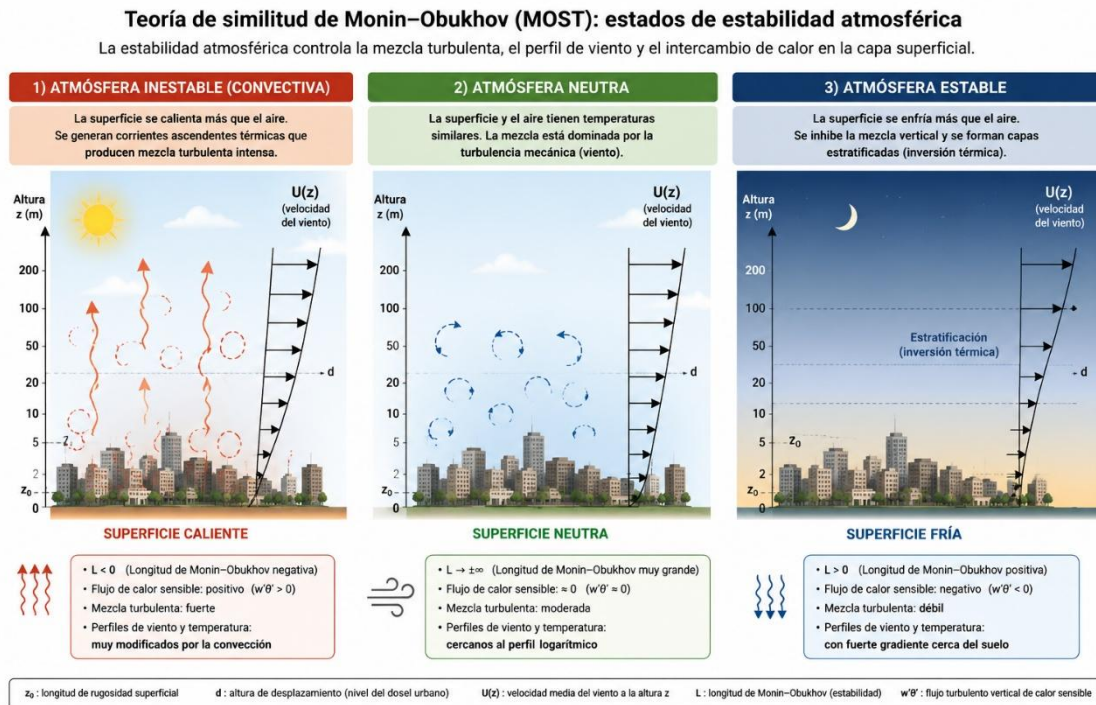


Figura 2. 5. Regímenes de estabilidad atmosférica según la teoría de similitud de Monin–Obukhov (MOST) y su influencia sobre la mezcla turbulenta y el perfil vertical del viento en entornos urbanos.

Fuente: Elaboración propia con base en Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*; Arya, S. P. (2001). *Introduction to Micrometeorology*; y Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*.

En entornos urbanos, estas condiciones adquieren especial relevancia debido a que el comportamiento del viento útil para ventilación natural depende directamente del régimen atmosférico presente cerca de la superficie. Como consecuencia, la estabilidad atmosférica puede modificar significativamente la disponibilidad, dirección y organización del flujo utilizado en estrategias pasivas de ventilación.

La Figura 2. 5 muestra esquemáticamente los principales regímenes de estabilidad atmosférica descritos por MOST, mientras que la Figura 2. 6 presenta una comparación conceptual entre el perfil logarítmico idealizado y el comportamiento observado del viento dentro de la subcapa rugosa urbana, donde la presencia de obstáculos modifica significativamente el desarrollo del flujo atmosférico cercano a la superficie.

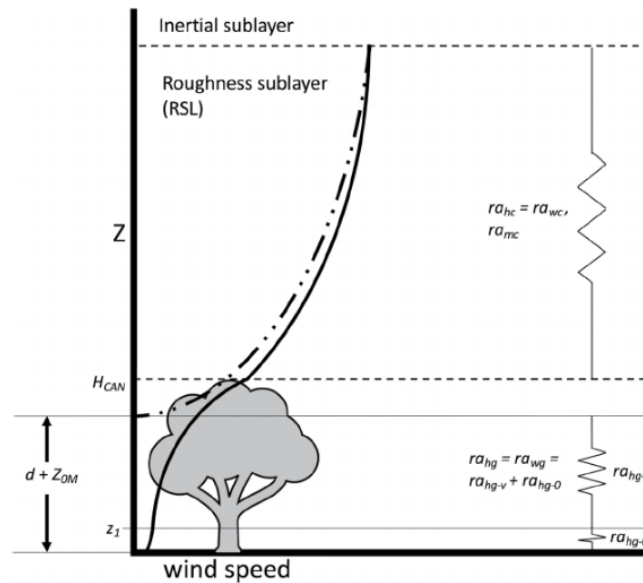


Figura 2. 6. Comparación conceptual entre el perfil logarítmico idealizado de MOST y el perfil de viento observado dentro de la subcapa rugosa urbana.

2.3 Rugosidad urbana y flujo cercano al suelo

La rugosidad urbana corresponde al efecto generado por edificaciones y elementos superficiales sobre el comportamiento del flujo atmosférico cercano al suelo. En entornos urbanos, la presencia de obstáculos modifica la distribución vertical del viento y favorece el desarrollo de turbulencia mecánica dentro de la capa límite atmosférica (Oke, 1987).

A diferencia de superficies homogéneas ideales, las ciudades presentan configuraciones geométricas complejas que dificultan la representación del flujo atmosférico mediante parámetros únicos de rugosidad superficial. Como consecuencia, el comportamiento del viento urbano suele presentar alta variabilidad espacial y temporal, particularmente en los primeros metros sobre la superficie (Grimmond & Oke, 1999).

2.3.1 Subcapa urbana rugosa

La subcapa urbana rugosa corresponde a la región atmosférica directamente influenciada por edificaciones y obstáculos urbanos. Dentro de esta zona, el flujo presenta desviaciones respecto al perfil logarítmico ideal debido a la interacción entre el viento y la geometría urbana (Oke, 1987).

La extensión de esta región depende de la densidad y altura de las edificaciones presentes en el entorno. En zonas urbanas densificadas, la subcapa rugosa puede abarcar varias veces la altura promedio de la capa urbana de edificaciones, modificando significativamente el comportamiento del viento cercano a la superficie. La altura y densidad de las edificaciones determinan así una zona inferior irregular y una región superior donde el flujo comienza a recuperar un comportamiento más uniforme (Figura 2.7).

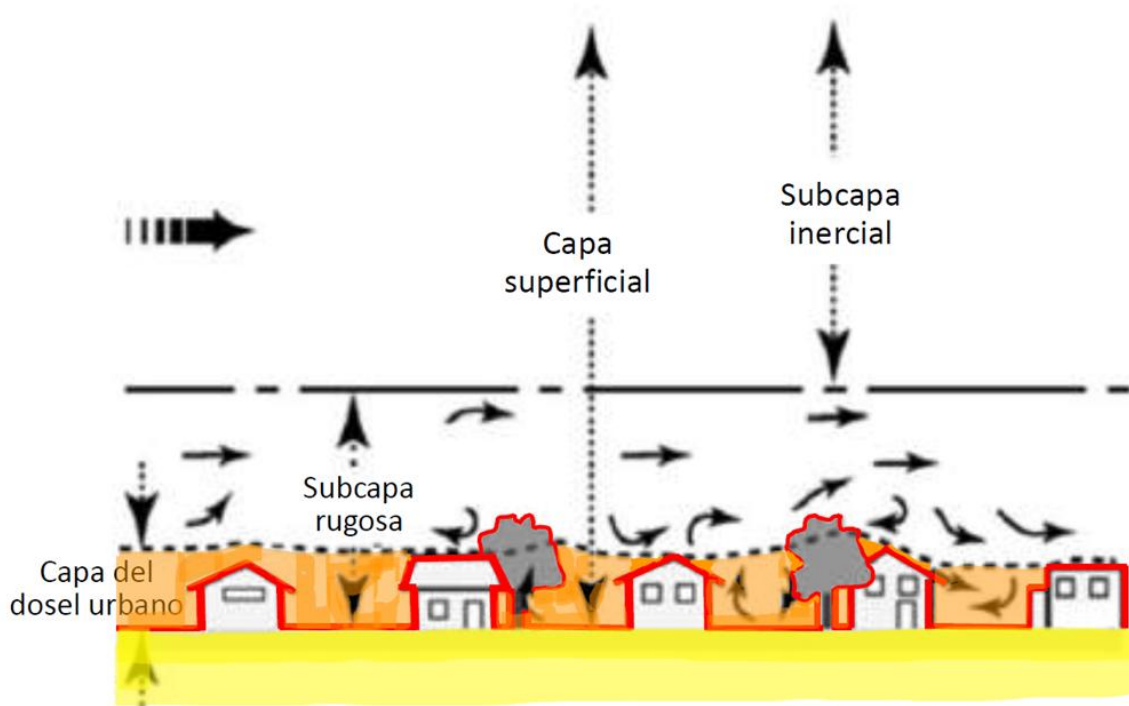


Figura 2. 7. Representación de capa rugosa. Adaptada de (Oke, 1987)

2.3.2 Obstáculos urbanos

Los obstáculos urbanos modifican localmente el flujo atmosférico mediante fenómenos de separación, recirculación, wakes turbulentos y canalización del viento. Estas interacciones dependen de la geometría, orientación y distribución espacial de los elementos urbanos (Stull, 1988).

Como consecuencia, el flujo cercano al suelo puede presentar aceleraciones locales, variaciones direccionales y estructuras turbulentas difíciles de representar mediante aproximaciones atmosféricas simplificadas. Bajo estas condiciones, la caracterización experimental del viento adquiere especial relevancia para analizar el comportamiento real del flujo urbano.

2.3.3 Canalización del viento

La canalización del viento corresponde a la modificación local del flujo atmosférico generada por la geometría urbana y la disposición espacial de edificaciones y corredores urbanos. Este fenómeno ocurre cuando el aire es forzado a desplazarse a través de espacios confinados o parcialmente restringidos, produciendo cambios en velocidad y dirección del flujo cercano a la superficie (Oke, 1987).

En entornos urbanos, calles estrechas, pasillos entre edificaciones y diferencias geométricas pueden favorecer aceleraciones locales del viento debido a efectos de confinamiento aerodinámico. Como consecuencia, ciertas regiones urbanas pueden presentar velocidades superiores respecto a zonas adyacentes, aun bajo condiciones generales de viento reducido.

La intensidad de la canalización depende de factores como orientación de calles respecto al viento predominante, relación altura–ancho de corredores urbanos y configuración geométrica del entorno

construido. Estas condiciones generan distribuciones espaciales altamente variables del flujo atmosférico dentro de la ciudad (Stull, 1988).

La canalización del viento adquiere relevancia en sistemas de ventilación pasiva debido a que puede modificar localmente la disponibilidad y dirección del flujo utilizado para ventilación natural. Bajo ciertas configuraciones urbanas, este fenómeno puede producir aceleraciones, desviaciones o zonas de resguardo según la orientación y continuidad de los corredores urbanos (Figura 2.8).

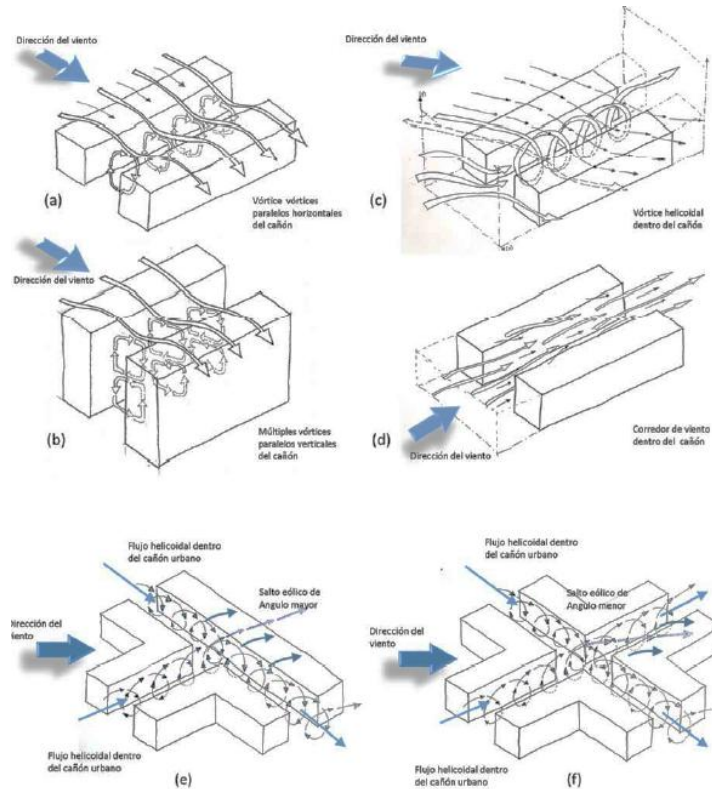


Figura 2. 8. Ejemplo de canalizaciones urbanas, propuesto por Oke, T.R

2.3.4 Turbulencia urbana

La turbulencia urbana corresponde al comportamiento irregular y fluctuante del flujo atmosférico generado por la interacción entre viento y rugosidad superficial urbana. A diferencia de flujos atmosféricos ideales o uniformes, el viento dentro de entornos urbanos presenta variaciones continuas de velocidad y dirección asociadas a procesos de mezcla turbulenta (Arya, 2001).

La presencia de edificaciones y obstáculos favorece la generación de turbulencia mecánica mediante separación del flujo, interacción de estelas y gradientes locales de velocidad. Como consecuencia, el comportamiento del viento cercano a la superficie puede presentar alta variabilidad espacial y temporal, particularmente dentro de la subcapa rugosa urbana.

Además de la turbulencia mecánica, las diferencias térmicas superficiales también pueden contribuir al desarrollo de movimientos convectivos y mezcla atmosférica, especialmente durante periodos diurnos de fuerte calentamiento superficial.

En entornos urbanos densificados, la turbulencia modifica significativamente la estabilidad y organización del flujo atmosférico, afectando la disponibilidad de viento útil para ventilación natural y dificultando la representación del comportamiento aerodinámico mediante perfiles simplificados.

2.3.5 Efectos de estela

Los efectos de estela (wake effects) corresponden a las perturbaciones generadas en el flujo atmosférico aguas abajo de un obstáculo debido a la separación y recirculación del aire. Estas regiones presentan reducción local de velocidad y aumento de turbulencia respecto al flujo incidente (Stull, 1988).

En entornos urbanos, las edificaciones producen continuamente wakes que modifican la dirección y organización del viento cercano a la superficie. La interacción entre múltiples obstáculos puede generar patrones aerodinámicos complejos y altamente variables, particularmente dentro de la subcapa urbana rugosa.

Estos fenómenos adquieren relevancia para la ventilación natural debido a que pueden alterar significativamente la disponibilidad y comportamiento del flujo de aire alrededor de las edificaciones. Detrás de cada obstáculo se forma una región de recirculación y menor velocidad, cuya extensión depende de la geometría urbana y de las características del flujo incidente (Figura 2.9).

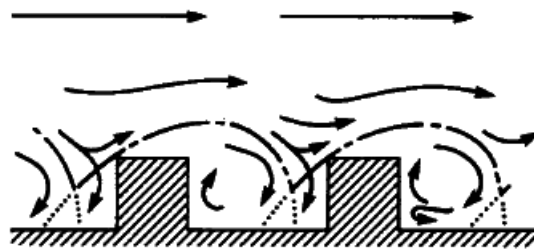


Figura 2. 9. Esquema de comportamiento de efecto estela en contorno urbano

2.4 Microclima urbano

Las modificaciones aerodinámicas y térmicas generadas por el entorno construido producen condiciones atmosféricas locales distintas respecto al comportamiento regional de la atmósfera. Como consecuencia, variables como velocidad del viento, temperatura y estabilidad atmosférica pueden presentar comportamientos altamente heterogéneos dentro de zonas urbanizadas (Oke, 1987).

En entornos urbanos densificados, la interacción entre rugosidad superficial, geometría urbana y procesos térmicos modifica simultáneamente la dinámica del flujo atmosférico y los mecanismos de intercambio energético cercanos a la superficie. Bajo estas condiciones, el comportamiento del viento urbano no depende únicamente de las condiciones meteorológicas regionales, sino también de la configuración local del entorno construido.

Estas interacciones adquieren especial relevancia para la ventilación pasiva debido a que la disponibilidad de viento útil y las condiciones térmicas exteriores se encuentran directamente influenciadas por el microclima urbano presente alrededor de las edificaciones.

2.4.1 Isla térmica urbana

La isla térmica urbana corresponde al incremento de temperatura observado en zonas urbanizadas respecto a áreas rurales o periféricas circundantes, fenómeno asociado a modificaciones del balance energético superficial producidas por el entorno construido (Oke, 1982).

Este fenómeno se relaciona con la presencia de superficies impermeables, reducción de vegetación, almacenamiento térmico en materiales urbanos y limitada disipación energética nocturna. Como consecuencia, las ciudades pueden presentar temperaturas superficiales y ambientales superiores respecto a regiones menos urbanizadas, particularmente durante periodos nocturnos (Santamouris, 2013).

En ciudades mexicanas, diversos estudios de clima urbano han documentado que la densificación urbana y la modificación de la cobertura superficial alteran significativamente las condiciones térmicas y dinámicas del aire cercano a la superficie (Martínez-Arroyo et al.). Estas condiciones pueden favorecer persistencia térmica nocturna, reducción de ventilación atmosférica y acumulación energética en el entorno urbano. Este efecto presenta una distribución espacial heterogénea en la Megalópolis de México, con mayor intensidad en las zonas de urbanización más consolidada (Figura 2.10).

La isla térmica urbana adquiere relevancia en el presente estudio debido a que las condiciones térmicas exteriores modifican simultáneamente el comportamiento de la envolvente y la dinámica atmosférica cercana a la superficie, afectando la disponibilidad de ventilación natural y la disipación térmica interior.

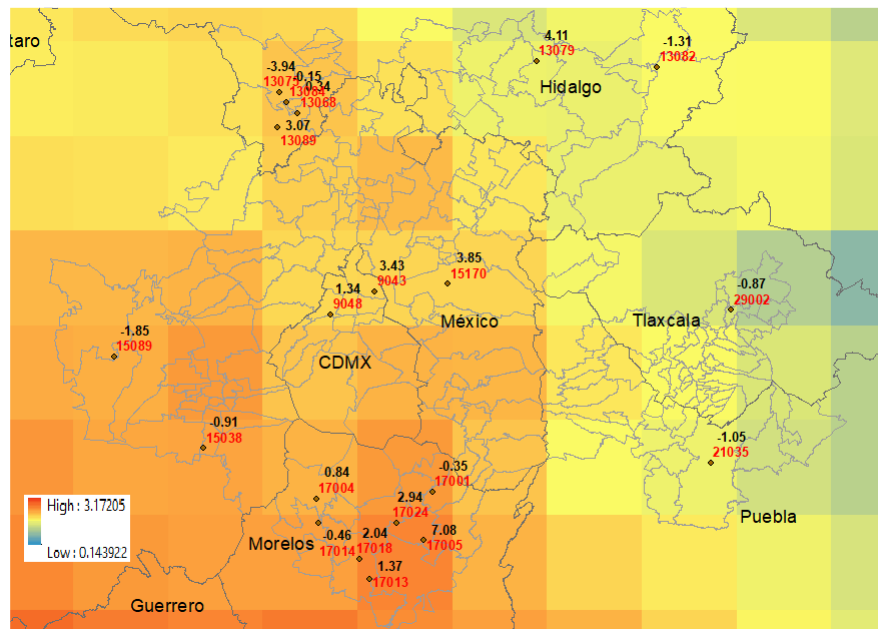


Figura 2. 10. Intensidad espacial de la isla de calor urbana (ICU) en la Megalópolis México durante el periodo 1950–2020.

La Figura 2. 10 muestra la distribución espacial de la intensidad de la isla de calor urbana (ICU) dentro de la Megápolis de México durante el periodo 1950–2020. Se observa una mayor intensificación térmica en las zonas urbanizadas centrales, particularmente alrededor de la Ciudad de México y sectores del centro–sur de la megalópolis, incluyendo regiones del estado de Morelos, evidenciando la influencia del entorno urbano sobre las condiciones microclimáticas regionales.

2.4.2 Acumulación térmica superficial

Las superficies urbanas modifican continuamente el balance energético local mediante procesos de absorción, almacenamiento y liberación de calor. Materiales como concreto, asfalto y cubiertas impermeables presentan alta capacidad de almacenamiento térmico, favoreciendo incrementos de temperatura superficial durante periodos de radiación solar intensa (Oke, 1987).

Como consecuencia, parte de la energía absorbida durante el día puede liberarse progresivamente hacia el ambiente durante horarios nocturnos, modificando las condiciones térmicas cercanas a la superficie y contribuyendo a la persistencia del calentamiento urbano. Estos procesos adquieren especial relevancia en zonas densificadas donde predominan superficies artificiales expuestas a radiación solar directa.

La acumulación térmica superficial influye simultáneamente sobre el comportamiento de la envolvente urbana y sobre las condiciones atmosféricas cercanas a la superficie, afectando los mecanismos de disipación térmica y ventilación natural presentes en el entorno construido.

2.4.3 Disponibilidad de viento útil

El análisis de la capa límite atmosférica, la rugosidad urbana y el microclima permite establecer que la ventilación pasiva no depende únicamente de la existencia de aberturas o dispositivos de captación de aire. Su desempeño está condicionado por la forma en que el viento se modifica antes de llegar a la edificación, así como por las condiciones térmicas del entorno urbano inmediato. Desde la meteorología de capa límite, el flujo cercano al suelo responde a la fricción superficial, la estabilidad atmosférica y los intercambios de calor entre superficie y atmósfera (Stull, 1988; Garratt, 1992). En zonas urbanas, estas interacciones se intensifican por la presencia de edificaciones, vialidades, obstáculos y superficies con alta capacidad de almacenamiento térmico (Oke, 1987; Barlow, 2014).

En entornos urbanos densificados, el viento cercano al suelo puede presentar reducción o aumento de velocidad, cambios frecuentes de dirección, recirculaciones, efectos de estela y variaciones turbulentas asociadas a la geometría del entorno construido. Diversos estudios han señalado que la rugosidad superficial modifica el perfil vertical del viento y genera condiciones locales distintas a las registradas en estaciones meteorológicas regionales (Oke, 1987; Grimmond & Oke, 1999). Esta diferencia es relevante porque los sistemas pasivos dependen directamente de la energía ambiental disponible en el sitio, especialmente de la velocidad, dirección y estabilidad del flujo incidente.

Asimismo, las condiciones térmicas exteriores influyen en la capacidad de enfriamiento de la ventilación natural. En ambientes urbanos cálidos, el aire que ingresa a la vivienda puede encontrarse afectado por acumulación térmica superficial, isla de calor urbana y baja disipación nocturna, reduciendo el potencial de enfriamiento pasivo durante ciertos periodos del día (Oke, 1982; Santamouris, 2013). Bajo estas condiciones, la ventilación puede favorecer la renovación de aire y la mezcla interior, pero su capacidad para disminuir la temperatura dependerá de la relación entre el aire exterior disponible, la carga térmica almacenada en la envolvente y la distribución interna del calor.

Esta condición es especialmente importante en las torres de viento. Aunque estos dispositivos pueden inducir captación o extracción de aire mediante diferencias de presión y gradientes térmicos, su desempeño real depende de variables ambientales y urbanas específicas. Bahadori (1985) destacó la importancia de la velocidad del viento, la orientación y la geometría de la torre, mientras que estudios recientes han mostrado que su desempeño varía según la dirección del flujo incidente, la configuración geométrica y las condiciones de operación evaluadas mediante ensayos experimentales o (CFD) (Calautit & Hughes, 2014; Hedayat et al., 2015).

Por lo anterior, la ventilación pasiva debe analizarse como un sistema acoplado entre atmósfera, entorno urbano, vivienda y envolvente térmica. Esta interpretación justifica la necesidad de caracterizar experimentalmente el comportamiento del viento y las condiciones térmicas reales del caso de estudio antes de establecer condiciones de frontera para la modelación CFD. Así, el análisis atmosférico desarrollado en este capítulo sirve como fundamento para la metodología experimental

presentada en el Capítulo 3, donde se describen la instrumentación empleada, el monitoreo higrotérmico, la caracterización del viento mediante vehículo aéreo no tripulado (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) y la selección de condiciones representativas para la simulación numérica.

2.5 Fundamentos de transferencia de calor en recintos

2.5.1 Intercambio térmico superficie-aire

En los recintos, las superficies interiores intercambian energía térmica mediante dos mecanismos principales: convección con el aire interior y radiación con las demás superficies que delimitan el espacio. Cuando la temperatura de una superficie es mayor que la temperatura del ambiente interior, esta contribuye al calentamiento del recinto; cuando es menor, puede favorecer la remoción de calor.

En balances térmicos simplificados, las contribuciones convectiva y radiativa pueden representarse mediante coeficientes equivalentes, siempre que ambos mecanismos se formulen respecto a una diferencia de temperatura común o equivalente. De esta manera, el coeficiente total interior de transferencia de calor para una superficie i se expresa como:

$$h_{t,i} = h_{c,i} + h_{r,i} \quad (2.4)$$

Donde:

$h_{t,i}$ = coeficiente total interior de transferencia de calor de la superficie i (W/m^2K)

$h_{c,i}$ = coeficiente convectivo interior de la superficie i (W/m^2K)

$h_{r,i}$ = coeficiente radiativo equivalente interior de la superficie i (W/m^2K)

Esta representación lineal permite incorporar ambos mecanismos en el balance energético superficial sin perder su interpretación física. El coeficiente caracteriza el intercambio convectivo entre la superficie y el aire, mientras que representa de manera equivalente el intercambio radiativo entre las superficies interiores del recinto (Incropera et al., 2007; Howell et al., 2010; ASHRAE, 2021). Los fundamentos para estimar y se presentan en los apartados 2.5.2 y 2.5.3, respectivamente.

2.5.2 Radiación térmica interior

La radiación térmica interior se consideró como uno de los mecanismos de intercambio de calor entre las superficies del cuarto crítico. Este fenómeno ocurre debido a la diferencia de temperatura absoluta entre las superficies interiores, como techo, muros y piso, y el entorno térmico del recinto. Para integrarlo al modelo superficie-aire planteado en el apartado anterior, el intercambio radiativo se representó mediante un coeficiente radiativo equivalente $h_{r,i}$.

Este coeficiente permite expresar la radiación térmica, originalmente no lineal, en una forma lineal compatible con el modelo de carga térmica por superficie. La formulación se basa en la linealización de la ley de Stefan-Boltzmann para superficies grises-difusas, procedimiento común en transferencia de calor cuando se requiere incorporar la radiación dentro de balances térmicos simplificados de recintos (Incropera et al., 2007; Howell et al., 2010; Modest, 2013).

El intercambio radiativo neto por unidad de área puede expresarse como:

$$q''_{r,i} = \varepsilon_{ef,i} \sigma (T_{s,i,K}^4 - T_{r,i,K}^4) \quad (2.5)$$

Donde:

$q''_{r,i}$ = flujo radiativo neto por unidad de área de la superficie i (W/m^2)
 $\varepsilon_{ef,i}$ = emisividad efectiva interior de la superficie i
 σ = constante de Stefan–Boltzmann ($5.670 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)
 $T_{s,i,K}$ = temperatura superficial interior absoluta de la superficie i (K)
 $T_{r,i,K}$ = temperatura radiativa efectiva del entorno interior (K)

Debido a que la radiación térmica depende de temperaturas absolutas, las temperaturas medidas en grados Celsius se convirtieron a Kelvin mediante:

$$T_K = T_{^{\circ}C} + 273.15 \quad (2.6)$$

Donde:

T_K = temperatura absoluta (K)
 $T_{^{\circ}C}$ = temperatura en grados Celsius ($^{\circ}C$)

Esta conversión es necesaria porque la ley de Stefan–Boltzmann utiliza temperatura absoluta. El uso directo de grados Celsius en la ecuación radiativa produciría valores físicamente incorrectos, ya que el término principal depende de T^4 en Kelvin (Incropera et al., 2007; Modest, 2013).

Para integrar la radiación dentro del modelo de transferencia superficie-aire, el intercambio radiativo se linealizó mediante un coeficiente equivalente:

$$q''_{r,i} = h_{r,i}(T_{s,i,K} - T_{r,i,K}) \quad (2.7)$$

Donde:

$q''_{r,i}$ = flujo radiativo neto por unidad de área (W/m^2)
 $h_{r,i}$ = coeficiente radiativo equivalente interior de la superficie i ($W/m^2 K$)
 $T_{s,i,K}$ = temperatura superficial interior absoluta (K)
 $T_{r,i,K}$ = temperatura radiativa efectiva del entorno interior (K)

Esta expresión permite representar el intercambio radiativo en una forma similar a la ley de enfriamiento de Newton. No sustituye el fenómeno físico real, sino que lo convierte en una formulación lineal equivalente, útil para combinar posteriormente radiación y convección dentro del coeficiente total de transferencia de calor (Incropera et al., 2007; ASHRAE, 2021).

A partir de la linealización de la ley de Stefan–Boltzmann, el coeficiente radiativo equivalente se estimó mediante:

$$h_{r,i} = \varepsilon_{ef,i} \sigma (T_{s,i,K} + T_{r,i,K}) (T_{s,i,K}^2 + T_{r,i,K}^2) \quad (2.8)$$

Donde:

$h_{r,i}$ = coeficiente radiativo equivalente interior de la superficie i ($W/m^2 K$)
 $\varepsilon_{ef,i}$ = emisividad efectiva interior de la superficie i
 σ = constante de Stefan–Boltzmann ($5.670 \times 10^{-8} W/m^2 K^4$)
 $T_{s,i,K}$ = temperatura superficial interior absoluta de la superficie i (K)
 $T_{r,i,K}$ = temperatura radiativa efectiva del entorno interior (K)

Esta ecuación proviene de factorizar la diferencia $T_{s,i,K}^4 - T_{r,i,K}^4$ y expresarla como un producto proporcional a $(T_{s,i,K} - T_{r,i,K})$. La forma resultante permite obtener un coeficiente radiativo equivalente dependiente de la temperatura absoluta de la superficie y del entorno radiativo. Este tratamiento es ampliamente utilizado en transferencia de calor para simplificar el intercambio radiativo entre superficies cuando se requiere integrarlo a balances térmicos lineales (Incropera et al., 2007; Howell et al., 2010; Modest, 2013).

2.5.3 Convección natural en superficies interiores

La convección es el mecanismo de transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente. En recintos con velocidades interiores reducidas y sin movimiento mecánico impuesto, el intercambio se produce principalmente mediante convección natural. En este fenómeno, las diferencias de temperatura generan variaciones de densidad en el aire y fuerzas de flotabilidad que inducen su movimiento.

El flujo de calor convectivo por unidad de área puede representarse mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$q''_{c,i} = h_{c,i}(T_{s,i} - T_{ref}) \quad (2.9)$$

Donde:

$q''_{c,i}$ = flujo de calor convectivo por unidad de área de la superficie i (W/m^2)

$h_{c,i}$ = coeficiente convectivo interior de la superficie i (W/m^2K)

$T_{s,i}$ = temperatura superficial interior medida de la superficie i ($^{\circ}C$)

T_{ref} = temperatura de referencia de confort ($^{\circ}C$)

El coeficiente $h_{c,i}$ no constituye una propiedad constante del material, sino un parámetro que depende del régimen de flujo, las propiedades del aire, la geometría, la diferencia de temperatura y la orientación de la superficie. En convección natural interior, la orientación influye directamente en la estabilidad y el desarrollo de la capa límite térmica (Awbi, 2003; Incropera et al., 2007; ASHRAE, 2021).

En un muro caliente, el aire cercano aumenta su temperatura, disminuye su densidad y asciende a lo largo de la superficie, formando una capa límite térmica vertical. En un piso caliente, la flotabilidad favorece la formación de corrientes y plumas térmicas ascendentes, lo que intensifica la mezcla convectiva. En cambio, cuando el techo es la superficie caliente, el aire de mayor temperatura tiende a permanecer en la parte superior del recinto, produciendo una condición térmicamente estable y una menor mezcla con el resto del volumen interior.

Por consiguiente, para superficies más calientes que el aire y bajo condiciones geométricas y térmicas comparables, puede establecerse cualitativamente la siguiente relación:

$$h_{c,piso} > h_{c,muro} > h_{c,techo} \quad (2.10)$$

Donde:

$h_{c,piso}$ = coeficiente convectivo interior asociado al piso caliente (W/m^2K)

$h_{c,muro}$ = coeficiente convectivo interior asociado a muros calientes (W/m^2K)

$h_{c,techo}$ = coeficiente convectivo interior asociado al techo caliente (W/m^2K)

2.5.4 Cargas térmicas internas

Además de la carga térmica asociada a la envolvente, el recinto puede recibir aportes de calor generados dentro del espacio. Estas contribuciones se denominan cargas internas y provienen principalmente de ocupantes, iluminación y equipos eléctricos. En este apartado se establece únicamente el procedimiento metodológico para incorporarlas al balance térmico del cuarto crítico; la sustitución numérica y su interpretación se presentan en el Capítulo 4.

Las cargas internas se dividieron en carga sensible y carga latente. La carga sensible incrementa directamente la temperatura del aire interior, mientras que la carga latente está asociada a la humedad liberada al ambiente, principalmente por los ocupantes. Esta distinción es común en análisis de Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC), donde las ganancias térmicas internas se clasifican según su efecto sobre la temperatura seca y el contenido de humedad del aire interior (ASHRAE, 2021).

La carga interna sensible total se expresó como:

$$Q_{int,s} = Q_{oc,s} + Q_{ilum} + Q_{eq} \quad (2.11)$$

Donde:

$Q_{int,s}$ = carga interna sensible total (W)

$Q_{oc,s}$ = carga sensible generada por ocupantes (W)

Q_{ilum} = carga sensible generada por iluminación (W)

Q_{eq} = carga sensible generada por equipos eléctricos (W)

Esta expresión corresponde a un balance de ganancias internas sensibles. En análisis térmico de edificios, las cargas por ocupación, iluminación y equipos se suman como aportes de calor al recinto, debido a que finalmente se transforman en energía térmica dentro del espacio acondicionado o evaluado (ASHRAE)

La carga sensible por ocupantes se estimó mediante:

$$Q_{oc,s} = N_{oc} q_{s,oc} \quad (2.12)$$

Donde:

$Q_{oc,s}$ = carga sensible generada por ocupantes (W)

N_{oc} = número de ocupantes

$q_{s,oc}$ = carga sensible por ocupante (W/persona)

La carga térmica asociada a ocupantes depende del nivel metabólico, actividad, vestimenta y condiciones ambientales. Para fines metodológicos, los valores de referencia se seleccionan de tablas de ganancias térmicas internas reportadas por ASHRAE para ocupantes en condiciones de actividad ligera o reposo (ASHRAE, 2021).

La carga latente por ocupantes se expresó como:

$$Q_{oc,l} = N_{oc} q_{l,oc} \quad (2.13)$$

Donde:

$Q_{oc,l}$ = carga latente generada por ocupantes (W)

N_{oc} = número de ocupantes

$q_{l,oc}$ = carga latente por ocupante (W/persona)

La carga latente representa el aporte de humedad al ambiente interior, principalmente por respiración y transpiración. Aunque no incrementa directamente la temperatura de bulbo seco, sí modifica el

estado higrotérmico del aire y puede influir en la sensación térmica y en la capacidad de enfriamiento del sistema (ASHRAE, 2021).

Para la iluminación, se consideró que la potencia eléctrica consumida se transforma prácticamente en calor dentro del recinto:

$$Q_{ilum} = P_{ilum} \quad (2.14)$$

Donde:

Q_{ilum} = carga sensible generada por iluminación (W)

P_{ilum} = potencia eléctrica instalada o utilizada por iluminación (W)

Cuando existan equipos eléctricos dentro del recinto, su aporte sensible puede estimarse mediante:

$$Q_{eq} = \sum_{j=1}^m P_{eq,j} f_{u,j} \quad (2.15)$$

Donde:

Q_{eq} = carga sensible generada por equipos eléctricos (W)

$P_{eq,j}$ = potencia eléctrica del equipo j (W)

$f_{u,j}$ = factor de uso del equipo j

Esta expresión permite incorporar equipos con operación intermitente mediante un factor de uso. En caso de no existir equipos relevantes durante el periodo evaluado, este término puede declararse nulo o no considerado, siempre que se justifique metodológicamente.

Por lo tanto, la carga interna total se puede expresar como:

$$Q_{int} = Q_{int,s} + Q_{oc,l} \quad (2.16)$$

Donde:

Q_{int} = carga interna total (W)

$Q_{int,s}$ = carga interna sensible total (W)

$Q_{oc,l}$ = carga latente generada por ocupantes (W)

En esta investigación, las cargas internas se incorporan como complemento de la carga térmica asociada a la envolvente. Su inclusión permite construir el balance térmico total del recinto antes de evaluar la capacidad potencial de ventilación natural.

2.5.5 Balance térmico total del recinto

La carga térmica total del recinto se define como la suma de la carga sensible aportada por la envolvente interior y las cargas internas generadas dentro del espacio. Esta integración permite establecer la potencia térmica que debe ser removida para aproximar el cuarto crítico a la condición de referencia de confort definida en el apartado 3.9.1.

La carga térmica sensible total se expresó como:

$$Q_{tot,s} = Q_{env} + Q_{int,s} \quad (2.17)$$

Donde:

$Q_{tot,s}$ = carga térmica sensible total del recinto (W)

Q_{env} = carga térmica sensible aportada por la envolvente interior (W)

$Q_{int,s}$ = carga interna sensible total (W)

Esta ecuación corresponde a un balance energético simplificado del recinto, donde la carga total sensible resulta de sumar la contribución de la envolvente y las ganancias internas. (ASHRAE, 2021; Incropera et al., 2007).

Cuando se requiere considerar también el componente latente asociado a ocupantes, la carga total puede expresarse como:

$$Q_{tot} = Q_{tot,s} + Q_{oc,l} \quad (2.18)$$

Donde:

Q_{tot} = carga térmica total del recinto, incluyendo componente latente (W)

$Q_{tot,s}$ = carga térmica sensible total (W)

$Q_{oc,l}$ = carga latente generada por ocupantes (W)

Esta expresión permite distinguir entre la carga sensible, directamente relacionada con la reducción de temperatura del aire, y la carga latente, asociada al contenido de humedad del recinto. En el análisis de ventilación natural, esta distinción es importante porque la remoción de calor sensible depende principalmente de la diferencia de temperatura entre aire interior y exterior, mientras que la carga latente requiere considerar el estado psicrométrico del aire (ASHRAE, 2021).

Para fines metodológicos, la carga total sensible del recinto se utilizará como referencia principal para evaluar la capacidad de remoción de calor mediante ventilación natural:

$$Q_{rem} \approx Q_{tot,s} \quad (2.19)$$

Q_{rem} = carga térmica sensible que debe removerse del recinto (W)

$Q_{tot,s}$ = carga térmica sensible total del recinto (W)

Esta aproximación permite comparar de forma directa la carga térmica sensible con la potencia de enfriamiento que podría proporcionar el intercambio de aire por ventilación natural. La aplicación numérica de este balance, así como la comparación entre aportes de envolvente e internos, se desarrolla en el Capítulo 4.

2.5.6 Remoción de calor sensible mediante ventilación natural

La capacidad potencial de ventilación natural se estima con el propósito de comparar la carga térmica sensible del recinto con la cantidad de calor que podría removerse mediante el ingreso de aire exterior.

Este análisis permite establecer si el viento disponible, bajo determinadas condiciones de temperatura y caudal, tendría capacidad suficiente para contribuir a la reducción térmica del cuarto crítico.

La remoción de calor sensible por ventilación se estimó mediante el balance de energía del flujo de aire:

$$Q_{vent} = \rho c_p \dot{V} (T_{int} - T_{ext}) \quad (2.20)$$

Donde:

Q_{vent} = potencia sensible removida por ventilación natural (W)

ρ = densidad del aire (kg/m^3)

c_p = calor específico del aire a presión constante (J/kgK)

$\dot{V}$ = caudal volumétrico de aire (m^3/s)

T_{int} = temperatura del aire interior ($^{\circ}C$)

T_{ext} = temperatura del aire exterior ($^{\circ}C$)

Esta ecuación proviene del balance de energía sensible aplicado a un flujo de aire. Su uso es común en ventilación y acondicionamiento ambiental para estimar la potencia térmica asociada al intercambio de aire entre interior y exterior (ASHRAE, 2021; Etheridge & Sandberg, 1996; Awbi, 2003).

La ecuación anterior solo representa enfriamiento sensible cuando se cumple:

$$T_{int} > T_{ext} \quad (2.21)$$

Donde:

T_{int} = temperatura del aire interior ($^{\circ}C$)

T_{ext} = temperatura del aire exterior ($^{\circ}C$)

Si $T_{int} \leq T_{ext}$, la ventilación natural no remueve calor sensible del recinto; por el contrario, puede mantener la temperatura interior o incluso introducir calor. Este criterio es fundamental para evitar interpretar todo movimiento de aire como enfriamiento efectivo.

El caudal volumétrico inducido por una abertura puede estimarse mediante:

$$\dot{V} = A_{ef} v_{ef} \quad (2.22)$$

Donde:

$\dot{V}$ = caudal volumétrico de aire (m^3/s)

A_{ef} = área efectiva de abertura (m^2)

v_{ef} = velocidad efectiva normal a la abertura (m/s)

Esta expresión corresponde a la relación básica entre área, velocidad y caudal volumétrico. En ventilación natural, el valor efectivo de velocidad debe representar la componente útil del viento respecto a la abertura, ya que no toda velocidad medida en el entorno contribuye directamente al ingreso de aire al recinto (Etheridge & Sandberg, 1996; Awbi, 2003).

Debido a que el viento en entornos urbanos no es constante, se incorporó un factor de disponibilidad o intermitencia del flujo:

$$\dot{V}_{prom} = f_v \dot{V} \quad (2.23)$$

Donde:

$\dot{V}_{prom}$ = caudal volumétrico promedio efectivo (m^3/s)

f_v = factor de disponibilidad temporal del viento útil.

$\dot{V}$ = caudal volumétrico instantáneo (m^3/s)

Este factor permite representar que el viento útil no actúa de manera continua durante todo el periodo de evaluación. En sistemas pasivos, esta consideración es importante porque la capacidad de remoción térmica depende no solo de la velocidad máxima o instantánea, sino de la persistencia temporal del flujo en dirección favorable (Etheridge & Sandberg, 1996; Awbi, 2003).

La potencia sensible promedio removida por ventilación se expresó como:

$$Q_{vent,prom} = \rho c_p \dot{V}_{prom} (T_{int} - T_{ext}) \quad (2.24)$$

Donde:

$Q_{vent,prom}$ = potencia sensible promedio removida por ventilación natural (W)

ρ = densidad del aire (kg/m³)

c_p = calor específico del aire a presión constante (J/kgK)

$\dot{V}_{prom}$ = caudal volumétrico promedio efectivo (m³/s)

T_{int} = temperatura del aire interior (°C)

T_{ext} = temperatura del aire exterior (°C)

Esta expresión representa la capacidad sostenida de remoción térmica por ventilación natural, considerando la intermitencia del viento. Para comparar esta capacidad con la carga térmica del recinto se utiliza el siguiente criterio:

$$Q_{vent,prom} \geq Q_{tot,s} \quad (2.25)$$

Donde:

$Q_{vent,prom}$ = potencia sensible promedio removida por ventilación natural (W)

$Q_{tot,s}$ = carga térmica sensible total del recinto (W)

Cuando se cumple esta condición, la ventilación natural tendría potencial suficiente para compensar la carga sensible del recinto bajo las condiciones evaluadas. Si no se cumple, la ventilación puede contribuir parcialmente a la descarga térmica, pero no sería suficiente por sí sola para sostener la condición de confort.

De forma complementaria, la intensidad de ventilación se evaluó mediante renovaciones de aire por hora, Air Changes per Hour (ACH):

$$ACH = \frac{\dot{V} 3600}{V_{rec}} \quad (2.26)$$

Donde:

ACH = renovaciones de aire por hora (h⁻¹)

$\dot{V}$ = caudal volumétrico de aire (m³/s)

V_{rec} = volumen del recinto (m³)

El indicador ACH permite expresar la intensidad de ventilación en relación con el volumen del espacio. Aunque no determina por sí solo el enfriamiento, sí permite comparar escenarios de renovación de aire y evaluar si el caudal disponible es bajo, moderado o alto respecto al tamaño del recinto (ASHRAE, 2021; Awbi, 2003).

Para considerar la intermitencia del viento, también puede definirse:

$$ACH_{prom} = \frac{\dot{V}_{prom} 3600}{V_{rec}} \quad (2.27)$$

Donde:

ACH_{prom} = renovaciones de aire por hora promedio efectivas (h⁻¹)

$\dot{V}_{prom}$ = caudal volumétrico promedio efectivo (m³/s)

V_{rec} = volumen del recinto (m³)

Este indicador permite representar la ventilación realmente disponible durante el periodo de análisis, no solo la ventilación instantánea asociada a una ráfaga o condición puntual de viento.

Finalmente, si se desea estimar el caudal requerido para remover una carga sensible dada, se puede despejar:

$$\dot{V}_{req} = \frac{Q_{tot,s}}{\rho c_p (T_{int} - T_{ext})} \quad (2.28)$$

Donde:

$\dot{V}_{req}$ = caudal volumétrico requerido para remover la carga sensible (m^3/s)

$Q_{tot,s}$ = carga térmica sensible total del recinto (W)

ρ = densidad del aire (kg/m^3)

c_p = calor específico del aire (J/kgK)

T_{int} = temperatura del aire interior ($^{\circ}C$)

T_{ext} = temperatura del aire exterior ($^{\circ}C$)

Esta ecuación permite comparar la demanda térmica del recinto con el caudal que tendría que estar disponible para removerla mediante ventilación natural. Su aplicación es especialmente útil para evaluar si el viento medido en sitio puede compensar la carga térmica o si solo puede contribuir de forma parcial.

En síntesis, la metodología propuesta permite conectar tres elementos fundamentales: la carga térmica estimada a partir de la envolvente y las cargas internas, el caudal de aire disponible por ventilación natural y la capacidad real del viento para remover calor sensible. Los resultados numéricos, escenarios comparativos y discusión de suficiencia se presentan en el Capítulo 4.

2.6 Carta bioclimática de Givoni

La carta bioclimática de Givoni se incorporó como herramienta metodológica para evaluar si las condiciones ambientales del caso de estudio eran compatibles con estrategias pasivas de acondicionamiento térmico, particularmente ventilación natural y posible operación de una torre de viento. Su uso permitió relacionar la temperatura del aire y la humedad relativa con zonas de confort, ventilación natural, enfriamiento evaporativo, masa térmica, ventilación nocturna y sobrecalentamiento, de acuerdo con el enfoque bioclimático propuesto por Givoni (1992, 1998).

En esta investigación, la carta no se utilizó únicamente para identificar si el ambiente se encontraba dentro o fuera de confort. Su finalidad principal fue determinar si las condiciones psicrométricas del aire disponible podían favorecer que el movimiento de aire inducido por ventilación natural o por una torre de viento contribuyera a disminuir la temperatura percibida y acercar al habitante a condiciones de confort térmico. Esta evaluación fue necesaria porque el desempeño de una torre de viento o ventilación pasiva no depende solo de su geometría o de la presencia de viento exterior, sino también de la temperatura, humedad relativa, potencial evaporativo y carga térmica acumulada en la vivienda (Givoni, 1998).

Este criterio permitió comparar, desde una base bioclimática, el principio de funcionamiento de las torres de viento en contextos cálidos y secos de Medio Oriente con su posible aplicación en una vivienda ubicada en clima cálido subhúmedo. En los sistemas tradicionales, la torre suele operar en conjunto con masa térmica, sombreamiento, patios, qanats o enfriamiento evaporativo, condiciones que favorecen la reducción térmica cuando existe baja humedad relativa y suficiente potencial de enfriamiento pasivo (Bahadori, 1985; Givoni, 1998). En cambio, en climas subhúmedos, la humedad

ambiental, la baja velocidad del viento y el calor almacenado en la envolvente pueden comprometer el desempeño de una torre si se considera como estrategia aislada.

Esta decisión metodológica se apoya en revisiones recientes sobre windcatchers, donde se señala que su desempeño puede verse condicionado por el clima de aplicación y que su integración con tecnologías pasivas o de baja energía puede mejorar el rendimiento térmico del sistema. Por ello, la carta de Givoni se empleó como criterio previo para identificar si la ventilación natural podía considerarse una estrategia suficiente o si debía complementarse con reducción de ganancias solares, control de temperatura superficial en cubierta, ventilación nocturna, enfriamiento evaporativo o estrategias híbridas (Li et al., 2025).

En este capítulo se presenta la construcción metodológica de la carta base, su ajuste a las condiciones climáticas de Morelos y el procedimiento de integración de datos monitoreados. Los resultados derivados de ubicar los registros reales dentro del diagrama se presentan posteriormente en el Capítulo 4, donde se analiza la distribución de los datos respecto a las zonas bioclimáticas definidas.

2.6.1 Fundamento bioclimático.

La carta bioclimática de Givoni se fundamenta en la representación de condiciones ambientales dentro de un diagrama psicrométrico, relacionando temperatura de bulbo seco y contenido de humedad del aire. A partir de esta relación se delimitan zonas asociadas a confort térmico y estrategias pasivas de acondicionamiento ambiental, como ventilación natural, enfriamiento evaporativo, masa térmica y ventilación nocturna (Givoni, 1992, 1998).

El uso de esta herramienta resulta pertinente para estudios de vivienda en clima cálido, debido a que permite identificar si las condiciones ambientales pueden resolverse mediante estrategias pasivas o si se desplazan hacia regiones de sobrecalentamiento. A diferencia de un análisis basado únicamente en temperatura, la carta incorpora la influencia de la humedad, variable clave para evaluar la efectividad del movimiento de aire y del enfriamiento evaporativo (ASHRAE, 2021; Nicol & Humphreys, 2002).

Para el presente estudio, la carta se utilizó como criterio de clasificación metodológica. Primero se definió el modelo gráfico y las zonas bioclimáticas; posteriormente, los datos reales de temperatura y humedad relativa fueron incorporados para evaluar si el ambiente interior y exterior se aproximaba a condiciones de confort, ventilación natural o sobrecalentamiento. Esta separación permitió distinguir entre el procedimiento metodológico descrito en este capítulo y la interpretación de resultados desarrollada en el Capítulo 4.

2.7 Relación higrotérmica entre temperatura del aire y humedad relativa

Con el propósito de evaluar la relación entre la temperatura del aire y la humedad relativa en los espacios monitoreados, se aplicó un análisis de regresión lineal y correlación de Pearson para cada sensor. Este procedimiento permitió cuantificar la tendencia de variación de la humedad relativa ante cambios de temperatura durante el periodo completo de monitoreo.

Este comportamiento permite interpretar la relación temperatura–humedad relativa como un indicador de recuperación higrotérmica durante los periodos de enfriamiento natural. Para cuantificar esta relación se empleó un modelo lineal de la forma:

$$HR_i = \beta_0 + \beta_1 T_i + \varepsilon_i \quad (2.29)$$

Donde:

HR_i = humedad relativa registrada en el instante i (%)
 T_i = temperatura del aire registrada en el instante i (°C)
 β_0 = ordenada al origen del modelo lineal (%)
 β_1 = pendiente de la relación temperatura-humedad (%/°C)
 ε_i = término residual del ajuste lineal

La pendiente β_1 representa la variación promedio de humedad relativa por cada grado Celsius de cambio en la temperatura del aire. Cuando $\beta_1 < 0$, la relación es inversa; es decir, por cada 1°C de aumento térmico, la humedad relativa disminuye en $|\beta_1|$ puntos porcentuales. De forma equivalente, por cada 1°C de disminución de temperatura, la humedad relativa tiende a recuperarse en aproximadamente $|\beta_1|$ puntos porcentuales.

La asociación lineal entre temperatura y humedad relativa se evaluó mediante el coeficiente de correlación de Pearson sección 3.8.2.:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T}) (HR_i - \bar{HR})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (HR_i - \bar{HR})^2}} \quad (2.30)$$

Donde:

r = coeficiente de correlación de Pearson
 T_i = temperatura del aire registrada en el instante i (°C)
 HR_i = humedad relativa registrada en el instante i (%)
 $\bar{T}$ = temperatura promedio del conjunto de datos (°C)
 $\bar{HR}$ = humedad relativa promedio del conjunto de datos (%)
 n = número total de registros analizados

Valores negativos de r indican una relación inversa entre temperatura y humedad relativa. Mientras más cercano sea r a -1 , mayor será la asociación lineal inversa entre ambas variables. Este coeficiente se utilizó para comparar la intensidad de la relación higrotérmica entre el sensor exterior y los sensores interiores.

De manera complementaria, se calculó el coeficiente de determinación:

$$R^2 = r^2 \quad (2.31)$$

Donde:

R^2 = coeficiente de determinación
 r = coeficiente de correlación de Pearson

2.7.1 Recuperación de %HR / °C

$$HR_i = \beta_0 + \beta_1 T_i + \varepsilon_i \quad (2.32)$$

Como el modelo se ajusta con la temperatura como variable independiente, la pendiente β_1 indica el cambio promedio de humedad relativa por cada 1°C de incremento térmico:

$$\beta_1 = \frac{\Delta HR}{\Delta T} \quad (2.33)$$

Donde:

β_1 = pendiente del modelo lineal (%HR/°C)

ΔHR = variación de humedad relativa (%)

ΔT = variación de temperatura del aire (°C)

Cuando $\beta_1 < 0$, la relación entre temperatura y humedad relativa es inversa. Por lo tanto, la recuperación estimada de humedad relativa por cada 1°C de reducción térmica se calculó como:

$$R_{HR,1^\circ C} = -\beta_1 \quad (2.34)$$

Donde:

$R_{HR,1^\circ C}$ = recuperación estimada de humedad relativa por cada 1°C de reducción térmica (%HR/°C)

β_1 = pendiente del modelo lineal temperatura-humedad relativa (%HR/°C)

Esta expresión permite interpretar la pendiente negativa del modelo de forma positiva para los periodos de enfriamiento. Es decir, si la temperatura disminuye 1°C, la humedad relativa tiende a incrementarse en aproximadamente $R_{HR,1^\circ C}$ puntos porcentuales. Este indicador facilita comparar la respuesta higrotérmica entre el ambiente exterior y los distintos espacios interiores monitoreados.

En esta investigación, el análisis se aplicó de manera individual para cada sensor, con el fin de comparar el comportamiento del ambiente exterior, planta baja, escaleras y recámaras de planta alta. De esta manera, fue posible identificar no solo la relación estadística entre temperatura y humedad relativa, sino también la sensibilidad higrotérmica de cada espacio constructivo monitoreado.

El procedimiento se sustentó en el uso de regresión lineal por mínimos cuadrados y correlación de Pearson, herramientas ampliamente empleadas en análisis de datos ambientales y estadística aplicada. En términos físicos, su interpretación se apoya en los fundamentos psicrométricos del aire húmedo, donde la humedad relativa se modifica en función de la temperatura y de la presión de saturación del vapor de agua (ASHRAE, 2021; Montgomery & Runger, 2014; Wilks, 2011).

2.8 Fundamentos y configuración numérica para la modelación CFD

La dinámica de fluidos computacional se empleó como herramienta para analizar el comportamiento térmico y aerodinámico de la vivienda bajo dos configuraciones geométricas: el caso base y el caso con torre de viento. Su aplicación permitió representar los campos interiores de velocidad, presión y temperatura, identificar zonas de baja velocidad y recirculación, y analizar el intercambio térmico entre el aire y las superficies interiores de la envolvente.

La selección de CFD como método de análisis se sustentó en estudios previos sobre torres de viento y sistemas tipo *windcatcher*, en los cuales esta herramienta se ha utilizado para evaluar el ingreso de aire, la ventilación cruzada, las estructuras de recirculación y el desempeño térmico de dispositivos pasivos en edificaciones (Hughes et al., 2012; Jomehzadeh et al., 2017; Montazeri y Montazeri, 2018). Esta aplicación también se encuentra respaldada por la revisión de Li et al. (2025), quienes analizaron 147 estudios sobre *windcatchers* y señalaron el uso recurrente de CFD, frecuentemente acompañado de procedimientos de validación experimental.

La combinación de simulación y medición resultó particularmente relevante para el presente estudio, debido a que la vivienda analizada presenta interacción entre el viento exterior, las aberturas, la geometría interior y las superficies de la envolvente sometidas a calentamiento. Por esta razón, las condiciones de frontera del modelo se establecieron a partir de información obtenida mediante vehículos aéreos no tripulados, sensores higrotérmicos y termografía infrarroja cuantitativa.

El comportamiento del aire se describió mediante las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía en su formulación promediada de Reynolds. Los efectos no resueltos de las fluctuaciones turbulentas se representaron mediante modelos RANS de dos ecuaciones. Para evaluar la sensibilidad de la solución al tratamiento de la turbulencia se consideraron los modelos estándar, realizable y estándar.

El aire se trató como un fluido newtoniano e incompresible, bajo una condición estacionaria representativa del periodo crítico de monitoreo. La variación de la densidad asociada con la flotación térmica se incorporó exclusivamente en el término gravitacional mediante la aproximación de Boussinesq. El transporte de energía se resolvió junto con el flujo y el intercambio radiativo entre las superficies interiores se representó mediante el modelo *Surface-to-Surface*.

Las ecuaciones se discretizaron mediante el método de volúmenes finitos y se resolvieron en ANSYS Fluent. Los fundamentos correspondientes al acoplamiento presión-velocidad y a los esquemas de discretización se presentan en los apartados posteriores.

La finalidad del modelo no fue reproducir la evolución temporal completa del viento ni del almacenamiento térmico de la envolvente, sino obtener una representación física y numéricamente consistente de una condición crítica monitoreada. Esta formulación permitió comparar las dos configuraciones bajo condiciones equivalentes y determinar posteriormente el efecto atribuible a la incorporación de la torre de viento.

2.8.1 Convenciones de notación matemática

Para facilitar la interpretación de las ecuaciones gobernantes y distinguir la naturaleza matemática de cada variable, se adoptaron las convenciones de notación presentadas en la Tabla 2.1. Estas convenciones se fundamentan en la norma ISO 80000-2:2019, la cual establece criterios para la representación de símbolos matemáticos empleados en ciencias naturales y tecnología. En particular, la norma distingue escalares, vectores y tensores mediante su configuración tipográfica y admite la notación indicial para representar sus componentes.

En el presente trabajo se adoptó la negrita cursiva como representación principal de los vectores, debido a que proporciona una notación compacta y compatible con la barra superior utilizada para indicar el promedio de Reynolds. La flecha superior se reconoce como una alternativa válida, pero no se empleará simultáneamente con la negrita. Para los tensores de segundo orden se utilizarán símbolos en negrita y, cuando se expresen mediante componentes, dos subíndices.

Elemento matemático	Convención adoptada	Ejemplos	Interpretación
Magnitud escalar	Letra cursiva, sin negrita ni flecha	$p, T, \rho, \mu, k, \varepsilon, \omega$	Magnitud definida por un valor
Vector	Letra en negrita con flecha superior	$\vec{v}, \vec{g}, \vec{x}$	Magnitud con módulo, dirección y componentes espaciales
Tensor de segundo orden	Letra en negrita, sin flecha	τ, R	Magnitud cuyas componentes relacionan dos direcciones
Componente de un vector	Letra cursiva con un subíndice	u_i, g_i, x_i	Componente (i) de un vector
Componente de un tensor	Letra cursiva con dos subíndices	τ_{ij}, R_{ij}	Componente (ij) de un tensor de segundo orden

Promedio de Reynolds de un escalar	Barra horizontal superior	$\bar{p}, \bar{T}$	Valor medio de una variable escalar
Promedio de Reynolds de un vector	Barra horizontal sobre el vector identificado mediante negrita y flecha	$\vec{\bar{u}}$	Vector velocidad media
Fluctuación de una variable escalar	Prima superior	p', T'	Desviación instantánea respecto de su valor medio
Fluctuación de una variable vectorial	Vector en negrita con flecha y prima superior	$\vec{u}'$	Vector de fluctuaciones turbulentas de velocidad
Producto escalar	Punto centrado	$\vec{u} \cdot \vec{v}$	Operación entre vectores cuyo resultado es un escalar
Producto diádico	Símbolo ($\otimes$)	$\vec{u}' \otimes \vec{v}^1$	Operación entre vectores cuyo resultado es un tensor de segundo orden
Operador diferencial	Símbolo nabla	∇	Operador utilizado para representar gradiente, divergencia y otras operaciones espaciales
Derivada parcial	Símbolo (partial)	$\frac{\partial}{\partial t}$	Variación de una magnitud respecto del tiempo o de una coordenada espacial

Tabla 2. 1 Convenciones de notación empleadas en la formulación CFD

2.8.2 Revisión metodológica CFD en torres de viento y selección del modelo RANS

En el presente trabajo, la revisión metodológica tuvo como finalidad identificar los procedimientos empleados en investigaciones comparables, sin asumir previamente la superioridad de un modelo de turbulencia determinado. Para ello se consideraron los siguientes aspectos:

- formulación numérica y software utilizado;
- condición estacionaria o transitoria;
- modelo de cierre turbulento;
- incorporación del transporte de energía y de la flotación térmica;
- tratamiento de la capa límite atmosférica;
- condiciones de frontera;
- procedimiento de verificación de malla;
- método de validación experimental o analítica.

La Tabla 2.2 presenta una síntesis de los trabajos seleccionados. Se incluyeron tanto estudios internacionales como antecedentes desarrollados en México, con el propósito de identificar configuraciones metodológicas pertinentes para la modelación de una vivienda con torre de viento.

Referencia	Sistema analizado	Software CFD	Metodología CFD reportada	Régimen temporal	Validación / soporte
Kalantar (2009)	Torre de viento Baud-Geer en Yazd, Irán	C++ y Fluent	Programa en C++ para resolver ecuaciones y uso de Fluent	Estacionario	Comparación con mediciones de temperatura y velocidad dentro y fuera de la torre.
Saffari y Hosseinnia (2009)	Torre de viento con superficies húmedas	Open Foam	Simulación CFD bifásica Euleriano–Lagrangiana para enfriamiento evaporativo.	Estacionario	Comparación con soluciones analíticas reportadas para diseños tipo Bahadori.
Montazeri y Montazeri (2018)	Edificio con captador de viento en cubierta	ANSYS Fluent	CFD 3D acoplado exterior–interior; RANS; modelo $k - \varepsilon$ realizable; análisis de aberturas de salida.	Estacionario	Validación con mediciones en túnel de viento.
Khan y Janajreh (2017)	Torre de viento de tres lados en Masdar City, Abu Dhabi	ANSYS Fluent	Volúmenes finitos; RANS; $k - \varepsilon$ realizable; Boussinesq; fase discreta para niebla; SIMPLE; segundo orden Upwind.	No indicado explícitamente	Evaluación con velocidades de viento de 1 a 5 m/s.
Calautit y Hughes (2016)	<i>Windcatcher</i> con tubos de calor	ANSYS Fluent	CFD de torre de viento con dispositivo de transferencia de calor; comparación con túnel de viento y prueba de campo.	Estacionario	Buena correlación entre CFD y mediciones experimentales.
Obeidat et al. (2021)	Torre de viento para estación en Aqaba, Jordania	Autodesk CFD	Modelo $k - \varepsilon$ estándar presión de salida 0 Pa; velocidad de entrada de 6.5 m/s; análisis de alternativas geométricas.	Estacionario	Refinamiento de malla y evaluación de distribución de flujo.
Moosavi et al. (2020)	Chimenea solar integrada con <i>windcatcher</i> y rociado de agua	ANSYS-CFX	Modelo $k - \varepsilon$ estándar	Estacionario	Comparación contra sistema experimental a escala
Reyes et al. (2013)	Torre–habitación en clima cálido-seco de México	CFD	Familia $k - \varepsilon$ RANS	Estacionario	Antecedente directo de torre–habitación aplicada a México.
Reyes et al. (2015)	Torre–Habitación	ANSYS Fluent + PIV	Comparó $k-\varepsilon$, estándar, realizable, RNG, $(k-\omega)$ y SST	3D, Estacionario	Velocidad y líneas de corriente
Calautit et al. (2017)	Torre–Habitación	FLUENT / CFD	RANS $k-\varepsilon$, estándar	3D, Estacionario, ABL	Velocidad, temperatura, IAQ
Ahmed et al. (2017)	Torre–Habitación	FLUENT / CFD	RANS $k-\varepsilon$, realizable	3D, permanente, ABL	Velocidad, temperatura, IAQ
Montazeri et al. (2017/2018)	Edificio con windcatcher y aberturas de salida	CFD 3D RANS	RANS de alta resolución; reportado en matriz como $k-\varepsilon$, realizable	3D, estacionario, RANS	Caudal inducido, edad del aire, eficiencia de cambio de aire

Ghoulem et al. (2020)	PDEC-WC en invernadero	ANSYS Fluent v18.1 / CFD + experimental	k-ε, estándar	3D, estacionario RANS	Temperatura, velocidad, HR, spray evaporativo
Flores Salas (2018)	Edificio CIICAp con torre(s) de viento	ANSYS Fluent / CFD + monitoreo	RANS k-ε, realizable	3D, Estacionario	Velocidad, temperatura, ACH
Carreto-Hernández et al. (2022/2023)	Torre-Habitación sin/con humidificación	CFD + experimental	Evalúa familia (k- ϵ), (k- ω), SST y DPM	3D- RANS, convección mixta – transitorio	Temperatura, velocidad, PMV, PPD, ventilación
Morales X (2025)	Torre-Habitación sin/con humidificación indirecta	ANSYS Fluent / CFD + monitoreo	RANS k-ε, realizable	3D, estacionario	Velocidad, temperatura, %HR

Tabla 2. 2 Tabla comparativa de trabajos previos- Metodología en CFD. Investigaciones citadas y utilizadas por Li et al. (2025),

En conjunto, los antecedentes muestran que la formulación RANS y los modelos de cierre de dos ecuaciones se utilizan recurrentemente en la simulación de torres de viento. Sin embargo, no se identifica un único modelo de turbulencia que resulte universalmente adecuado para todas las configuraciones geométricas y condiciones de flujo. La respuesta numérica depende del dominio, las condiciones de frontera, el tratamiento de las regiones próximas a las paredes y la interacción entre convección forzada y flotación térmica.

Por esta razón, en la presente investigación se consideraron los modelos estándar, realizable y estándar. Su comportamiento se evaluó posteriormente mediante una matriz de sensibilidad que combinó tres tamaños de malla con los tres modelos de cierre turbulento. La selección de la configuración definitiva se presenta en el capítulo de resultados, con base en la estabilidad de la solución, la independencia respecto de la malla y la concordancia con las temperaturas medidas experimentalmente

2.8.3 Dominio computacional, hipótesis y simplificaciones

El dominio computacional correspondió al volumen de *aire* contenido en la vivienda. Se incluyeron los recintos de planta baja y planta alta, la escalera y las aberturas que permiten la comunicación entre espacios. En el segundo escenario se añadió el volumen interior de la torre de viento. Los muros, el piso y la cubierta se consideraron fronteras del dominio fluido, por lo que no se resolvió la conducción de calor dentro de los elementos constructivos.

Para delimitar el modelo se adoptaron las siguientes hipótesis:

El flujo se consideró tridimensional, debido a que el aire se desplaza en las tres direcciones dentro de las habitaciones, la escalera y la torre.

- Vector velocidad $\vec{V}$

$$\vec{V} = u \hat{i} + v \hat{j} + w \hat{k}$$

se definió mediante las componentes u , v y w en las direcciones x , y y z , respectivamente.

Las simulaciones se realizaron en estado estacionario. En consecuencia, las variables del flujo no cambiaron con respecto al tiempo dentro de cada escenario:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} = 0$$

donde ϕ representa cualquiera de las variables resueltas, como la presión, la velocidad o la temperatura.

Esta consideración permitió obtener una condición estable de los campos de presión, velocidad y temperatura. Por ello, el modelo no representó las variaciones instantáneas del viento ni el calentamiento progresivo de la envolvente durante el día.

El aire se trató como un fluido newtoniano, incompresible y de baja velocidad. Sus propiedades termo-físicas se consideraron constantes, excepto la densidad en el término gravitacional, donde su variación con la temperatura se incorporó mediante la aproximación de Boussinesq. Este tratamiento permite representar la flotación térmica sin resolver un flujo completamente compresible (Versteeg & Malalasekera, 2007; ANSYS, 2024).

Las propiedades termo físicas del aire, como la viscosidad dinámica μ , el calor específico a presión constante c_p y la conductividad térmica k_t , se consideraron constantes dentro del intervalo térmico analizado. La aceleración gravitacional $\mathbf{g}$ se incorporó como fuerza de cuerpo y, debido a que el eje vertical del modelo correspondió a la dirección y , se definió como:

$$\vec{g} = \frac{(0, -9.81, 0) \text{ m}}{\text{s}^2}.$$

Las temperaturas obtenidas mediante termografía infrarroja cuantitativa se asignaron directamente a las fronteras interiores. De esta manera, el efecto térmico de la envolvente se incorporó a través del intercambio de calor entre las superficies y el aire, sin modelar el espesor ni las propiedades internas de los materiales.

El intercambio radiativo entre techo, muros y piso se consideró mediante el modelo Surface-to-Surface. Para esta formulación, las superficies se trataron como grises y difusas, mientras que el aire se consideró un medio no participante en la radiación (Howell et al., 2010; ANSYS, 2024).

Debido a las bajas velocidades del flujo, la disipación viscosa se consideró despreciable. Tampoco se incluyeron reacciones químicas, transporte de especies, partículas, condensación ni cambios de fase. La humedad relativa se utilizó en la caracterización higrotérmica y en la evaluación de confort, pero no se resolvió como una variable transportada dentro del dominio CFD.

Con estas consideraciones se conservaron los fenómenos principales del caso de estudio: conservación de masa, transporte de cantidad de movimiento, transferencia de energía, turbulencia, flotación térmica y radiación entre superficies (Patankar, 1980; Versteeg & Malalasekera, 2007).

2.8.4 Ecuaciones gobernantes del modelo CFD

El comportamiento del aire dentro de la vivienda se representó mediante las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía. Estas expresiones permiten calcular, respectivamente, el balance de aire dentro del dominio, la distribución de presión y velocidad, y el transporte de calor entre las superficies y el aire interior (Patankar, 1980; Versteeg & Malalasekera, 2007).

Las expresiones se presentan en notación vectorial e indicial. La forma vectorial permite identificar de manera compacta los mecanismos físicos incluidos en cada balance, mientras que la notación indicial facilita su representación por componentes espaciales y constituye la base para aplicar posteriormente el promedio de Reynolds y los modelos de cierre turbulento (Versteeg & Malalasekera, 2007).

Las ecuaciones se simplificaron conforme a las hipótesis establecidas en el apartado 2.8.3: flujo tridimensional, aire newtoniano e incompresible, propiedades termofísicas constantes y solución en estado estacionario. En este apartado se presentan las ecuaciones instantáneas de conservación; su transformación mediante el promedio de Reynolds se desarrolla en el apartado 2.8.5.

2.8.4.1 Conservación de masa

La conservación de masa establece que la materia no puede crearse ni destruirse dentro de un sistema. Por tanto, cualquier acumulación de masa dentro de un volumen de control debe corresponder con el flujo neto que atraviesa sus fronteras. Este principio constituye el punto de partida para describir el movimiento del aire dentro del dominio computacional (Patankar, 1980; Versteeg & Malalasekera, 2007).

La forma diferencial general de la ecuación de continuidad se expresó en notación vectorial como:

$$\underbrace{\frac{\partial \rho}{\partial t}}_{\text{Acumulación de masa}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho \vec{V})}_{\text{Flujo neto de masa}} = 0 \quad (2.35)$$

donde ρ representa la densidad del fluido, t el tiempo y $\vec{V}$ el vector velocidad. Para el presente trabajo, el vector velocidad se definió como:

$$\vec{V} = u\hat{i} + v\hat{j} + w\hat{k}$$

donde u , v y w corresponden a las componentes de velocidad en las direcciones x , y y z , respectivamente.

La misma ecuación puede expresarse mediante notación indicial como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0$$

Donde u_i representa la componente de velocidad asociada a la dirección espacial x_i .

Esta notación permite describir simultáneamente las tres direcciones coordenadas sin escribir una ecuación independiente para cada eje.

De acuerdo con las hipótesis establecidas para el modelo, el aire se consideró un fluido incompresible y las simulaciones se realizaron en estado estacionario. Bajo estas condiciones, la densidad permanece prácticamente constante y las variaciones temporales pueden despreciarse. En consecuencia, la ecuación de continuidad se simplifica a:

Forma vectorial

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0 \quad (2.36)$$

Forma indicial

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$$

2.8.4.2 Conservación de cantidad de movimiento: ecuaciones de Navier–Stokes

La conservación de cantidad de movimiento se fundamenta en la segunda ley de Newton aplicada a un volumen de control. Este principio establece que la acumulación de cantidad de movimiento dentro del volumen y su transporte a través de las superficies que lo delimitan deben equilibrarse con la resultante de las fuerzas que actúan sobre el fluido. Versteeg y Malalasekera (2007) desarrollan este balance mediante sus componentes cartesianas, considerando las contribuciones de presión, esfuerzos viscosos y fuerzas de cuerpo. De manera coincidente, Ansys, Inc. (2024a) presenta su formulación vectorial conservativa, congruente con el método de volúmenes finitos implementado en ANSYS Fluent.

En este trabajo se adoptó la forma conservativa porque permite expresar directamente el balance de cantidad de movimiento en cada volumen de control del dominio computacional. Esta formulación contabiliza la acumulación local y el flujo neto de cantidad de movimiento que atraviesa las caras de cada celda. Por ello, resulta adecuada para representar el movimiento del aire que ingresa por las aberturas, cambia de dirección entre los recintos, atraviesa la escalera y circula por la torre de viento. Asimismo, incorpora las fuerzas producidas por los gradientes de presión, los esfuerzos viscosos y las fuentes volumétricas, entre las que se encuentra la gravedad. La ecuación general de conservación de cantidad de movimiento se expresa como:

$$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \vec{S}_M \quad (2.37)$$

La interpretación de los términos de la ecuación (2.37) se resume de la siguiente manera:

Término	Interpretación física
$\frac{\partial(\rho\vec{V})}{\partial t}$	Acumulación local de cantidad de movimiento
$\nabla \cdot (\rho\vec{V} \otimes \vec{V})$	Transporte neto de cantidad de movimiento
$-\nabla p$	Fuerza producida por el gradiente de presión
$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau}$	Fuerza debida a los esfuerzos viscosos
$\vec{S}_M$	Fuentes volumétricas de cantidad de movimiento

La ecuación general de conservación de cantidad de movimiento también puede escribirse en notación indicial como:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + S_{M,i}$$

donde u_i representa la componente de velocidad en la dirección x_i , mientras que u_j corresponde a la componente asociada con la dirección de transporte. Asimismo, τ_{ij} es una componente del tensor de esfuerzos viscosos y $S_{M,i}$ representa la componente de la fuente de cantidad de movimiento en la dirección i . De acuerdo con la convención de Einstein, los índices repetidos implican una sumatoria sobre las tres direcciones espaciales.

Para establecer las ecuaciones de Navier–Stokes es necesario introducir una relación constitutiva que describa el comportamiento de los esfuerzos viscosos. Debido a que el aire se consideró un fluido newtoniano, el tensor de esfuerzos viscosos, bajo la hipótesis de Stokes, se expresó como:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right] - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \vec{V}) \mathbf{I}$$

donde μ es la viscosidad dinámica del aire, el superíndice T indica la transposición del tensor gradiente de velocidad y $\mathbf{I}$ es el tensor identidad.

En notación indicial, esta relación se expresa como:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \delta_{ij}$$

donde δ_{ij} es el delta de Kronecker. Al introducir esta relación constitutiva en el balance general de cantidad de movimiento se obtiene la formulación correspondiente a las ecuaciones de Navier–Stokes.

Para la condición de flujo incompresible se cumple:

$$\nabla \cdot \vec{V} = 0$$

Por tanto, el término relacionado con la dilatación volumétrica desaparece y el tensor de esfuerzos viscosos se simplifica como:

$$\boldsymbol{\tau} = \mu \left[\nabla \vec{V} + (\nabla \vec{V})^T \right]$$

Si, además, la viscosidad dinámica se considera constante, la divergencia del tensor de esfuerzos viscosos puede expresarse como:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = \mu \nabla^2 \vec{V}$$

Las fuerzas de cuerpo se incorporaron mediante el término fuente de cantidad de movimiento. En su forma general, la contribución gravitacional puede escribirse como:

$$\vec{S}_M = \rho \vec{g}$$

donde $\vec{g}$ es el vector de aceleración gravitacional. La gravedad es relevante en el caso de estudio porque establece la dirección vertical sobre la cual actúan las diferencias de densidad producidas por las variaciones de temperatura.

De acuerdo con las hipótesis establecidas para el modelo, la dependencia de la densidad con la temperatura se consideró exclusivamente en la fuerza de cuerpo mediante la aproximación de Boussinesq. Esta aproximación parte de la siguiente relación:

$$\rho = \rho_0 [1 - \beta(T - T_0)]$$

donde ρ_0 es la densidad de referencia, β es el coeficiente de expansión térmica, T es la temperatura local y T_0 es la temperatura de referencia.

Después de separar la contribución hidrostática correspondiente a la densidad de referencia, la fuerza de flotación térmica puede representarse como:

$$\vec{S}_B = -\rho_0\beta(T - T_0)\vec{g}$$

Cuando la temperatura local es superior a la temperatura de referencia, esta fuerza actúa en sentido contrario al vector gravitacional y representa el ascenso del aire caliente. El desarrollo y la justificación de la aproximación de Boussinesq se presentan en el apartado correspondiente; por ello, en esta sección se conserva $\vec{S}_M$ como la representación general de las fuentes de cantidad de movimiento.

Debido a que las simulaciones se realizaron en régimen estacionario, la acumulación temporal de cantidad de movimiento se consideró nula. Esta simplificación indica que las variables del flujo no cambian con el tiempo en un punto determinado. Sin embargo, la velocidad y la presión pueden continuar variando espacialmente dentro del dominio.

Por tanto, considerando un fluido newtoniano, incompresible, estacionario y con viscosidad constante, la ecuación conservativa de cantidad de movimiento empleada como base del modelo quedó expresada en forma vectorial como:

$$U\nabla \cdot (\rho_0 \vec{V} \otimes \vec{V}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \vec{S}_M \quad (2.38)$$

En esta expresión se utiliza ρ_0 porque, bajo la aproximación de Boussinesq, la densidad se considera constante en los términos de inercia y solo se permite su variación con la temperatura en la fuerza de cuerpo.

2.8.4.3 Conservación de energía

La conservación de energía se fundamenta en la primera ley de la termodinámica. En el dominio fluido, esta ecuación permitió describir el transporte de energía térmica asociado al movimiento del aire y a los gradientes de temperatura existentes entre las diferentes regiones de la vivienda (Sámano Tirado & Sen, 2009; Incropera et al., 2007; Versteeg & Malalasekera, 2007).

A diferencia de la ecuación de continuidad y de cantidad de movimiento, este balance incorpora directamente los efectos térmicos asociados al movimiento del aire y a la transferencia de calor desde la envolvente hacia el recinto.

De acuerdo con las hipótesis de flujo incompresible, propiedades constantes y velocidades reducidas, el balance de energía sensible se expresó en función de la temperatura como:

$$\underbrace{\rho C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{V} \cdot \nabla) T \right]}_{\text{Transporte de energía}} = \underbrace{\nabla \cdot (\lambda \nabla T)}_{\text{Conducción térmica}} + \underbrace{\phi}_{\text{Disipación viscosa}} + \underbrace{\underline{S_T}}_{\text{Fuente de energía}} \quad (2.39)$$

El término del lado izquierdo representa la acumulación temporal de energía sensible, mientras que:

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t}$$

Por otra parte:

$$\rho C_p (\vec{V} \cdot \nabla) T$$

representa el transporte convectivo producido por el movimiento del aire. En el caso de estudio, esta contribución describió la redistribución de energía térmica ocasionada por el aire que circuló a través de las ventanas, los espacios interiores y la torre de viento.

El primer término del lado derecho es:

$$\nabla \cdot (\lambda \nabla T)$$

Este término representa la difusión molecular de energía térmica dentro del aire, de acuerdo con la ley de Fourier. Este término no representa la conducción a través de los muros, el piso o la cubierta, debido a que los elementos sólidos no se incluyeron como dominios de conducción. El efecto térmico de la envolvente se incorporó mediante las temperaturas superficiales impuestas como condiciones de frontera. Estas condiciones generaron gradientes térmicos en el aire adyacente, cuya energía fue posteriormente redistribuida mediante difusión molecular y convección.

El segundo término corresponde a la disipación viscosa:

$$\Phi \approx 0$$

representa la conversión de energía mecánica en energía térmica causada por los esfuerzos viscosos. Debido a las bajas velocidades características de la ventilación natural, su contribución se consideró despreciable frente al transporte convectivo y la difusión térmica (Incropera et al., 2007; Versteeg & Malalasekera, 2007; Ansys, Inc., 2024a):

El último término es:

$$S_T$$

que representa una fuente volumétrica de energía.

Este término suele emplearse para modelar generación interna de calor distribuida dentro del volumen del fluido. En el presente trabajo no se consideraron fuentes térmicas volumétricas dentro del dominio de aire, debido a que las cargas térmicas se incorporaron mediante temperaturas superficiales medidas experimentalmente sobre techo, muros y piso. El intercambio radiativo S2S tampoco se incorporó como una fuente volumétrica, debido a que el aire se consideró un medio no participante. Su formulación se aplicó sobre las superficies y se desarrolla en el apartado 2.8.7.

Por tanto:

$$S_T = 0$$

Aplicando hipótesis o simplificaciones

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

A partir de las simplificaciones e hipótesis, y considerando los fenómenos dominantes del caso de estudio, la ecuación de energía se simplifica a:

$$\rho C_p (\vec{V} \cdot \nabla T) = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) \quad (2.40)$$

o en forma indicial:

$$\rho C_p u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x_i} \right)$$

Esta expresión muestra que la distribución de temperatura en el aire estuvo determinada por el transporte convectivo asociado al campo de velocidades y por la difusión térmica producida por los gradientes de temperatura. Después de aplicar el promedio de Reynolds, el transporte térmico turbulento se incorporó mediante las propiedades efectivas del flujo, como se explica en el apartado 2.8.5.

2.8.5 Tratamiento de la turbulencia y formulación RANS

Las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía desarrolladas en los apartados anteriores constituyen la base física para describir el comportamiento del aire dentro de la vivienda. En particular, las ecuaciones de Navier–Stokes representan el movimiento del fluido considerando los efectos de inercia, presión, viscosidad y gravedad, mientras que la ecuación de energía describe el transporte térmico asociado al flujo. Sin embargo, bajo condiciones turbulentas, la velocidad, la presión y la temperatura presentan fluctuaciones en el tiempo y en el espacio, lo que incrementa la complejidad de su resolución directa (Versteeg & Malalasekera, 2007; Ansys, Inc., 2024a).

En aplicaciones de ventilación natural, el aire interactúa con ventanas, puertas, cambios de sección, escaleras, superficies interiores y, en el escenario modificado, con la torre de viento. Estas interacciones pueden producir aceleraciones locales, separación del flujo, recirculación y mezclado turbulento. Por consiguiente, las variables instantáneas oscilan alrededor de valores medios.

Aunque las simulaciones se realizaron en estado estacionario, esta condición se aplicó a los campos medios calculados y no supone la ausencia de fluctuaciones turbulentas. El propósito del modelo consistió en obtener distribuciones medias de velocidad, presión y temperatura representativas de cada escenario, sin resolver individualmente las estructuras turbulentas instantáneas.

Para obtener estos campos se aplicó la descomposición de Reynolds, mediante la cual cada variable instantánea se expresa como la suma de una componente media y una componente fluctuante:

$$\begin{aligned} u_i &= \bar{u}_i + u_i' \\ p &= \bar{p} + p' \\ T &= \bar{T} + T' \end{aligned} \quad (2.41)$$

donde $\bar{u}_i$, $\bar{p}$ y $\bar{T}$ representan los valores medios de velocidad, presión y temperatura, respectivamente; mientras que u_i' , p' y T' representan sus fluctuaciones turbulentas. Por definición, el promedio temporal de estas fluctuaciones es nulo:

$$\overline{u_i'} = 0, \quad \overline{p'} = 0, \quad \overline{T'} = 0$$

Esta formulación resulta adecuada cuando el interés principal se centra en el comportamiento medio del flujo y no en la resolución individual de cada remolino presente en el dominio. En comparación con métodos transitorios de mayor resolución, el enfoque RANS permite representar los efectos

medios de la turbulencia con un costo computacional menor (Versteeg & Malalasekera, 2007; Ansys, Inc., 2024a).

Al aplicar la descomposición de Reynolds y efectuar el promedio temporal, la ecuación de continuidad para flujo incompresible conserva la forma:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0$$

Esta expresión indica que el campo medio de velocidades también debe satisfacer la conservación de masa.

La descomposición se aplicó posteriormente a la ecuación de cantidad de movimiento de Navier–Stokes presentada en el apartado 2.8.4.2. Considerando flujo incompresible, propiedades constantes y estado estacionario, la ecuación promediada se expresó en notación indicial como:

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} + \rho g_i - \frac{\partial (\rho \bar{u}_i' u_j')}{\partial x_j} \quad (2.42)$$

Los primeros términos conservan la interpretación presentada para las ecuaciones de Navier–Stokes: transporte convectivo de cantidad de movimiento, gradiente de presión, difusión viscosa y fuerza gravitacional. No obstante, el promedio de Reynolds introduce el término adicional:

$$\tau_{ij}^R = -\rho \bar{u}_i' u_j'$$

donde τ_{ij}^R representa el tensor de esfuerzos de Reynolds. Este término describe el transporte adicional de cantidad de movimiento producido por las fluctuaciones turbulentas.

Los esfuerzos viscosos y los esfuerzos de Reynolds presentan una interpretación semejante como mecanismos de transporte de cantidad de movimiento, pero poseen orígenes diferentes. Los primeros se deben a la viscosidad molecular del aire y a los gradientes de velocidad entre capas adyacentes:

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$$

En cambio, los esfuerzos de Reynolds se originan por las correlaciones entre las fluctuaciones de velocidad. Por tanto, no representan una fuerza física independiente, sino el efecto medio de la mezcla turbulenta sobre el transporte de cantidad de movimiento (Versteeg & Malalasekera, 2007).

La aparición de las correlaciones entre las fluctuaciones de velocidad introduce nuevas incógnitas que no pueden determinarse únicamente mediante las ecuaciones promediadas de conservación. Esta situación se conoce como problema de cierre de la turbulencia y hace necesaria la incorporación de un modelo adicional para relacionar los esfuerzos de Reynolds con las variables medias del flujo. El modelo de cierre utilizado se desarrolla en el apartado 2.8.6.

El promedio de Reynolds también modifica la ecuación de energía, debido a la correlación entre las fluctuaciones de velocidad y temperatura. Para las hipótesis adoptadas, su forma promediada y estacionaria puede expresarse como:

$$\rho c_p \overline{u_i} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\lambda \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i} \right) - \frac{\partial (\rho c_p \overline{u_i' T'})}{\partial x_i} \quad (2.43)$$

El término:

$$\rho c_p \overline{u_i' T'}$$

representa el transporte turbulento de energía térmica. En la formulación RANS, su efecto se incorpora mediante una difusividad turbulenta relacionada con la viscosidad turbulenta y el número de Prandtl turbulento. De esta manera, la conductividad térmica efectiva puede expresarse como:

$$\lambda_{ef} = \lambda + \frac{\mu_t c_p}{Pr_t}$$

donde μ_t es la viscosidad turbulenta y Pr_t es el número de Prandtl turbulento. Su implementación dentro del modelo de cierre se presenta en el apartado siguiente (Versteeg & Malalasekera, 2007; Ansys, Inc., 2024a).

El empleo de RANS también es consistente con los antecedentes sobre torres de viento presentados en este capítulo. Flores Salas (2023) recopiló aplicaciones CFD desarrolladas en ANSYS Fluent para diferentes configuraciones de torres de viento, en las cuales se utilizaron formulaciones RANS y modelos de la familia $k-\epsilon$ para analizar campos de velocidad, temperatura y renovación de aire. Por tanto, esta formulación resultó congruente con el objetivo de comparar el comportamiento térmico y aerodinámico medio de la vivienda en los escenarios analizados.

2.8.6 Modelo $k - \epsilon$ Estandar

La formulación RANS presentada en el apartado 2.8.5 introduce los esfuerzos de Reynolds como incógnitas adicionales. Para cerrar el sistema de ecuaciones se empleó el modelo $k-\epsilon$ estándar, un modelo de viscosidad turbulenta de dos ecuaciones que permite relacionar dichos esfuerzos con los gradientes del campo medio de velocidad. Su aplicación permitió representar el transporte medio de cantidad de movimiento y energía ocasionado por la turbulencia sin resolver de manera directa las fluctuaciones instantáneas del flujo (Chen, 1995; Versteeg & Malalasekera, 2007; Ansys, Inc., 2024a).

El modelo resuelve dos variables adicionales: la energía cinética turbulenta k , expresada en m^2/s^2 , y su tasa de disipación ϵ , expresada en m^2/s^3 . La primera cuantifica la energía contenida en las fluctuaciones de velocidad, mientras que la segunda representa la rapidez con la que esa energía se transforma en energía interna por acción de la viscosidad molecular. La energía cinética turbulenta se definió como:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.44)$$

Para relacionar los esfuerzos de Reynolds con el campo medio se utilizó la hipótesis de viscosidad turbulenta de Boussinesq. Bajo la condición de incompresibilidad adoptada, esta relación se expresó como:

$$-\rho \overline{u_i' u_j'} = \mu_t \left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (2.45)$$

donde μ_t es la viscosidad turbulenta y δ_{ij} es el delta de Kronecker. El primer término del lado derecho representa el transporte turbulento asociado a los gradientes de velocidad media, mientras que el segundo incorpora la contribución isotrópica de la turbulencia. Esta hipótesis de viscosidad turbulenta no debe confundirse con la aproximación de Boussinesq utilizada para representar la variación de densidad en el término gravitacional; ambas formulaciones comparten el nombre, pero describen fenómenos diferentes.

Para determinar k y ε se resolvieron sus ecuaciones de transporte. De acuerdo con las hipótesis de flujo estacionario, incompresible y de baja velocidad, y sin fuentes volumétricas adicionales de turbulencia, la ecuación de k se expresó como:

$$\rho \overline{u_j} \frac{\partial k}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (2.46)$$

La ecuación de ε se expresó como:

$$\rho \overline{u_j} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{\partial \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2.47)$$

En estas ecuaciones, μ representa la viscosidad dinámica molecular; σ_k y σ_ε son los números de Prandtl turbulentos asociados a la difusión de k y ε ; G_k representa la producción de energía cinética turbulenta debida a los gradientes de velocidad media; G_b corresponde a la producción o destrucción de turbulencia ocasionada por la flotación; y $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ y $C_{3\varepsilon}$ son coeficientes del modelo. Los términos $-\rho \varepsilon$ y $-C_{2\varepsilon} \rho \varepsilon^2/k$ representan la disipación de la turbulencia (Versteeg & Malalasekera, 2007; Ansys, Inc., 2024a).

La producción de energía cinética turbulenta por esfuerzos cortantes se definió como:

$$G_k = -\rho \overline{u_i' u_j'} \frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j}$$

La contribución de la flotación se vinculó con el gradiente de temperatura mediante:

$$G_b = \beta g_i \frac{\mu_t}{Pr_t} \frac{\partial \overline{T}}{\partial x_i}$$

donde β es el coeficiente de expansión térmica, g_i es la componente de la aceleración gravitacional y Pr_t es el número de Prandtl turbulento. El signo de G_b depende de la orientación del gradiente térmico

respecto a la gravedad: la estratificación inestable puede producir turbulencia, mientras que la estratificación estable puede atenuarla. Esta contribución resultó pertinente debido a las diferencias de temperatura entre superficies y aire observadas en la vivienda.

La viscosidad turbulenta se calculó localmente a partir de k y ε mediante:

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Esta magnitud no es una propiedad termo física constante del aire, sino una variable calculada en cada celda para representar el mezclado turbulento. La relación es dimensionalmente consistente, ya que μ_t posee unidades de $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$, equivalentes a $\text{Pa}\cdot\text{s}$.

En ANSYS Fluent se conservaron las constantes predeterminadas del modelo k - ε estándar:

$$C_\mu=0.09, \quad C_{1\varepsilon}=1.44, \quad C_{2\varepsilon}=1.92$$

$$\sigma_k=1.0, \quad \sigma_\varepsilon=1.3, \quad \text{Pr}_t=0.85$$

El coeficiente $C_{3\varepsilon}$ regula la contribución de la flotación en la ecuación de ε y se evalúa en función de la orientación del movimiento respecto a la gravedad. Para el tratamiento cercano a los muros se emplearon funciones de pared escalables. Este procedimiento evita resolver directamente toda la subcapa viscosa y limita el punto de evaluación de la ley de pared para impedir que la formulación se aplique fuera de su intervalo de validez cuando el primer centro de celda se ubica demasiado cerca de la superficie (Ansys, Inc., 2024a, 2024b).

La elección del modelo k - ε estándar fue congruente con el objetivo de obtener campos medios de velocidad y temperatura en espacios interiores con un costo computacional compatible con la matriz de simulaciones. Además de su uso documentado en ventilación de edificios, su desempeño se comparó con los modelos k - ε realizable y k - ω estándar bajo las mismas condiciones de frontera. La selección definitiva se sustentó posteriormente mediante la sensibilidad de malla y la comparación de las temperaturas calculadas con las mediciones experimentales, como se presenta en el capítulo de resultados.

Con este cierre, los esfuerzos de Reynolds y el transporte térmico turbulento quedaron vinculados con las variables medias resueltas. En particular, la viscosidad turbulenta μ_t obtenida mediante el modelo se incorporó tanto en la ecuación de cantidad de movimiento como en la conductividad térmica efectiva definida en el apartado 2.8.5.

2.8.7 Modelo de radiación Surface-to-Surface

Además de los mecanismos de conducción y convección descritos anteriormente, la transferencia de calor dentro de la vivienda también ocurre mediante radiación térmica entre las superficies interiores. Este mecanismo resulta relevante debido a que las mediciones termográficas mostraron diferencias significativas de temperatura entre techo, muros, piso y aire interior, especialmente durante los periodos de mayor carga térmica.

Para representar este fenómeno se empleó el modelo de radiación *Surface-to-Surface (S2S)* disponible en ANSYS Fluent. Este modelo calcula el intercambio radiativo directamente entre

superficies sólidas, considerando sus temperaturas, emisividades y orientación geométrica. Su aplicación es adecuada cuando el medio que separa las superficies puede considerarse no participante, es decir, cuando la absorción, emisión y dispersión de radiación por parte del aire son despreciables (ANSYS, 2024; Flores Salas (2018); Howell et al., 2010).

El intercambio radiativo neto entre dos superficies puede expresarse mediante:

$$Q_{ij} = A_i F_{ij} \sigma (T_i^4 - T_j^4) \quad (2.48)$$

donde:

Q_{ij} = calor radiativo intercambiado

A_i = área de la superficie emisora

F_{ij} = factor de vista entre superficies

$$\sigma = 5.67 \times \frac{10^{-8} \text{ W}}{\text{m}^2 \text{ K}^4}$$

T_i, T_j = temperaturas absolutas de las superficies

El parámetro más importante dentro de esta formulación es el **factor de vista** F_{ij} , el cual representa la fracción de energía radiativa emitida por una superficie que alcanza directamente otra superficie.

$$0 \leq F_{ij} \leq 1$$

Un valor cercano a uno indica una interacción radiativa importante entre ambas superficies, mientras que un valor cercano a cero indica una influencia reducida.

En el caso de estudio, los intercambios radiativos más relevantes ocurren entre:

- techo y piso,
- techo y muros,
- muros opuestos,
- superficies interiores de la torre de viento,
- envolvente y aire circundante.

La incorporación del modelo S2S resulta particularmente importante debido a que el monitoreo termográfico evidenció temperaturas superficiales significativamente superiores a la temperatura del aire interior. Bajo estas condiciones, parte de la energía almacenada por la envolvente no se transfiere únicamente por conducción y convección, sino también mediante radiación térmica entre las superficies del recinto.

2.8.8 Método de volúmenes finitos

Las ecuaciones de conservación desarrolladas en los apartados anteriores describen el transporte de masa, cantidad de movimiento, energía y variables turbulentas dentro del dominio computacional.

Para resolverlas numéricamente, ANSYS Fluent emplea el método de volúmenes finitos, el cual consiste en dividir el dominio en pequeñas celdas o volúmenes de control y aplicar en cada una de ellas balances conservativos de las variables transportadas (Patankar, 1980; Versteeg & Malalasekera, 2007; ANSYS, 2024).

De forma general, una ecuación de transporte para una variable escalar ϕ puede escribirse en forma integral como:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV + \oint_A \rho \phi \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\vec{A} + \int_V S_\phi dV \quad (2.49)$$

donde ρ es la densidad del fluido, ϕ representa la variable transportada, $\vec{V}$ es el vector velocidad, Γ_ϕ es el coeficiente difusivo asociado a la variable, S_ϕ es el término fuente, V es el volumen de control y A representa las caras que delimitan dicho volumen.

Por la variable ϕ representa las siguientes propiedades:

$$\begin{aligned} \phi = 1 &\Rightarrow \text{conservación de masa} \\ \phi = u, v, w &\Rightarrow \text{cantidad de movimiento} \\ \phi = T &\Rightarrow \text{energía} \\ \phi = k, \varepsilon &\Rightarrow \text{turbulencia} \end{aligned}$$

De esta manera, la misma estructura integral permite discretizar las ecuaciones que previamente fueron formuladas para masa, momentum, energía y turbulencia.

Para aclarar o desarrollar su aplicación, se puede considerar el caso de la ecuación de energía. Al tomar:

$$\phi = T$$

La forma general de transporte representa el balance térmico dentro de cada volumen de control. En el presente estudio, la ecuación de energía ya fue simplificada bajo las hipótesis de estado estacionario, flujo incompresible, disipación viscosa despreciable y ausencia de fuentes volumétricas de calor. Por ello, los términos que permanecen activos son el transporte convectivo y la difusión térmica.

El término transitorio:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho T dV$$

se anula porque las simulaciones se realizaron en estado estacionario:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$$

El término fuente:

$$\int_V S_T dV$$

también se anula porque no se definieron fuentes volumétricas de calor dentro del aire:

$$S_T = 0$$

Este término depende del problema, en el caso de estudio:

- no hay calentadores,
- no hay combustión,
- no hay resistencias eléctricas,
- no hay generación de calor dentro del volumen de aire.

La carga térmica entra por las superficies.
En cambio, el término convectivo permanece:

$$\oint_A \rho T \vec{V} \cdot d\vec{A}$$

porque representa el transporte de energía térmica debido al movimiento del aire entre las celdas del dominio. En el caso de estudio, este término describe cómo el aire que entra por las aberturas o por la torre de viento redistribuye el calor dentro de la vivienda.

También permanece el término difusivo:

$$\oint_A \lambda \nabla T \cdot d\vec{A}$$

porque existen gradientes térmicos entre las superficies calientes de la envolvente y el aire interior. Este término representa la transferencia de calor asociada a la conducción térmica dentro del balance energético del dominio.

Por tanto, para el caso térmico analizado, la ecuación general de transporte se reduce conceptualmente a:

$$\oint_A \rho T \vec{V} \cdot d\vec{A} = \oint_A \lambda \nabla T \cdot d\vec{A} \quad (2.50)$$

Transporte convectivo de calor = Difusión térmica por gradientes de temperatura

Esta interpretación permite relacionar directamente la ecuación general de Fluent con la ecuación de energía desarrollada en el apartado 2.8.4.3., evitando interpretarla como una ecuación aislada o ajena al modelo físico.

Después de la integración sobre cada volumen de control, Fluent transforma las ecuaciones diferenciales en una forma algebraica general:

$$a_P \phi_P = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b$$

donde a_P es el coeficiente asociado a la celda principal, ϕ_P es el valor de la variable en dicha celda, a_{nb} y ϕ_{nb} corresponden a los coeficientes y valores de las celdas vecinas, y b representa los términos fuente o contribuciones independientes. Esta formulación permite resolver de manera iterativa el campo de variables dentro del dominio computacional. Dicho segmento es conocido como acoplamiento de presión y velocidad.

2.8.9 Acoplamiento presión-velocidad y esquemas numéricos

Para el acoplamiento entre presión y velocidad se utilizó el algoritmo **SIMPLE** (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*), ampliamente utilizado en simulaciones de flujo incompresible. El objetivo del método consiste en corregir sucesivamente los campos de presión y velocidad hasta satisfacer simultáneamente la ecuación de continuidad y las ecuaciones de Navier-Stokes.

El procedimiento puede simplificarse de la siguiente manera:

1. Se estima un campo inicial de presión.
2. Se calculan velocidades provisionales a partir de las ecuaciones de cantidad de movimiento.
3. Se determina una corrección de presión utilizando la ecuación de continuidad.
4. Se actualizan presión y velocidades.
5. El proceso se repite hasta alcanzar convergencia.

Matemáticamente, la presión corregida puede expresarse como:

$$p^{n+1} = p^n + \alpha_p p' \quad (2.51)$$

donde:

$$\begin{aligned} p^n &= \text{presión estimada} \\ p' &= \text{corrección de presión} \\ \alpha_p &= \text{factor de relajación} \\ p^{n+1} &= \text{presión corregida} \end{aligned}$$

De forma análoga, las velocidades calculadas inicialmente se corrigen para satisfacer la ecuación de continuidad:

$$\vec{V}^{n+1} = \vec{V}^* + \vec{V}' \quad (2.52)$$

donde:

$$\begin{aligned} \vec{V}^* &= \text{velocidad provisional} \\ \vec{V}' &= \text{corrección de velocidad} \\ \vec{V}^{n+1} &= \text{velocidad corregida} \end{aligned}$$

Desde una perspectiva física, este procedimiento garantiza que la cantidad de aire que entra a cada volumen de control sea consistente con la cantidad de aire que sale, evitando acumulaciones o pérdidas artificiales de masa dentro del dominio.

Además del algoritmo SIMPLE, la discretización espacial de las ecuaciones requirió la selección de esquemas numéricos para aproximar las variables en las caras de cada volumen de control. Para la presión se empleó el esquema **PRESTO** (*Pressure Staggering Option*), recomendado para problemas donde existen gradientes de presión asociados a flotación térmica y circulación natural del aire (ANSYS, 2024).

CAPÍTULO 3. CASO DE ESTUDIO, FUNDAMENTOS METODOLÓGICOS PARA LA EXPERIMENTACIÓN

La metodología experimental se diseñó para caracterizar las condiciones reales de operación de una vivienda de interés social ubicada en clima cálido subhúmedo. A partir del planteamiento desarrollado en los capítulos anteriores, se integraron mediciones térmicas, higrotérmicas, atmosféricas y perceptuales con el propósito de analizar la relación entre la envolvente constructiva, el microclima urbano, el viento cercano a la superficie y las condiciones interiores de confort.

El enfoque metodológico se apoyó en procedimientos previamente desarrollados dentro de la misma línea de investigación. Por una parte, se retomó la evaluación a microescala del viento mediante UAV y sensores (Internet of Things, IoT), empleada para obtener datos locales de viento, temperatura y humedad relativa. Por otra parte, se incorporó la integración entre monitoreo higrotérmico continuo y percepción térmica de los ocupantes, con el fin de contrastar las condiciones ambientales medidas con la experiencia térmica reportada en la vivienda.

Con base en este planteamiento, el capítulo describe el caso de estudio, su ubicación geográfica, características climáticas, sistema constructivo y distribución arquitectónica. Posteriormente, se presenta la instrumentación experimental utilizada, las variables monitoreadas, la frecuencia de adquisición y la ubicación de sensores dentro y fuera de la vivienda. También se detalla la metodología de monitoreo con UAV, incluyendo la plataforma utilizada, las alturas de medición y el procesamiento de los datos de viento.

Asimismo, se incorpora el procedimiento de termografía infrarroja cuantitativa, considerando cámara termográfica, emisividad, delimitación de polígonos digitales y obtención de temperaturas superficiales promedio. De manera complementaria, se describe el monitoreo higrotérmico, el cálculo de indicadores derivados, el procesamiento estadístico, la construcción de rosas de viento, la aplicación de estadística circular y la integración de los datos en la carta bioclimática de Givoni, cálculo de carga térmica, fundamentos matemáticos de simulación CDF, entre otros criterios físicos que sustentan los resultados monitoreados y simulados.

3.1 Caso de estudio

El presente estudio se desarrolló en una vivienda de interés social ubicada en el municipio de Emiliano Zapata, Morelos, México, dentro de un entorno urbano caracterizado por desarrollos habitacionales densificados y limitada separación entre edificaciones.

La selección del caso de estudio respondió a la necesidad de analizar el comportamiento térmico y la ventilación pasiva bajo condiciones reales de operación dentro de un microclima urbano cálido.



Figura 3. 1. Vista aérea del segmento norte del Fraccionamiento en el cual se ubica el caso de estudio

Las observaciones iniciales realizadas en la vivienda evidenciaron episodios recurrentes de acumulación térmica, particularmente en planta alta y durante periodos vespertinos y nocturnos. A partir de estas condiciones se integró una metodología experimental basada en monitoreo higrotérmico, caracterización del viento mediante UAV y análisis del comportamiento microclimático del entorno urbano inmediato.

El enfoque experimental permitió evaluar simultáneamente la interacción entre envolvente térmica, comportamiento atmosférico cercano a la superficie y disponibilidad de ventilación natural bajo condiciones urbanas reales.

3.1.1 Ubicación geográfica

El caso de estudio se localiza en el municipio de Emiliano Zapata, al sur del estado de Morelos, México, dentro de una zona habitacional de tipo fraccionamiento periurbano. La vivienda se ubica aproximadamente en las coordenadas WGS84 [18.831490, -99.200446], a una altitud cercana a 1,249–1,272 m sobre el nivel del mar.

El entorno inmediato se caracteriza por la presencia de vialidades secundarias, viviendas compactas, vegetación dispersa y rugosidad urbana heterogénea, condiciones que modifican localmente el comportamiento del flujo atmosférico cercano a la superficie. Asimismo, la fachada principal de la vivienda presenta una orientación aproximada de 160° respecto al norte geográfico (SSE), integrando los principales vanos de ventilación natural utilizados durante el estudio.

Desde el punto de vista atmosférico, la zona de estudio se encuentra influenciada por condiciones típicas de clima cálido subhúmedo y por procesos de urbanización acelerada presentes en la región centro-sur de Morelos y su cercanía con el sistema montañoso denominado Sierra de Montenegro. Estas características convierten al sitio en un escenario representativo para analizar el comportamiento de estrategias pasivas de ventilación en vivienda social urbana.



Figura 3. 2. Ubicación geográfica y orientación de la casa de estudio. Vista fachada principal orientación normal 160°

3.1.2 Características climáticas

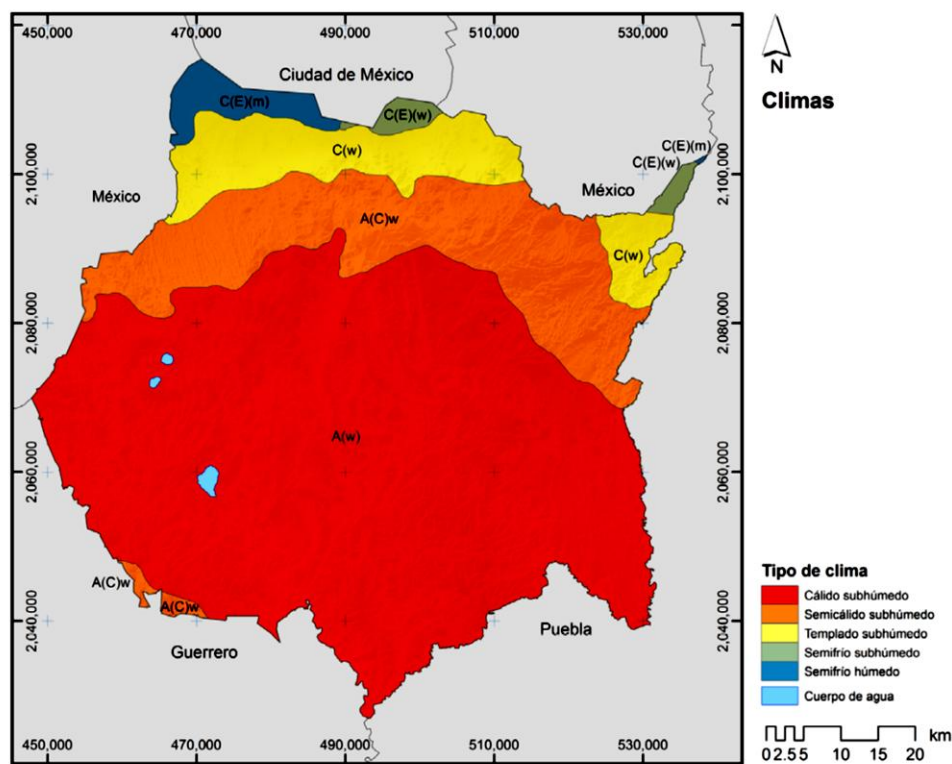


Figura 3. 3. Tipo de clima en el estado de Morelos. Fuente: CINPRO con información de INEGI (2013). Base Histórica

La región de estudio presenta condiciones predominantes de clima cálido subhúmedo, caracterizadas por elevadas temperaturas durante gran parte del año y velocidades de viento generalmente bajas. Estudios climáticos previos para el estado de Morelos INEGI (2013), reportan temperaturas superiores a 30 °C durante los meses más cálidos, particularmente entre abril y mayo, periodo asociado a mayor acumulación térmica y condiciones recurrentes de discomfort ambiental.

De manera complementaria, reportes meteorológicos regionales y análisis microclimático desarrollados para el área de estudio evidencian temperaturas extremas superiores a 40 °C en distintos municipios del sur del estado durante eventos de ola de calor registrados en primavera, particularmente en mayo, considerado uno de los periodos térmicamente más críticos del año.



Figura 3. 4. Reportes climáticos durante ola calor 2026. Morelos.

Asimismo, análisis microclimático basados en datos Copernicus ERA5, con datos estadísticos de 20 años, gestionados mediante AUTODESK FORMA, se identificaron temperaturas de microclima locales cercanas a 36–38 °C y condiciones de estrés térmico moderado y fuerte en sectores urbanizados próximos al caso de estudio, evidenciando el impacto del entorno construido sobre el comportamiento térmico local.

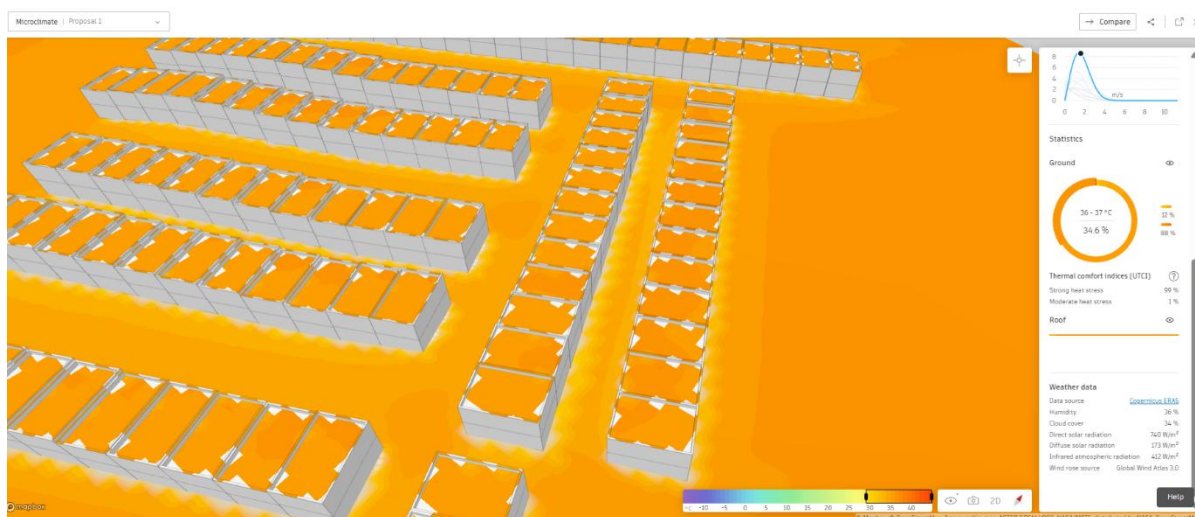


Figura 3. 5. Simulación de temperatura nivel superficie, software AUTODESK FORMA. Base COPENICUS & ERA5

Desde el punto de vista atmosférico, los monitoreos realizados mediante UAV evidenciaron velocidades de viento relativamente bajas dentro de la microescala urbana analizada, generalmente dentro del rango de 0.5–2 m/s, además de variabilidad direccional influenciada por la rugosidad superficial y la geometría urbana del entorno construido.

Estas condiciones adquieren relevancia para el presente estudio debido a que afectan simultáneamente la respuesta térmica de la envolvente y la disponibilidad real de ventilación natural bajo condiciones urbanas reales.

3.1.3 Sistema constructivo

La vivienda analizada corresponde a una tipología de interés social construida mediante un sistema de concreto vaciado o colado in situ. Este procedimiento constructivo consiste en el vertido de concreto fresco dentro de moldes o encofrados colocados en la posición final de los elementos, permitiendo conformar muros y losas como un sistema monolítico. La vivienda cuenta con más de 20 años de antigüedad, periodo en el cual este tipo de sistema constructivo fue ampliamente utilizado en desarrollos habitacionales de alta densidad debido a su rapidez de ejecución, repetibilidad y estandarización.

Durante el levantamiento físico del caso de estudio se identificó que los muros presentan espesores aproximados entre 10 y 11 cm, mientras que la cubierta está conformada por losa maciza de concreto armado. Esta configuración constructiva es representativa de viviendas sociales desarrolladas bajo criterios de optimización económica y ejecución en serie, donde la envolvente cumple simultáneamente funciones estructurales y de cerramiento térmico.

Como parte de la caracterización preliminar del sistema constructivo, se realizó una evaluación mecánica del concreto mediante esclerometría digital, siguiendo el criterio de ensayo no destructivo establecido por ASTM C805/C805M. A partir de esta prueba se obtuvieron valores promedio de resistencia a compresión cercanos a 280 kg/cm², los cuales fueron utilizados únicamente como referencia de caracterización del material y no como evaluación estructural detallada.

Desde el punto de vista térmico, el uso de concreto en muros y losa resulta relevante debido a su elevada masa térmica. Materiales de este tipo pueden almacenar energía durante periodos de alta

radiación solar y liberarla posteriormente hacia el ambiente interior, especialmente durante horarios vespertinos y nocturnos. Por ello, la descripción del sistema constructivo resulta necesaria para interpretar posteriormente los procesos de acumulación térmica, persistencia nocturna y estratificación interior observados en la vivienda.

En este estudio, el sistema constructivo se consideró como una condición física propia del caso de estudio y no como una variable modificable. Su caracterización permitió establecer una base descriptiva para relacionar la configuración material de la vivienda con el comportamiento térmico registrado durante el monitoreo experimental y con las condiciones de frontera empleadas posteriormente en la modelación CFD.

3.1.4 Distribución arquitectónica

La vivienda analizada presenta una configuración arquitectónica de interés social desarrollada en dos niveles, correspondiente a una tipología habitacional compacta y repetitiva dentro del conjunto urbano estudiado. La planta baja integra los principales espacios de uso común, circulación y servicios, mientras que la planta alta concentra las habitaciones y espacios de mayor permanencia nocturna.

La organización espacial de la vivienda responde a un esquema vertical compacto, donde la escalera funciona como elemento de conexión entre niveles y como zona de transición interior. Desde el punto de vista arquitectónico, esta conexión vertical resulta relevante porque permite la comunicación directa entre planta baja y planta alta, condición que puede influir en el movimiento natural del aire y en la distribución térmica del volumen interior.

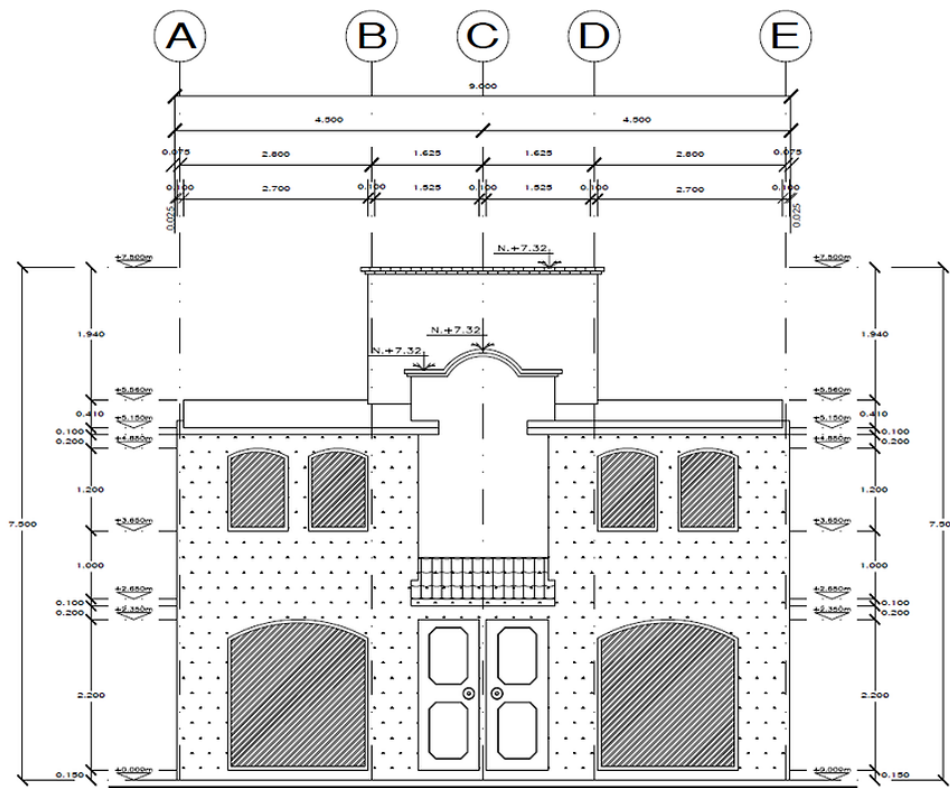
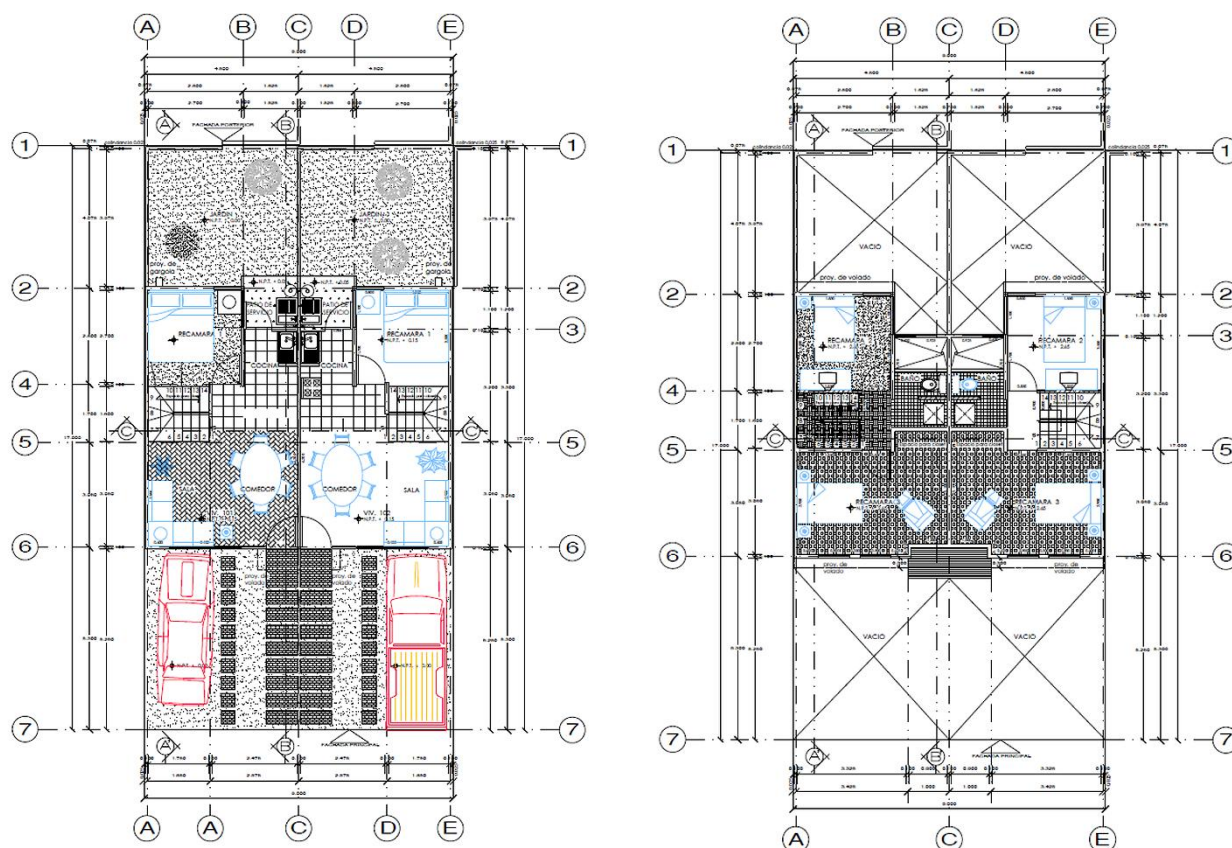


Figura 3. 6 Fachada principal del prototipo habitacional tipo dúplex de interés social considerado como caso de estudio



.Figura 3. 7. Distribución de casa analizada. Izquierda: Planta baja. Derecha: Planta alta.

La planta alta se encuentra directamente influenciada por la cubierta, debido a su proximidad con la losa expuesta a la radiación solar. Por esta razón, la distribución arquitectónica se consideró un elemento importante para interpretar posteriormente las diferencias térmicas entre niveles y la posible acumulación de calor en los espacios superiores. En este sentido, la relación entre cubierta, habitaciones y conexión vertical constituye una condición física propia del caso de estudio.

La vivienda cuenta con vanos y ventanas distribuidos en función de su configuración original, los cuales permiten ventilación natural bajo determinadas condiciones de presión y dirección del viento. Sin embargo, la efectividad de dicha ventilación depende de la orientación de las aberturas, de la continuidad de las trayectorias internas de aire y de la interacción con el entorno urbano inmediato. El domo existente se consideró únicamente como elemento de iluminación natural, ya que en su configuración original no opera como abertura de ventilación.

Para fines metodológicos, la distribución arquitectónica se documentó a partir del levantamiento físico y de los planos disponibles de la vivienda. Esta información permitió delimitar los espacios interiores de análisis, establecer zonas representativas para la instrumentación experimental y generar una base geométrica coherente para la interpretación térmica y la posterior modelación CFD.

3.2 Encuesta a habitantes del mismo condominio

Con el propósito de incorporar la percepción térmica de los habitantes del entorno inmediato al caso de estudio, se aplicó una encuesta estructurada a residentes del mismo conjunto habitacional. Esta etapa permitió identificar si las condiciones de sobrecalentamiento observadas en la vivienda analizada correspondían a una situación aislada o si formaban parte de una problemática térmica percibida por otros usuarios de viviendas con características constructivas y urbanas similares.

La encuesta se orientó a reconocer la experiencia de los ocupantes respecto a los meses de mayor calor, horarios críticos, zonas interiores con mayor acumulación térmica, intensidad de la sensación térmica y estrategias de adaptación utilizadas frente al desconfort. De esta manera, el instrumento permitió contextualizar socialmente el caso de estudio y justificar su selección dentro de una problemática local asociada a vivienda social en clima cálido subhúmedo. Vázquez, Ch., H. et al. (2026a).

En total participaron 81 habitantes del conjunto habitacional. Los resultados muestran que mayo fue identificado como el mes de mayor percepción de calor dentro de la vivienda, con 91.4 % de las respuestas, seguido por abril con 69.1 % y junio con 59.3 %. También se identificaron marzo, julio y agosto como meses relevantes dentro del periodo cálido, aunque con menor frecuencia de respuesta. Este comportamiento permitió reconocer que la problemática térmica se concentra principalmente durante la temporada cálida de primavera e inicio de verano.

En tu experiencia, ¿Cuáles son los meses más calurosos dentro de tu vivienda?

81 respuestas

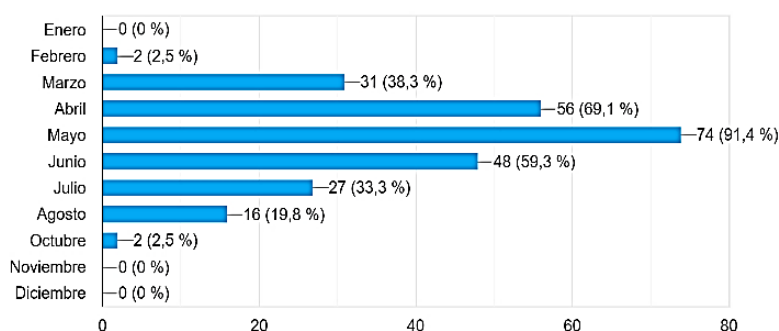


Figura 3. 8. Percepción térmica de habitantes del conjunto habitacional. Meses identificados como más calurosos dentro de la vivienda.

Respecto al horario crítico, el 55.6 % de los encuestados señaló la tarde como el periodo en que se percibe mayor calor dentro de la vivienda. Asimismo, el 25.9 % identificó la noche como un periodo de calor importante, mientras que el 17.3 % indicó que la sensación térmica elevada permanece durante todo el día. Esta distribución evidencia que el problema térmico no se limita al periodo de mayor radiación solar, sino que también se prolonga hacia horarios posteriores.

Durante esos meses más calurosos, ¿En qué horario se siente más el calor dentro de tu casa?

81 respuestas

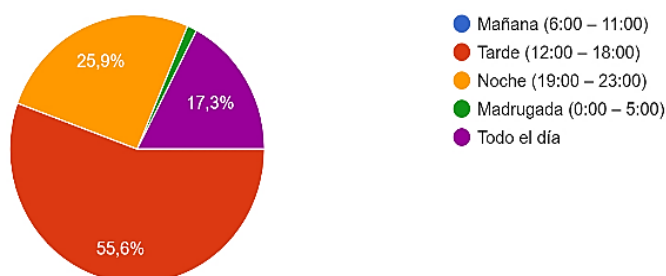


Figura 3. 9. Percepción térmica de habitantes del conjunto habitacional. Horario en que se percibe mayor calor.

En cuanto a la intensidad percibida, la mayoría de las respuestas se concentró en los niveles más altos de la escala utilizada. El 54.3 % de los participantes calificó el calor interior con intensidad 4, mientras

que el 30.9 % lo calificó con intensidad 5. En conjunto, estos valores indican una percepción dominante de calor severo durante el periodo crítico, lo cual refuerza la necesidad de analizar el comportamiento térmico de la vivienda bajo condiciones reales de operación.

Durante ese periodo más caluroso, **¿Qué tan intenso se vuelve el calor en el interior?**

81 respuestas

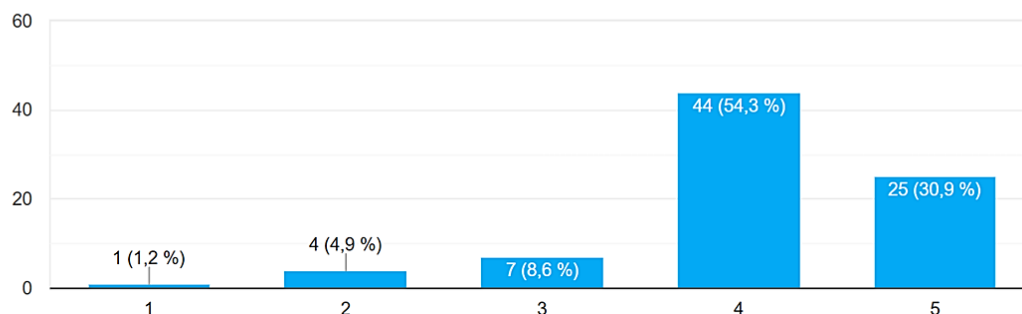


Figura 3. 10. Percepción térmica de habitantes del conjunto habitacional. Intensidad percibida del calor interior

La distribución espacial del problema también fue identificada por los habitantes. El 76.5 % señaló la planta alta como la zona que suele calentarse más, mientras que el 17.3 % indicó que ambas plantas presentan acumulación térmica y solo el 6.2 % señaló la planta baja

Esta percepción resulta relevante para la metodología experimental, ya que permitió orientar la selección de espacios representativos para el monitoreo interior, considerando planta baja, planta alta, escaleras y zonas de transición vertical.

¿Qué zona de tu vivienda suele calentarse más?

81 respuestas

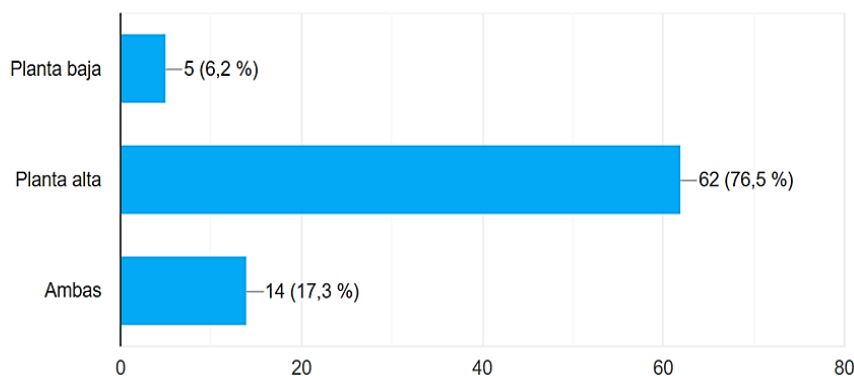


Figura 3. 11. Percepción térmica de habitantes del conjunto habitacional. Zona de la vivienda con mayor acumulación térmica.

Además de identificar meses, horarios y zonas críticas, la encuesta permitió conocer afectaciones cotidianas asociadas al calor interior. La dificultad para dormir fue la situación más reportada, con 72.8 % de las respuestas, seguida por sudoración excesiva y necesidad de ventilador, ambas con 65.4 %. También se registró sensación de bochorno en el 64.2 % de los participantes, uso de aire

acondicionado en el 44.4 % y apertura de puertas o ventanas como estrategia de ventilación en el 49.4 %. Estos resultados muestran que el sobrecalentamiento interior no representa únicamente una condición física del edificio, sino una problemática que afecta actividades cotidianas, descanso y estrategias de adaptación de los habitantes.

Durante el periodo más caluroso, ¿Qué situaciones has experimentado?

81 respuestas

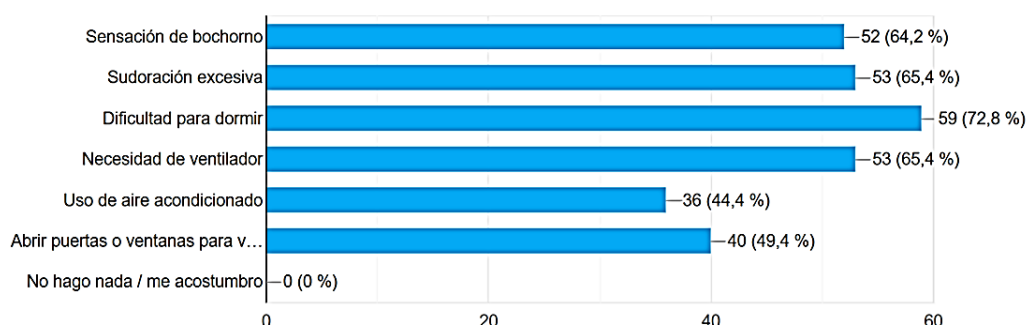


Figura 3. 12. Percepción térmica de habitantes del conjunto habitacional. Situaciones experimentadas durante el periodo más caluroso.

Para fines de este capítulo, los resultados de la encuesta se presentan como evidencia perceptual y contextual de la problemática térmica local. La relación entre estas respuestas y los datos instrumentales de temperatura, humedad relativa e indicadores derivados se desarrolla posteriormente en los capítulos de caracterización térmica y discusión general.

3.3 Instrumentación experimental

La instrumentación experimental se seleccionó con el propósito de registrar variables térmicas, higrotérmicas y atmosféricas bajo condiciones reales de operación de la vivienda. La estrategia de medición combinó sensores digitales de bajo impacto para el monitoreo continuo de temperatura del aire y humedad relativa, junto con mediciones atmosféricas mediante UAV, para la caracterización del viento cercano a la superficie.

La selección de variables ambientales se fundamentó en los criterios de confort térmico establecidos por ASHRAE Standard 55 y en las recomendaciones de instrumentación descritas por ISO, donde se reconoce la importancia de medir temperatura del aire, humedad relativa, velocidad del aire y, cuando corresponde, temperatura radiante media para evaluar ambientes térmicos interiores (ASHRAE, 2020; ISO, 1998). Asimismo, la integración de variables ambientales y percepción térmica responde a enfoques adaptativos de confort ampliamente discutidos en la literatura (de Dear & Brager, 1998; Nicol & Humphreys, 2002).

El uso de sensores IoT permitió realizar un monitoreo continuo y no invasivo dentro de la vivienda, sin modificar su configuración constructiva ni interferir significativamente con las actividades cotidianas de los ocupantes. Esta aproximación fue previamente validada dentro de la misma línea de investigación mediante comparación con sensores de referencia, respaldando su aplicación para estudios residenciales de confort térmico y monitoreo higrotérmico (Vázquez, Ch., H. et al., 2025).

3.3.1 Sensores IoT

Para el monitoreo higrotérmico se utilizaron sensores digitales Wi-Fi modelo Steren SHOME-180. Estos dispositivos registran temperatura del aire y humedad relativa, y permiten el almacenamiento de series temporales mediante una plataforma de monitoreo asociada. Su selección respondió a tres criterios principales: instalación no invasiva, resolución temporal suficiente para registrar variabilidad diaria y compatibilidad con monitoreo continuo en espacios habitados.

De acuerdo con las especificaciones técnicas del equipo, los sensores presentan un rango de operación de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ para temperatura y de 0% a 99.9% para humedad relativa no condensada, con precisión nominal de $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $\pm 3\%$, respectivamente. Como parte de la validación metodológica previa, estos sensores fueron contrastados con un sistema de referencia desarrollado en CENIDET, obteniéndose diferencias promedio dentro del margen de precisión nominal del instrumento (Vázquez, Ch., H. et al., 2025).

3.3.2 Variables monitoreadas

Las variables principales registradas mediante los sensores IoT fueron temperatura del aire y humedad relativa. La selección de estas variables se fundamentó en su influencia directa sobre el intercambio térmico entre ocupante y ambiente interior, así como en su relevancia para la evaluación del confort térmico en edificaciones naturalmente ventiladas (ASHRAE, 2020; ISO, 1998; de Dear & Brager, 1998).

A partir de estos registros se calcularon posteriormente indicadores derivados, como el Índice de Calor, el Déficit de Presión de Vapor, diferenciales térmicos entre espacios interiores y relaciones estadísticas entre temperatura y humedad relativa. Estas variables permitieron interpretar el comportamiento higrotérmico de la vivienda y su relación con los procesos de sobrecalentamiento, acumulación térmica y estratificación interior.

De manera complementaria, el monitoreo atmosférico mediante UAV permitió registrar variables asociadas al viento superficial, principalmente velocidad, dirección, altura de medición y tiempo de adquisición. Estas variables fueron necesarias para caracterizar la disponibilidad real de viento útil en el entorno inmediato de la vivienda, considerando que el flujo cercano al suelo puede presentar alta variabilidad espacial y temporal por efecto de rugosidad urbana, obstáculos y turbulencia local (Oke, 1987; Stull, 1988).

3.3.3 Frecuencia de adquisición

El monitoreo higrotérmico continuo se realizó con una frecuencia de adquisición de un minuto, permitiendo registrar la variabilidad diaria de temperatura y humedad relativa durante el periodo de análisis. Esta resolución temporal permitió identificar ciclos de calentamiento y enfriamiento, diferencias entre espacios interiores y exteriores, y variaciones asociadas a los horarios de mayor carga térmica.

En el caso del monitoreo de viento mediante UAV, la adquisición se realizó con una frecuencia aproximada de una muestra cada 5 s durante vuelos estacionarios de 15 minutos. Esta configuración generó alrededor de 180 registros por vuelo, resolución suficiente para representar cambios de velocidad, dirección, ráfagas y periodos de calma dentro de la microescala urbana analizada. La selección de ventanas de medición cortas pero repetibles es coherente con estudios previos de estimación de viento mediante multirrotor en la baja atmósfera (Palomaki et al., 2017; Meier et al., 2022; Wetz et al., 2021).

3.3.4 Ubicación de sensores

Los sensores IoT fueron colocados en puntos representativos **círculos rojos** en el interior y exterior de la vivienda, la Figura 3. 13, muestra la ubicación espacial considerando espacios de uso cotidiano, zonas de transición vertical y áreas con posible acumulación térmica. La distribución incluyó un punto exterior protegido de radiación solar directa y sensores interiores ubicados en planta baja, escaleras y habitaciones de planta alta.

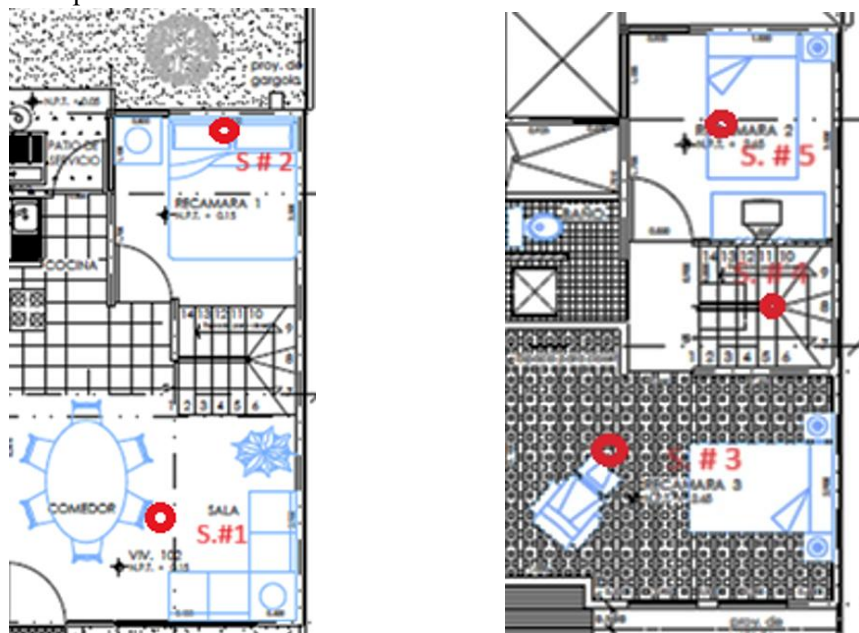


Figura 3. 13. Ubicación de sensores. Sala, Cuarto PB, Escaleras, Cuarto crítico PA, Cuarto B PA.

La colocación de los sensores a una altura aproximada de 1.5 m sobre el nivel del piso permitió representar condiciones cercanas a la zona ocupada, de acuerdo con los criterios empleados en estudios de confort térmico y medición ambiental interior (ISO, 1998; ASHRAE, 2020). Esta distribución permitió comparar el comportamiento higrotérmico entre ambiente exterior, planta baja, zonas de transición y planta alta, generando una base experimental para analizar posteriormente estratificación térmica y variabilidad temporal.

La ubicación de dichos sensores servirá de punto de referencia espacial para colocar puntos de interés durante el procesamiento en FLUENT ANSYS.

3.4 Monitoreo con UAV

El monitoreo con UAV se implementó con el propósito de caracterizar el comportamiento del viento en la microescala urbana inmediata al caso de estudio. Esta etapa resultó necesaria debido a que la ventilación natural y el posible desempeño de una torre de viento dependen directamente de la velocidad, dirección y variabilidad del flujo atmosférico disponible en el entorno cercano a la vivienda. En zonas urbanas o periurbanas, el viento cercano a la superficie puede diferir de los registros meteorológicos regionales debido a la influencia de obstáculos, rugosidad superficial, canalización y turbulencia local (Oke, 1987; Stull, 1988).

El uso de UAV para mediciones atmosféricas ha sido documentado como una alternativa viable para caracterizar viento en la baja atmósfera, especialmente cuando se emplean vuelos controlados, procedimientos de calibración y comparación con referencias fijas. Estudios previos han demostrado que plataformas multirrotor pueden estimar velocidad y dirección del viento con niveles de error aceptables frente a torres meteorológicas, sensores sónicos o instrumentación atmosférica

especializada (Palomaki et al., 2017; Barbieri et al., 2019; Segales et al., 2020; Wetz et al., 2021; Meier et al., 2022; Vázquez, Ch., H. et al., 2025).

En esta investigación, el monitoreo con UAV permitió obtener datos locales del viento incidente sobre la vivienda, evitando depender exclusivamente de promedios climáticos o condiciones de frontera idealizadas. La información obtenida fue utilizada posteriormente para interpretar la disponibilidad real de viento útil y para seleccionar condiciones representativas de entrada en la modelación CFD.

3.4.1 Plataforma UAV

La plataforma utilizada para el monitoreo atmosférico fue un DJI Mavic Air 2, equipo multirrotor comercial capaz de registrar información de vuelo asociada a tiempo, posición, altura, trayectoria, velocidad sobre el plano del suelo, actitud de la aeronave y metadatos operativos. Esta información permitió caracterizar el comportamiento del viento a partir de la respuesta dinámica del UAV durante condiciones de vuelo controlado.



Figura 3. 14. UAV utilizado DJI Mavic Air 2.

Debido a que esta plataforma no proporciona directamente el régimen de motores o torque de los rotores, la estimación de velocidad y dirección del viento se realizó mediante la plataforma AirData. Este sistema procesa la telemetría del vuelo y utiliza la respuesta de estabilización del UAV para derivar, muestra a muestra, el vector de viento. En términos físicos, el UAV compensa el empuje generado por el viento para mantener su posición; dicha compensación se refleja en la inclinación y actitud de la aeronave, variables que permiten estimar la dirección e intensidad del flujo incidente (Palomaki et al., 2017; Segales et al., 2020; Meier et al., 2022).

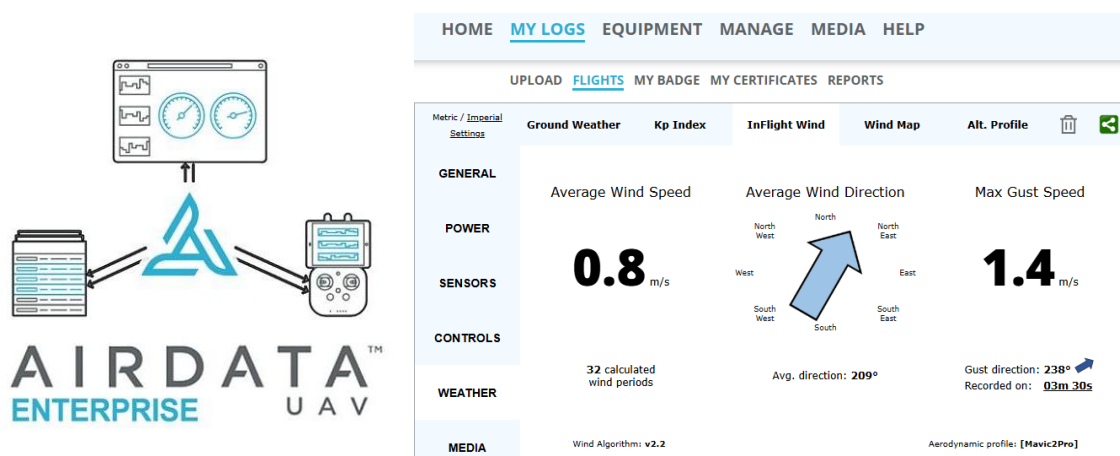


Figura 3. 15. Interfaz Monitoreo de viento -AirData App.

Como parte de la calibración operativa y validación local de la metodología, las mediciones obtenidas mediante UAV fueron comparadas con registros de una estación meteorológica fija perteneciente al Departamento de Ingeniería Mecánica del CENIDET, Figura 3. 16. Esta comparación permitió evaluar la consistencia de los datos estimados por AirData respecto a una referencia instrumental instalada en sitio, considerando velocidad promedio del viento, ráfaga máxima y dirección (Vázquez, Ch., H. et al., 2025.)



Figura 3. 16. Vista de Estación meteorológica CENIDET MIM.

La estación meteorológica registró datos con una frecuencia de 3 s y generó promedios cada 10 min. Para la validación, los vuelos se realizaron dentro de una ventana temporal sincronizada con dichos intervalos, permitiendo comparar directamente los valores obtenidos por el UAV con los promedios reportados por la estación. Este procedimiento permitió verificar que la estimación del viento mediante vuelo estacionario tipo *hover* presentara errores reducidos y comportamiento coherente respecto a la referencia fija.

Los resultados de esta validación mostraron diferencias promedio bajas entre ambos sistemas, con errores absolutos medios cercanos a 0.03 m/s para velocidad promedio, 0.05 m/s para ráfaga máxima y 7.5° para dirección del viento. Estos valores respaldaron el uso del UAV como herramienta de monitoreo micro escalar del viento en el caso de estudio, siempre que se mantuvieran condiciones de vuelo estable, ausencia de maniobras bruscas y procesamiento posterior de la telemetría.

En consecuencia, la plataforma UAV no se empleó únicamente como herramienta exploratoria, sino como un sistema de medición previamente contrastado con una referencia local. Esta validación fortaleció la confiabilidad de los registros de velocidad y dirección del viento utilizados posteriormente para caracterizar la disponibilidad de viento útil en la vivienda.

3.4.2 Metodología de vuelo

La metodología de vuelo se basó en operación estacionaria tipo *hover*, manteniendo el UAV sobre un punto fijo durante intervalos definidos de monitoreo. Bajo esta condición, el equipo permanece suspendido y realiza ajustes automáticos de actitud para compensar el empuje del viento. La literatura especializada identifica este enfoque como un método basado en actitud o compensación dinámica,

adecuado para estimar viento mediante multirrotor cuando se controlan las condiciones de vuelo y se evitan maniobras bruscas (Palomaki et al., 2017; Segales et al., 2020; Meier et al., 2022).

Cada vuelo estacionario tuvo una duración aproximada de 15 min, con una frecuencia de registro cercana a una muestra cada 5 s. Esta configuración generó alrededor de 180 registros por vuelo, permitiendo capturar variaciones de velocidad, cambios direccionales, ráfagas y periodos de calma dentro de la microescala urbana analizada. Durante la operación se evitaron desplazamientos agresivos, obstáculos inmediatos y condiciones meteorológicas que pudieran comprometer la estabilidad de la aeronave o la seguridad del monitoreo.

Las campañas de monitoreo se organizaron en diferentes horarios representativos del ciclo diario: mañana, tarde y noche, con vuelos realizados aproximadamente a las 7:00, 13:00 y 19:00 h. Esta selección horaria permitió explorar el comportamiento del viento bajo condiciones atmosféricas contrastantes, asociadas de manera aproximada a periodos de transición matutina, mayor calentamiento convectivo diurno y enfriamiento vespertino/nocturno.

Adicionalmente, se realizaron vuelos simultáneos con tres UAV a diferentes alturas: 1.5 m, 4 m y 11 m. Esta configuración tuvo como finalidad estimar el comportamiento vertical del viento en alturas asociadas a la zona peatonal, aberturas de fachada, ventanas superiores y región próxima a cubierta. El uso de mediciones simultáneas permitió reducir el sesgo temporal que podría presentarse si las alturas se monitorearan de manera secuencial bajo condiciones de viento altamente variable.

La estrategia de vuelo se definió para representar condiciones de viento próximas a la vivienda y útiles para el análisis de ventilación pasiva. Por ello, el monitoreo no buscó sustituir una estación meteorológica regional, sino caracterizar el flujo disponible en la escala local donde interactúan la atmósfera, el entorno urbano y la edificación.

3.4.3 Alturas de monitoreo

Las alturas de monitoreo se definieron de acuerdo con tres objetivos experimentales: caracterizar el viento útil cercano a la vivienda, estimar condiciones locales de frontera para CFD y analizar la variación vertical del flujo dentro de la capa baja atmosférica. Para la caracterización microescala cercana a la cubierta se trabajó en un rango aproximado de 3.5 - 4 m sobre el nivel de referencia de la vivienda, altura suficiente para superar interferencias inmediatas del entorno construido, tales como muros, vegetación, tinacos, cubiertas y elementos urbanos cercanos.



Figura 3. 17. Render de planeación de alturas de monitoreo.

Esta altura resultó adecuada para analizar el flujo que podría incidir sobre aberturas superiores o dispositivos de captación, como una torre de viento. A diferencia de datos meteorológicos obtenidos a alturas estándar o en sitios abiertos, las mediciones a escala local permitieron representar mejor las condiciones reales del viento disponible alrededor de la vivienda. Esta consideración es importante porque en entornos urbanos la velocidad y dirección del viento pueden modificarse significativamente por rugosidad, canalización, recirculaciones y efectos de estela (Oke, 1987; Stull, 1988).

Como parte de la caracterización asociada a la operación de la vivienda, se realizaron mediciones simultáneas a 1.5 m, 4 m y 11 m. Estas alturas permitieron aproximar el flujo disponible en la zona ocupada, en niveles próximos a ventanas o aberturas de fachada, y en la región superior cercana a cubierta. Los registros obtenidos en estas alturas fueron considerados relevantes para interpretar el comportamiento de la ventilación natural y para definir condiciones representativas de frontera en el modelo CFD.

De manera complementaria, se desarrollaron perfiles verticales de viento desde 1 m hasta 120 m de altura. En estos perfiles, el monitoreo se realizó con incrementos de 1 m hasta alcanzar los 20 m y posteriormente con incrementos de 5 m hasta llegar a 120 m. Esta estrategia permitió observar la variación vertical de velocidad y dirección del viento, así como identificar posibles cambios entre el flujo afectado por la rugosidad urbana cercana al suelo y condiciones de viento más organizadas a mayor altura. Esta estrategia permitió relacionar posteriormente los registros de viento con posibles regímenes de estabilidad atmosférica descritos por la teoría de similitud de Monin–Obukhov (MOST), sin asumir que el flujo local fuera homogéneo o plenamente desarrollado.

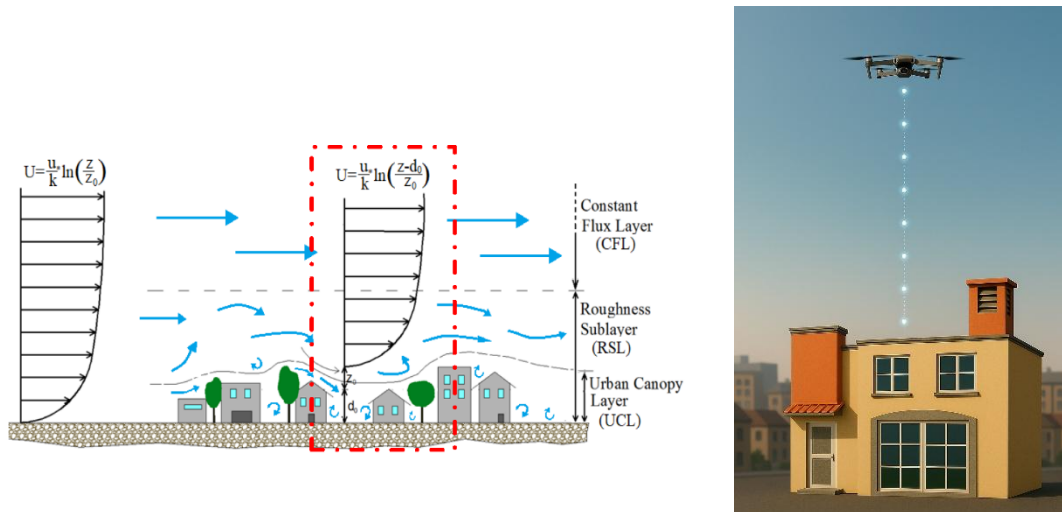


Figura 3. 18. Render de planeación para vuelo a 120 m. Izquierda perfiles de viento teóricos.

La selección de alturas también respondió a criterios de seguridad operacional y estabilidad del UAV. El monitoreo se realizó evitando zonas de interferencia directa con obstáculos y manteniendo condiciones de vuelo adecuadas para reducir perturbaciones inmediatas generadas por elementos constructivos, sin perder representatividad respecto al flujo atmosférico que interactúa con la vivienda.

3.4.4 Procesamiento de datos.

Los datos de viento obtenidos mediante UAV fueron exportados desde AirData y organizados en series temporales para su análisis posterior. El procesamiento incluyó revisión de consistencia, depuración de valores atípicos, identificación de muestras perdidas e interpolación temporal cuando fue necesario. Posteriormente, las series fueron procesadas en RStudio para obtener indicadores estadísticos y representaciones gráficas del comportamiento del viento.

Las variables procesadas incluyeron velocidad media, desviación estándar, percentiles, velocidad máxima, índice de ráfaga e intensidad turbulenta, parámetros utilizados para describir la variabilidad del flujo atmosférico cercano a la superficie (Stull, 1988; World Meteorological Organization, [WMO] 2008). Debido a la naturaleza angular de la dirección del viento, se aplicó estadística circular para estimar dirección media, dispersión direccional y coherencia del flujo, siguiendo criterios establecidos para el tratamiento de datos direccionales (Fisher, 1993).

Como parte del análisis gráfico, se generaron series temporales de velocidad, series de dirección desenrollada, histogramas de frecuencia y rosas de viento. Para los perfiles verticales, se organizaron los registros por altura con el propósito de analizar la evolución de la velocidad y dirección del viento en función de la distancia sobre el nivel de referencia. En el caso de vuelos simultáneos a diferentes alturas, los registros fueron sincronizados temporalmente para comparar el comportamiento del flujo en niveles asociados a fachada, ventanas y cubierta.

La información procesada fue utilizada posteriormente para interpretar la disponibilidad de viento útil en el entorno inmediato de la vivienda, analizar la posible relación entre ciclo horario y estabilidad atmosférica, y definir condiciones representativas de frontera en la simulación CFD.

3.5 Termografía infrarroja cuantitativa

La termografía infrarroja cuantitativa (QIRT) se incorporó como técnica experimental para caracterizar la temperatura superficial de los elementos constructivos de la vivienda. Su aplicación permitió analizar el comportamiento térmico de la envolvente a partir de imágenes radiométricas, con énfasis en muros, cubierta y superficies interiores asociadas a procesos de ganancia, acumulación y liberación de calor. A diferencia de una inspección visual basada únicamente en contrastes cromáticos, la QIRT permite transformar la radiación infrarroja emitida por las superficies en datos numéricos comparables, siempre que se consideren parámetros como emisividad, distancia de medición, temperatura reflejada, condiciones ambientales y ángulo de observación (Maldague, 2001; Meola & Carlomagno, 2004; Usamentiaga et al., 2014; Vollmer & Möllmann, 2018).

En el campo de la edificación, la termografía infrarroja se ha utilizado ampliamente para identificar irregularidades térmicas en envolventes, pérdidas energéticas, puentes térmicos, zonas de humedad y discontinuidades en sistemas constructivos. Normas como ISO 6781-1:2023 y ASTM C1060-23 establecen criterios para la inspección termográfica de edificios; sin embargo, su enfoque se orienta principalmente a la detección de anomalías térmicas. Por ello, en esta investigación dichas referencias se emplearon como apoyo para la inspección de envolventes, mientras que el tratamiento numérico de las imágenes se sustentó en literatura especializada sobre medición infrarroja, análisis superficial y procesamiento de datos térmicos (ISO, 2023; ASTM International, 2023; Maldague, 2001).

La campaña termográfica se desarrolló durante diferentes días del mes de mayo. Para el análisis evolutivo se seleccionaron cuatro días críticos: 15, 16, 17 y 18 de mayo, debido a su representatividad dentro del periodo de mayor carga térmica observado durante el monitoreo experimental. En cada jornada se realizaron levantamientos termográficos secuenciales cada 30 min, iniciando a las 7:00 h y finalizando a las 23:00 h. Esta resolución temporal permitió observar la evolución diaria del

calentamiento superficial, la respuesta térmica de la envolvente y la permanencia de temperaturas elevadas hacia horarios vespertinos y nocturnos.

La selección de un monitoreo evolutivo permitió analizar no solo temperaturas superficiales puntuales, sino también la dinámica temporal de las superficies constructivas. Esta estrategia fue relevante para identificar el comportamiento de la cubierta y de los muros expuestos como posibles reservorios térmicos, así como para relacionar posteriormente las temperaturas superficiales promedio con los registros higrotérmicos interiores y con las condiciones térmicas de frontera empleadas en el modelo CFD. Desde el punto de vista físico, este procedimiento permitió vincular la medición superficial con procesos de conducción, convección y radiación presentes en la envolvente de la vivienda (Incropera et al., 2007; Howell et al., 2010).

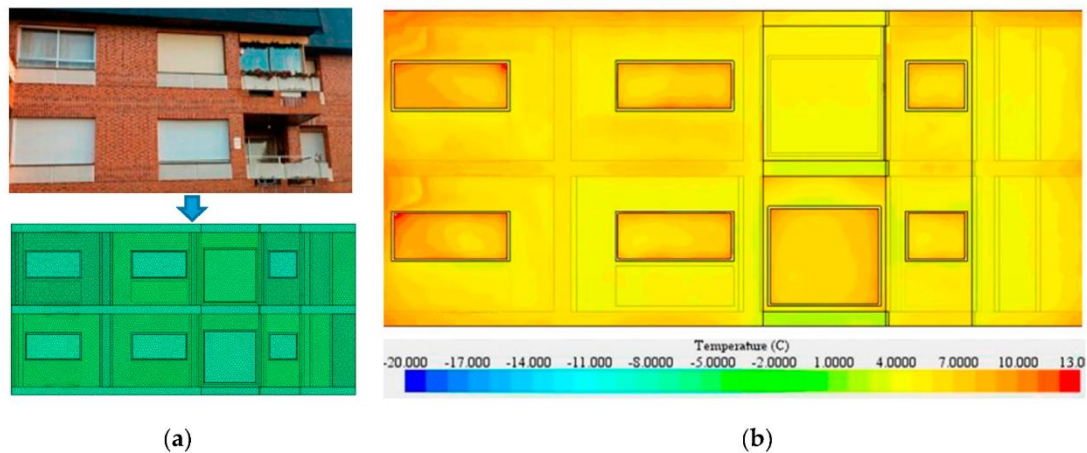


Figura 3. 19. Experimento de Morón et al. (2018) Termografía y réplica con modelación numérica de superficies.

La técnica de integrar termografía infrarroja con modelación numérica ha sido documentada en estudios de desempeño térmico de edificios. Morón et al. (2018) compararon mediciones termográficas con modelación CFD para evaluar el comportamiento térmico de una edificación, mostrando que la termografía puede aportar información superficial útil para validar o complementar modelos numéricos. De manera similar, Li et al. (2024) analizaron la aplicación de QIRT interna en muros con distinta capacidad de aislamiento, destacando la importancia de las condiciones operativas, la diferencia térmica interior–exterior y el control de parámetros de medición para mejorar la confiabilidad de los resultados. Estos antecedentes respaldan el uso de temperaturas superficiales obtenidas mediante QIRT como insumo experimental para interpretar la envolvente y apoyar la definición de condiciones térmicas de frontera.

3.5.1 Cámara termográfica

Para el registro de temperaturas superficiales se utilizó una cámara termográfica infrarroja FLIR de resolución térmica 160×120 píxeles, equivalente a 19 200 puntos de medición radiométrica por imagen. El equipo cuenta con sensibilidad térmica menor a 0.06°C , resolución espacial aproximada de 3.7 mrad , mejora de imagen MSX®, conectividad Wi-Fi y almacenamiento en la nube mediante FLIR Ignite™. Su rango de medición permite registrar temperaturas de 0 a 100°C con precisión aproximada de $\pm 1^\circ\text{C}$ y de 100 a 200°C con precisión de $\pm 2\%$, además de contar con temperatura extendida hasta 400°C .



Figura 3. 20. Cámara termográfica utilizada.

Estas características resultaron adecuadas para la evaluación térmica de la envolvente de la vivienda, debido a que permitieron registrar superficies expuestas a radiación solar, muros interiores, cubierta y zonas con alta acumulación térmica. La resolución térmica del equipo permitió identificar patrones espaciales de calentamiento, mientras que su sensibilidad favoreció la detección de diferencias térmicas entre superficies constructivas con distinta exposición, orientación y condición material.

Durante la adquisición de imágenes se procuró mantener condiciones de captura consistentes entre horarios y superficies. Se evitó registrar zonas con reflejos intensos, ángulos excesivamente oblicuos, pérdida de enfoque, objetos ajenos a la envolvente o superficies parcialmente obstruidas. Las imágenes que presentaron distorsiones visuales importantes o información térmica no confiable fueron descartadas del procesamiento posterior. Estas precauciones son necesarias debido a que la medición termográfica puede verse afectada por emisividad, radiación reflejada, humedad ambiental, distancia de captura y geometría de observación (Usamentiaga et al., 2014; FLIR Systems, 2023).

3.5.2 Emisividad

La interpretación cuantitativa de imágenes infrarrojas requiere considerar la emisividad de las superficies analizadas. La emisividad representa la capacidad de una superficie para emitir radiación térmica respecto a un cuerpo negro ideal a la misma temperatura. Este parámetro depende del tipo de material, acabado superficial, color, rugosidad, humedad, oxidación y ángulo de observación, por lo que constituye una de las principales fuentes de incertidumbre en mediciones termográficas cuantitativas (Maldague, 2001; Vollmer & Möllmann, 2018).

En esta investigación, la emisividad se ajustó considerando la naturaleza de los materiales predominantes de la envolvente, principalmente concreto, recubrimientos exteriores e impermeabilizante en cubierta. Esta consideración permitió mejorar la consistencia de las mediciones superficiales y reducir errores asociados a la comparación entre superficies con propiedades radiativas distintas. En materiales de construcción no metálicos, como concreto, mortero, recubrimientos minerales y superficies pintadas, suelen emplearse valores altos de emisividad como aproximación inicial, aunque su selección debe verificarse de acuerdo con el acabado superficial y las condiciones de captura (FLIR Systems, 2023; Usamentiaga et al., 2014).

Durante la toma de imágenes se evitó, en la medida de lo posible, medir superficies metálicas expuestas, zonas con reflejos directos o áreas con alta influencia de radiación reflejada. Asimismo, se mantuvo cuidado en la distancia y orientación de captura, debido a que la geometría de observación puede modificar la radiación recibida por la cámara. Estas precauciones permitieron obtener registros más representativos de la temperatura superficial de los elementos constructivos evaluados (Meola & Carlomagno, 2004; FLIR Systems, 2023).

3.5.3 Polígonos digitales

Para el procesamiento cuantitativo de las imágenes térmicas se delimitaron polígonos digitales sobre las superficies de interés. Estos polígonos funcionaron como regiones de interés, permitiendo extraer valores térmicos únicamente de áreas representativas de muros, cubierta, fachadas o superficies interiores específicas. Este procedimiento evitó analizar la imagen completa y redujo la influencia de objetos ajenos a la envolvente, bordes, sombras, reflejos o zonas con información térmica incompleta.

La delimitación mediante regiones de interés es una práctica útil en análisis radiométrico, ya que permite convertir una imagen térmica en una matriz de datos espaciales asociados a una superficie física definida. En este estudio, los polígonos digitales permitieron conservar la información espacial de la temperatura y obtener estadísticas térmicas por área, en lugar de depender de mediciones

puntuales aisladas. Este enfoque resulta pertinente cuando se busca caracterizar superficies constructivas heterogéneas o comparar zonas de una envolvente sometidas a diferente exposición solar (Maldague, 2001; Usamentiaga et al., 2014).

El uso de áreas delimitadas resulta especialmente relevante en estudios de cubiertas y elementos constructivos expuestos en climas cálidos. En México, Ruiz Torres et al. (2019) aplicaron termografía infrarroja para evaluar componentes prefabricados no convencionales de techo en clima cálido subhúmedo, mostrando la utilidad de esta técnica para comparar el comportamiento térmico superficial de soluciones constructivas bajo condiciones reales de exposición. Este antecedente respalda la pertinencia de analizar superficies de la envolvente mediante zonas definidas, particularmente cuando el objetivo es identificar diferencias térmicas asociadas a materiales, geometría, orientación y exposición solar.

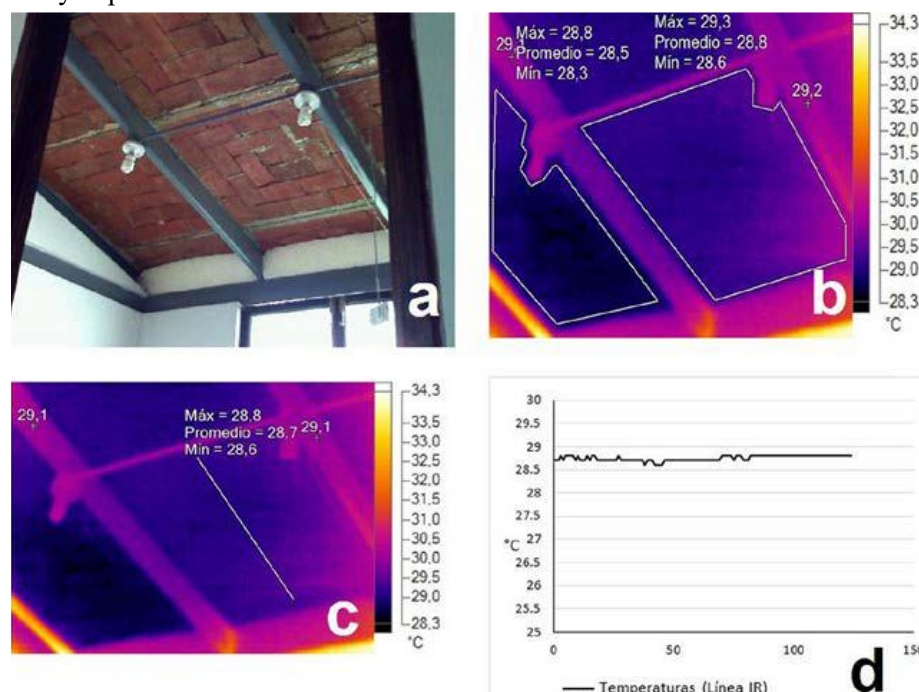


Figura 3. 21. Metodología de polígonos aplicada en el monitoreo de temperatura, Ruiz Torres et al. (2019).

El flujo de procesamiento se realizó mediante herramientas digitales y rutinas en Python. Cada imagen fue convertida en una matriz numérica de píxeles; posteriormente se aplicaron máscaras asociadas a los polígonos definidos y se extrajeron valores estadísticos de temperatura para cada superficie. Esta metodología permitió construir series comparables entre horarios y superficies, manteniendo un criterio homogéneo de análisis y reduciendo la subjetividad propia de la interpretación visual

3.5.4 Temperatura superficial promedio y procesamiento termográfico en Python

La campaña termográfica generó un volumen amplio de información visual, compuesto por aproximadamente 1400 imágenes térmicas por día, fueron seleccionadas para el análisis de superficies interiores y exteriores. Debido a esta cantidad de registros, la interpretación manual de cada imagen habría limitado la trazabilidad, la repetibilidad y la comparación temporal entre elementos constructivos. Por ello, se desarrolló un flujo de procesamiento en Python orientado a convertir las imágenes infrarrojas en datos numéricos de temperatura superficial promedio.

El procedimiento inició con la organización de las imágenes por fecha, horario y zona de captura. Posteriormente, se realizó una revisión de calidad para descartar imágenes con reflejos excesivos, desenfoque, obstrucciones o información térmica incompleta. Esta etapa permitió conservar únicamente las capturas útiles para el análisis térmico de muros, techos, pisos, cubiertas y zonas de transición.

Después de la selección inicial, cada imagen fue asociada con una superficie física de la vivienda mediante claves de identificación. Para ello se delimitaron regiones (polígonos) de interés sobre las imágenes, utilizando polígonos digitales y máscaras térmicas. Estas máscaras permitieron separar la superficie analizada del resto de la imagen y mantener correspondencia entre el elemento constructivo, la ubicación espacial y el horario de monitoreo.

El flujo de trabajo se desarrolló con un criterio de aprendizaje dinámico e iterativo. Esto significa que las regiones de interés no se definieron como selecciones aisladas, sino que se ajustaron progresivamente con base en la geometría visible de cada superficie, la continuidad temporal del monitoreo y la coherencia térmica entre capturas consecutivas. De esta forma, el procesamiento permitió reconocer superficies equivalentes en distintos horarios y reducir la variabilidad asociada a cambios de encuadre o perspectiva.

El procedimiento se basa en la definición de un campo térmico bidimensional $T(x, y)$ y una máscara binaria $M(x, y)$, que delimita la región de interés. El número de píxeles considerados se define como:

$$N = \sum M(x, y) \quad (3.1)$$

Donde N es el número de píxeles incluidos en la superficie analizada, y $M(x, y)$ representa la máscara binaria, con valor de 1 dentro de la región de interés y 0 fuera de ella.

y el promedio espacial de temperatura para cada superficie se obtiene mediante:

$$\bar{T}_{\text{superficie}} = \frac{\sum T(x, y) M(x, y)}{\sum M(x, y)} \quad (3.2)$$

Donde $\bar{T}_{\text{superficie}}$ es la temperatura superficial promedio de la superficie analizada, $T(x, y)$ es la temperatura registrada en cada píxel del termograma, y $M(x, y)$ delimita la región incluida en el cálculo.

Relación entre porcentaje del área analizada y número aproximado de píxeles térmicos
Cámara térmica: FLIR E8 (160×120 píxeles = 19 200 píxeles totales)

Porcentaje del área analizada (%)	Número aproximado de píxeles térmicos
30 %	5,760
40 %	7,680
50 %	9,600
60 %	11,520
70 %	13,440
80 %	15,360

Tabla 3. 1. Relación de píxel por cada superficie del caso de estudio.

El número de píxeles se estimó a partir de la resolución térmica total de la cámara (19 200 píxeles). Las áreas identificadas automáticamente con aprendizaje automático abarcaron entre el 30 % y el 80 % del total de cada termograma, lo que garantiza una base estadística para calcular los promedios espaciales.

Este criterio permitió sustituir mediciones puntuales por promedios espaciales representativos de cada superficie. En lugar de tomar un único valor sobre el termograma, se calculó la temperatura media de áreas completas, lo que resulta adecuado para caracterizar muros, techos y pisos como elementos térmicos de la envolvente. Este enfoque es consistente con aplicaciones de termografía infrarroja cuantitativa, donde el análisis por regiones de interés permite evaluar superficies constructivas completas y reducir la influencia de variaciones locales o píxeles aislados (Maldague, 2001; Usamentiaga et al., 2014; Morón et al., 2018).

Una vez calculadas las temperaturas promedio, los resultados fueron exportados en tablas por superficie, horario y zona de la vivienda. Estos datos permitieron comparar la evolución térmica de elementos exteriores e interiores, identificar superficies críticas y reconocer patrones de almacenamiento y liberación de calor. Asimismo, los valores obtenidos fueron utilizados como insumo para la caracterización térmica del Capítulo 4 y para la posterior definición de condiciones de frontera en la modelación CFD.



Figura 3. 22. Flujo de procesamiento en Python para la conversión de imágenes termográficas en datos de temperatura superficial promedio.

Fuente: elaboración propia con base en levantamiento termográfico y procesamiento en Python.

3.6 Monitoreo higrotérmico

El monitoreo higrotérmico permitió registrar la evolución ambiental de la vivienda durante el periodo cálido, integrando temperatura del aire, humedad relativa y temperatura superficial. Estas variables fueron seleccionadas por su relación directa con el confort térmico, la acumulación de calor y la

respuesta de la envolvente, de acuerdo con criterios de medición ambiental interior y confort adaptativo (ASHRAE, 2020; ISO, 1998; de Dear & Brager, 1998; Nicol & Humphreys, 2002).

3.6.1 Temperatura interior

La temperatura interior se utilizó para identificar el comportamiento térmico de los espacios habitables y comparar la respuesta entre planta baja, planta alta, escaleras y habitaciones superiores. Su análisis permitió reconocer diferencias asociadas a exposición solar, acumulación de calor, ventilación disponible y transferencia térmica desde la envolvente hacia el aire interior (Incropera et al., 2007; ASHRAE, 2021)

3.6.2 Humedad relativa

La humedad relativa se registró como variable complementaria de la temperatura del aire, debido a su influencia sobre la sensación térmica y los procesos de enfriamiento evaporativo del cuerpo humano. Su integración con la temperatura permitió calcular indicadores derivados como el Índice de Calor (HI) y el Déficit de Presión de Vapor (VPD), utilizados para interpretar condiciones de estrés higrotérmico (ASHRAE, 2020; Vellei et al., 2017; NOAA, 2023; Allen et al., 1998).

3.6.3 Temperatura superficial

La temperatura superficial permitió relacionar el comportamiento del aire interior con la respuesta térmica de muros, cubierta y superficies expuestas. Esta variable fue necesaria para identificar elementos de la envolvente capaces de almacenar calor durante el día y transferirlo posteriormente hacia el interior, proceso asociado a conducción, convección y radiación térmica (Incropera et al., 2007; Howell et al., 2010; Morón et al., 2018; Ruiz Torres et al., 2019).

3.6.4 Variabilidad temporal

La variabilidad temporal se analizó mediante series continuas para identificar horarios críticos, calentamiento progresivo, enfriamiento retardado y diferencias entre el ambiente exterior e interior. Este análisis permitió vincular los datos instrumentales con la percepción térmica reportada por los habitantes y sirvió como base para los indicadores derivados, el procesamiento estadístico y la selección de condiciones representativas para CFD Humphreys & Nicol, (2000-2002).

3.7 Indicadores derivados

A partir de las variables registradas durante el monitoreo higrotérmico se calcularon indicadores derivados para ampliar la interpretación física de las condiciones interiores y exteriores de la vivienda. Estos indicadores permitieron relacionar temperatura del aire, humedad relativa, sensación térmica aparente, potencial evaporativo, estratificación vertical y dependencia estadística entre variables ambientales. Su aplicación permitió pasar de una descripción directa de los datos a una interpretación del estrés higrotérmico, la acumulación de calor y la respuesta térmica interior. Esta metodología se apoya en el artículo de monitoreo higrotérmico, donde se integraron temperatura, humedad relativa, Índice de Calor, Déficit de Presión de Vapor y diferenciales verticales para evaluar el comportamiento térmico de la vivienda, desarrollado por Vázquez-Chávez et al. (2026b).

3.7.1 Índice de calor

El Índice de Calor se utilizó para estimar la temperatura aparente percibida por los ocupantes a partir de la combinación entre temperatura del aire y humedad relativa. Este indicador resulta útil en climas cálidos, ya que la humedad puede reducir la capacidad de enfriamiento evaporativo del cuerpo humano e incrementar la sensación térmica respecto a la temperatura registrada directamente por el sensor (Rothfusz, 1990; NOAA, 2023).

Para el cálculo del Índice de Calor se empleó la ecuación de Rothfusz utilizada por el National Weather Service:

$$HI = -42.379 + 2.04901523T + 10.14333127HR - 0.22475541T(HR) - 6.83783 \times 10^{-3}T^2 - 5.481717 \times 10^{-2}HR^2 + 1.22874 \times 10^{-3}T^2(HR) + 8.5282 \times 10^{-4}T(HR)^2 - 1.99 \times 10^{-6}T^2(HR)^2 \quad (3.3)$$

donde HI_F es el Índice de Calor en °F, T_F es la temperatura del aire en °F y RH es la humedad relativa en %.

Posteriormente, el valor obtenido se convirtió a grados Celsius mediante:

$$HI = \frac{HI_F - 32}{1.8} \quad (3.4)$$

donde HI es el Índice de Calor en °C.

Este indicador permitió comparar la severidad térmica aparente entre los distintos espacios monitoreados y relacionar las condiciones instrumentales con la percepción de calor reportada por los habitantes.

3.7.2 Déficit de presión de vapor

El Déficit de Presión de Vapor se calculó para estimar la diferencia entre la presión de vapor de saturación y la presión real de vapor presente en el aire. Este indicador permite interpretar el potencial evaporativo del ambiente y complementar la evaluación del confort térmico bajo condiciones de temperatura elevada (Allen et al., 1998; Monteith & Unsworth, 2013).

La presión de vapor de saturación se calculó mediante la formulación recomendada por FAO-56:

$$e_s = 0.6108 \cdot \exp\left(\frac{17.27T_a}{T_a + 237.3}\right) \quad (3.5)$$

donde e_s es la presión de vapor de saturación en kPa y T_a es la temperatura del aire en °C.

La presión real de vapor se obtuvo a partir de la humedad relativa:

$$e_a = e_s \cdot \frac{HR}{100} \quad (3.6)$$

donde e_a es la presión real de vapor en kPa, e_s es la presión de vapor de saturación en kPa y RH es la humedad relativa en %.

Finalmente, el Déficit de Presión de Vapor se calculó como:

$$VPD = e_s - e_a \quad (3.7)$$

3.7.3 Estratificación térmica

La estratificación térmica se evaluó mediante el diferencial de temperatura entre planta alta y planta baja. Este indicador permitió identificar si los espacios superiores presentaban temperaturas mayores respecto a los niveles inferiores, condición asociada a flotación térmica, acumulación de calor y exposición directa de la cubierta (Incropera et al., 2007; Baborska-Narożny et al., 2016).

El diferencial térmico vertical se calculó como:

$$\Delta T = T_P - T_{PB} \quad (3.8)$$

donde ΔT_v es el diferencial térmico vertical en °C, T_{PA} es la temperatura registrada en planta alta y T_{PB} es la temperatura registrada en planta baja.

Valores positivos de ΔT_v indican mayor temperatura en planta alta, mientras que valores cercanos a cero sugieren una distribución térmica más homogénea entre niveles.

De forma complementaria, se calculó el diferencial vertical de humedad relativa:

$$\Delta HR = HR_{PA} - HR_{PB} \quad (3.9)$$

donde ΔRH_v es el diferencial vertical de humedad relativa en %, RH_{PA} es la humedad relativa registrada en planta alta y RH_{PB} es la humedad relativa registrada en planta baja.

Este cálculo permitió analizar si el incremento térmico en planta alta se relacionó con una reducción relativa de humedad, comportamiento coherente con la dinámica psicrométrica del aire interior.

3.7.4 Correlaciones térmicas

Las correlaciones térmicas se emplearon para evaluar la relación estadística entre temperatura del aire y humedad relativa en los puntos monitoreados. Para ello se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, el cual permite identificar la dirección e intensidad de una relación lineal entre dos variables continuas (Pearson, 1895; Wilks, 2011).

Para evaluar la relación entre temperatura del aire y humedad relativa se empleó:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3.10)$$

donde r es el coeficiente de correlación de Pearson, x_i son los valores de temperatura, y_i son los valores de humedad relativa, $\bar{x}$ y $\bar{y}$ son sus promedios, y n es el número total de datos.

En este estudio, la correlación permitió identificar la relación entre temperatura y humedad relativa durante los periodos de calentamiento, así como comparar la respuesta higrotérmica entre exterior, planta baja, planta alta y zonas de transición.

3.8 Procesamiento estadístico

El procesamiento estadístico permitió depurar, organizar y analizar los datos experimentales obtenidos mediante sensores IoT, UAV y termografía infrarroja cuantitativa. Esta etapa integró las mediciones directas con los indicadores derivados definidos previamente: Índice de Calor, calculado mediante las ecuaciones (3.3) y (3.4); Déficit de Presión de Vapor, obtenido mediante las ecuaciones (3.5), (3.6) y (3.7); diferenciales verticales, calculados con las ecuaciones (3.8) y (3.9); y correlación de Pearson, definida en la ecuación (3.10). El análisis siguió criterios de organización temporal, depuración y estadística descriptiva empleados en estudios ambientales y meteorológicos (Wilks, 2011; WMO, 2008).

Para el monitoreo higrotérmico se utilizó una rutina desarrollada en RStudio, con la base de datos propia experimental. El procesamiento incluyó normalización de encabezados, homologación de sensores, revisión de horarios, verificación de la escala de humedad relativa y cálculo de indicadores derivados. El uso de RStudio permitió mantener un flujo reproducible de limpieza, análisis y visualización de datos (R Core Team, 2024; Posit Team, 2024).

Para los datos de viento se empleó el flujo una base de datos de 30 días de monitoreo por 3 vuelos al día, teniendo una aproximación de 150 vuelos totales, orientado al procesamiento de velocidad, dirección, altura y tiempo de adquisición. Este procedimiento permitió aplicar filtros de calidad, calcular métricas descriptivas, representar series temporales y corregir discontinuidades angulares entre 0° y 360°. Debido a que la dirección del viento es una variable circular, su tratamiento requirió estadística específica para evitar errores de interpretación (Fisher, 1993; Mardia & Jupp, 2000).

Los resultados de este procesamiento se utilizaron como base para la caracterización térmica y microclimática del Capítulo 4, así como para la integración de datos en la carta bioclimática de Givoni y la selección posterior de condiciones de frontera para CFD.

3.8.1 Series temporales

Las series temporales se emplearon para analizar la evolución de las variables monitoreadas durante el periodo experimental. En el caso del monitoreo higrotérmico, permitieron identificar ciclos diarios de calentamiento y enfriamiento, horarios críticos, persistencia térmica, diferencias entre niveles y posibles desfases entre el ambiente exterior y la respuesta interior de la vivienda. Este tipo de análisis resulta fundamental cuando se estudian variables ambientales con variación horaria, diaria o estacional (Wilks, 2011).

En el caso del viento, las series temporales permitieron representar la evolución de velocidad y dirección durante cada vuelo. Esta información fue útil para reconocer ráfagas, periodos de calma, cambios direccionales y variaciones asociadas al horario de monitoreo. Por ello, las series temporales funcionaron como primer nivel de análisis antes del cálculo de estadísticos, histogramas, rosas de viento y métricas circulares (WMO, 2008; Stull, 1988).

3.8.2 Correlación de Pearson

La correlación de Pearson se aplicó para evaluar la relación lineal entre temperatura del aire y humedad relativa en los puntos monitoreados, utilizando el coeficiente definido previamente en la ecuación (3.10). En esta etapa no se buscó establecer causalidad directa, sino identificar la intensidad y dirección de la relación entre ambas variables durante los periodos de calentamiento y enfriamiento. El coeficiente de Pearson es una herramienta estadística ampliamente utilizada para analizar la asociación lineal entre variables continuas (Pearson, 1895; Wilks, 2011).

Este análisis permitió reconocer si el incremento de temperatura se asociaba con una disminución de humedad relativa, comportamiento esperado en condiciones de calentamiento del aire cuando el contenido de vapor no aumenta en la misma proporción. La correlación también permitió comparar el grado de acoplamiento higrotérmico entre exterior, planta baja, planta alta y zonas de transición. Esta interpretación se relaciona con principios psicrométricos empleados en el análisis de confort térmico y ambientes interiores (ASHRAE, 2021; ISO, 1998).

Los resultados derivados de este procedimiento fueron empleados como apoyo para interpretar diferencias entre espacios y para relacionar el comportamiento instrumental con la percepción térmica reportada por los habitantes. Así, la correlación funcionó como una herramienta estadística complementaria para analizar el desacoplamiento térmico entre ambiente exterior e interior.

3.8.3 Rosas de viento

Las rosas de viento se utilizaron para representar la frecuencia de ocurrencia de las direcciones del viento y su relación con rangos de velocidad. Esta herramienta permitió identificar sectores dominantes de procedencia, dispersión direccional y posibles patrones de canalización asociados al entorno urbano inmediato. Su uso es común en meteorología aplicada para describir de manera sintética el comportamiento direccional y la distribución de velocidades del viento (WMO, 2008).

Para su construcción, los registros de dirección fueron agrupados en sectores angulares y la velocidad se clasificó en rangos representativos. Esta representación permitió analizar no solo la dirección media del viento, sino también la frecuencia con la que el flujo incidió desde determinados sectores. Este criterio resultó importante para evaluar la orientación de fachadas, ventanas y posibles dispositivos de captación de aire.

En el contexto de la ventilación pasiva, las rosas de viento permitieron valorar si el flujo disponible incidía de manera favorable sobre la vivienda o si tendía a desplazarse paralelo a las fachadas. Esta información se consideró posteriormente en la selección de condiciones de frontera para la modelación CFD. En entornos urbanos, la interpretación de rosas de viento debe considerar la influencia de rugosidad superficial, canalización, estelas y obstáculos cercanos (Oke, 1987; Stull, 1988).

3.8.4 Estadística circular

La estadística circular se aplicó al análisis de la dirección del viento debido a la naturaleza angular de esta variable. A diferencia de la temperatura, la humedad relativa o la velocidad, la dirección del viento no puede promediarse mediante procedimientos aritméticos simples, ya que valores cercanos a 0° y 360° representan direcciones próximas y no extremos opuestos (Fisher, 1993).

Por esta razón, se emplearon criterios de estadística circular para estimar dirección media, dispersión direccional y coherencia del flujo. Este procedimiento evitó errores asociados al tratamiento lineal de datos angulares y permitió representar con mayor precisión el comportamiento direccional del viento registrado mediante UAV. La estadística circular es especialmente adecuada para variables como

dirección del viento, orientación y otros fenómenos periódicos o angulares (Fisher, 1993; Mardia & Jupp, 2000).

La aplicación de estadística circular fue importante para comparar vuelos realizados en diferentes horarios y alturas. A partir de este análisis fue posible identificar sectores predominantes, cambios de dirección, dispersión angular y variabilidad asociada a la rugosidad urbana y a las condiciones atmosféricas locales. Estos resultados sirvieron como base para interpretar la disponibilidad real de viento útil y para definir condiciones aerodinámicas representativas en el modelo CFD.

En conjunto, el procesamiento estadístico permitió depurar, estructurar y representar los datos experimentales de manera coherente con los objetivos de la investigación. A partir de esta base, el siguiente apartado integra los registros de temperatura y humedad en la carta bioclimática de Givoni, con el propósito de evaluar las condiciones de confort y las estrategias pasivas potencialmente aplicables al caso de estudio.

3.9 Estimación de carga térmica en espacios habitacionales

La estimación de carga térmica se desarrolló con el propósito de cuantificar la energía que debe ser removida del cuarto crítico para alcanzar condiciones más favorables de confort térmico. Este procedimiento permitió relacionar las temperaturas superficiales obtenidas mediante termografía infrarroja cuantitativa con la capacidad potencial de enfriamiento por ventilación natural y con las condiciones de frontera utilizadas posteriormente en las simulaciones CFD.

La metodología se fundamentó en los principios de transferencia de calor en edificaciones, considerando que la envolvente intercambia energía con el aire interior mediante mecanismos de convección y radiación térmica (Incropera et al., 2007; Howell et al., 2010). Para ello se emplearon las temperaturas superficiales obtenidas experimentalmente, las áreas de cada superficie y una temperatura de referencia asociada a condiciones de confort, siguiendo criterios utilizados en análisis térmicos de edificios (ASHRAE, 2021; Awbi, 2003).

El objetivo de este cálculo no fue dimensionar un sistema de climatización, sino establecer una referencia física de la carga térmica impuesta por la envolvente. De esta manera, los resultados obtenidos permiten comparar el calor acumulado en la vivienda con el potencial de disipación asociado a la ventilación natural y a la torre de viento propuesta, constituyendo un enlace entre la caracterización experimental y la modelación numérica desarrollada posteriormente.

3.9.1 Definición de la condición de confort de referencia

La estimación de la carga térmica fue necesario establecer una condición de referencia que permitiera cuantificar el sobrecalentamiento del recinto. Como temperatura objetivo se adoptó un valor de 24 - 26 °C, consistente con los rangos de confort térmico reportados para espacios habitados en climas cálidos y utilizados frecuentemente en estudios de ventilación natural, confort adaptativo y análisis energéticos de edificaciones (ASHRAE, 2021; Givoni, 1998; Nicol & Humphreys, 2002; de Dear & Brager, 2002).

3.9.2 Caracterización geométrica del recinto

El análisis de carga térmica se realizó sobre el cuarto crítico ubicado en la planta alta de la vivienda. La selección de este espacio se fundamentó en que representa la zona con mayor exposición a las

ganancias térmicas provenientes de la cubierta y de la envolvente exterior, condición comúnmente reportada en viviendas de interés social ubicadas en climas cálidos (ASHRAE, 2021; Givoni, 1998).

Para la estimación de carga térmica se consideraron las dimensiones geométricas reales del recinto, incluyendo piso, cubierta y superficies verticales que delimitan el volumen interior. A partir de estas dimensiones se determinaron las áreas de intercambio térmico y el volumen de aire contenido en el espacio, parámetros necesarios para la aplicación de los modelos de transferencia de calor y ventilación natural desarrollados en los apartados posteriores.

ID	Superficie	Tipo	A _i [m ²]	T _{s,i} [°C]	Material / Nota.
1	Azotea HP	Techo	12.4	46.0	Concreto pintado blanco
2	Piso PA	Piso	12.4	36.1	Loseta cerámica
3	MPAS (Sur)	Muro	8.62	38.1	Concreto beige + ventanas (vidrio 5 mm, 1.74 m ²)
4	MPAE (Este)	Muro	7.20	39.0	Concreto beige
5	MPAN (Norte)	Muro	8.38	37.4	Concreto beige + puerta de madera (1.98 m ²)
6	MPACO (colindante)	Muro	7.20	35.5	Concreto beige (colinda con otra casa)

Tabla 3. 2. Características de superficies de caso de estudio.

3.9.3 Modelo de transferencia de calor superficie-aire

El modelo de transferencia de calor superficie-aire se planteó con el propósito de representar el intercambio térmico entre las superficies interiores del cuarto crítico y la condición de referencia de confort definida previamente. En este análisis, las superficies de la envolvente se consideraron como fronteras térmicas activas, debido a que sus temperaturas fueron obtenidas experimentalmente mediante termografía infrarroja cuantitativa y representan el estado térmico real del recinto durante el periodo crítico de evaluación.

Con base en los fundamentos de intercambio térmico superficial desarrollados en el apartado 2.5.1, se estableció un modelo para cuantificar la transferencia de calor desde las superficies interiores del cuarto crítico hacia el ambiente del recinto. Las superficies se consideraron fronteras térmicas activas, debido a que sus temperaturas fueron obtenidas experimentalmente mediante termografía infrarroja cuantitativa y representan su estado térmico durante el periodo crítico de evaluación.

Para aplicar el modelo fue necesario determinar, en cada superficie, la diferencia entre la temperatura superficial medida y la temperatura de referencia de confort adoptada en el apartado 3.9.1.

$$\Delta T_i = T_{s,i} - T_{ref} \quad (3.11)$$

Donde:

ΔT_i = diferencia térmica de la superficie *i* respecto a la condición de referencia (°C)

$T_{s,i}$ = temperatura superficial interior medida de la superficie *i* (°C)

T_{ref} = temperatura de referencia de confort (26 °C)

La diferencia térmica obtenida para cada superficie se empleó como fuerza impulsora del intercambio de calor. El coeficiente total $h_{t,i}$ se determinó mediante la ecuación (2.4), utilizando los coeficientes radiativo y convectivo calculados mediante los procedimientos descritos en los apartados 3.9.4 y 3.9.5.

Sustituyendo la definición del coeficiente total y diferencial de temperatura en la ecuación de carga por superficie, el modelo también puede expresarse como:

$$Q_{s-a,i} = A_i(h_{c,i} + h_{r,i})(T_{s,i} - T_{ref}) \quad (3.12)$$

Donde:

$Q_{s-a,i}$ = carga térmica transferida desde la superficie i hacia el aire interior (W)

A_i = área de la superficie i (m²)

$h_{c,i}$ = coeficiente convectivo interior (W/m²K)

$h_{r,i}$ = coeficiente radiativo equivalente interior (W/m²K)

$T_{s,i}$ = temperatura superficial interior medida (°C)

T_{ref} = temperatura de referencia de confort (°C)

Mediante esta expresión se calculó la carga térmica aportada por cada superficie del cuarto crítico, considerando su área, temperatura superficial medida y coeficientes convectivo y radiativo. Ambos coeficientes se evaluaron de manera independiente para conservar la contribución física de cada mecanismo de transferencia.

Para el conjunto de superficies interiores del cuarto crítico, la carga térmica total asociada a la envolvente puede plantearse como la suma de las contribuciones individuales:

$$Q_{env} = \sum_{i=1}^n Q_{s-a,i} \quad (3.13)$$

Donde:

Q_{env} = carga térmica total aportada por la envolvente interior (W)

$Q_{s-a,i}$ = carga térmica aportada por la superficie i (W)

n = número total de superficies consideradas

La carga térmica de la envolvente se obtuvo mediante la suma de las contribuciones individuales del piso, la cubierta y las cuatro superficies verticales consideradas. Este procedimiento permitió integrar en un solo balance el efecto térmico de las seis superficies que delimitan el cuarto crítico.

Sustituyendo la expresión de carga por superficie, la carga térmica total por envolvente puede expresarse como:

$$Q_{env} = \sum_{i=1}^n A_i h_{t,i} (T_{s,i} - T_{ref}) \quad (3.14)$$

Donde:

Q_{env} = carga térmica total aportada por la envolvente interior (W)

A_i = área de la superficie i (m²)

$h_{t,i}$ = coeficiente total interior de transferencia de calor de la superficie i (W/m²K)

$T_{s,i}$ = temperatura superficial interior medida de la superficie i (°C)

T_{ref} = temperatura de referencia de confort (°C)

n = número total de superficies consideradas

3.9.4 Estimación del coeficiente radiativo equivalente

Con base en la formulación de radiación térmica desarrollada en el apartado 2.5.2, se estimó un coeficiente radiativo equivalente para cada superficie interior del cuarto crítico. El cálculo se realizó mediante la ecuación (2.8), utilizando la temperatura superficial obtenida experimentalmente, una temperatura radiativa efectiva de referencia y la emisividad adoptada para los acabados interiores.

Para su aplicación al caso de estudio, la temperatura radiativa efectiva del entorno interior se aproximó mediante la temperatura de referencia de confort:

$$T_{r,i,K} \approx T_{ref,K} \quad (3.15)$$

Donde:

$T_{r,i,K}$ = temperatura radiativa efectiva del entorno interior (K)

$T_{ref,K}$ = temperatura de referencia de confort expresada en Kelvin (K)

Esta aproximación permitió evaluar el intercambio radiativo de las superficies respecto a la condición térmica objetivo del recinto. Su utilización constituye una simplificación metodológica del balance térmico, por lo que la temperatura de referencia adoptada se mantuvo constante y se declaró explícitamente durante el cálculo (ASHRAE, 2021; Howell et al., 2010).

Con la temperatura de referencia adoptada:

$$T_{ref} = 26^{\circ}C$$

se obtuvo:

$$T_{ref,K} = 26 + 273.15 = 299.15 K \quad (3.16)$$

$T_{ref,K}$ = temperatura de referencia absoluta (K)

T_{ref} = temperatura de referencia en grados Celsius ($^{\circ}C$)

Para las superficies interiores evaluadas, se adoptó una emisividad efectiva alta:

$$\varepsilon_{ef,i} = 0.90$$

Donde:

$\varepsilon_{ef,i}$ = emisividad efectiva interior adoptada para la superficie.

Este valor representa una aproximación razonable para superficies constructivas interiores de alta emisividad, como concreto pintado, loseta cerámica y acabados interiores comunes. La adopción de una emisividad única permite mantener una estimación homogénea y metodológicamente clara para las superficies del recinto, sin introducir una diferenciación innecesaria entre materiales con comportamiento radiativo similar (ASHRAE, 2021; Howell et al., 2010).

Al sustituir en la ecuación (2.8) la temperatura radiativa de referencia y la emisividad efectiva adoptadas, la expresión aplicada a cada superficie del caso de estudio quedó definida como:

$$h_{r,i} = 0.90(5.670 \times 10^{-8})(T_{s,i,K} + 299.15)(T_{s,i,K}^2 + 299.15^2) \quad (3.17)$$

Donde:

$h_{r,i}$ = coeficiente radiativo equivalente interior de la superficie i (W/m^2K)

$T_{s,i,K}$ = temperatura superficial interior absoluta de la superficie i (K)

299.15 = temperatura de referencia de confort expresada en Kelvin (K)

0.90 = emisividad efectiva interior adoptada.

5.670×10^{-8} = constante de Stefan-Boltzmann (W/m^2K^4)

La expresión se aplicó individualmente al piso, la cubierta y los cuatro muros del cuarto crítico, utilizando las temperaturas superficiales obtenidas mediante termografía infrarroja cuantitativa. Por consiguiente, no se consideró constante para todo el recinto, sino que se determinó en función de la temperatura absoluta de cada superficie.

3.9.5 Estimación del coeficiente convectivo interior

Con base en los fundamentos de convección natural desarrollados en el apartado 2.5.3, se estimó el coeficiente convectivo interior $h_{c,i}$ para cada superficie del cuarto crítico. La estimación se realizó mediante correlaciones empíricas diferenciadas según la orientación de la superficie y la dirección del intercambio térmico.

En la formulación general, el intercambio convectivo depende de la diferencia entre la temperatura superficial y la temperatura del aire adyacente. Sin embargo, debido a que el objetivo de este balance fue estimar la contribución térmica de las superficies respecto a la condición de confort, se adoptó como condición de cálculo:

En consecuencia, la diferencia de temperatura utilizada para estimar los coeficientes convectivos correspondió a , definida previamente mediante la ecuación (3.11):

Esta decisión representa una condición de referencia para estimar la carga térmica que debería removerse a fin de mantener el recinto a 26° C. Por lo tanto, los valores obtenidos no representan el flujo convectivo instantáneo bajo la temperatura real medida del aire interior, sino el intercambio estimado respecto a la condición térmica objetivo.

Para estimar el coeficiente convectivo interior se adoptó una formulación empírica dependiente de la orientación de la superficie:

$$h_{c,i} = C_o | \Delta T_i |^{n_o} \quad (3.18)$$

Donde:

$h_{c,i}$ = coeficiente convectivo interior de la superficie i (W/m^2K)

C_o = constante empírica asociada a la orientación de la superficie

ΔT_i = diferencia térmica superficie-referencia (K o °C)

n_o = exponente empírico asociado a la orientación de la superficie

o = orientación o condición de la superficie evaluada

Esta forma general representa correlaciones empíricas de convección natural interior, donde el coeficiente convectivo aumenta con la diferencia de temperatura, pero lo hace de manera no lineal. La dependencia con la orientación se debe a que la flotabilidad favorece o limita el movimiento del

aire dependiendo de si la superficie caliente es vertical, horizontal inferior o horizontal superior (Awbi, 2003; Incropera et al., 2007).

Para el caso de superficies interiores más calientes que la condición de referencia, que se consideró en la ecuación 2.10

Las correlaciones se aplicaron individualmente a las seis superficies del cuarto crítico mediante las diferencias térmicas definidas en el apartado 3.9.3. Los valores resultantes de , su integración con los coeficientes radiativos y las cargas térmicas obtenidas para cada superficie se presentan en el capítulo 4.

Con base en este criterio, se aplicaron correlaciones diferenciadas por tipo de superficie. Para muros verticales calientes se empleó:

$$h_{c,muro} = 1.42 |\Delta T_i|^{1/4} \quad (3. 19)$$

Donde:

$h_{c,muro}$ = coeficiente convectivo interior para muro vertical caliente (W/m^2K)

ΔT_i = diferencia térmica entre la superficie del muro y la temperatura de referencia (K o $^{\circ}C$)

Esta correlación representa el intercambio convectivo natural en superficies verticales interiores, donde el aire calentado junto al muro asciende formando una capa límite térmica. Su uso es consistente con formulaciones empíricas empleadas en análisis térmico de recintos y convección natural en edificios (Awbi, 2003; Incropera et al., 2007).

Para el piso caliente, donde el aire calentado tiende a ascender desde la superficie horizontal inferior, se utilizó:

$$h_{c,piso} = 1.87 |\Delta T_i|^{1/3} \quad (3. 20)$$

Donde:

$h_{c,piso}$ = coeficiente convectivo interior para piso caliente (W/m^2K)

ΔT_i = diferencia térmica entre el piso y la temperatura de referencia (K o $^{\circ}C$)

Esta expresión representa una condición convectiva más favorable, ya que el calentamiento desde una superficie horizontal inferior promueve el ascenso del aire y una mayor renovación de la capa térmica cercana a la superficie. Por ello, el coeficiente convectivo del piso puede ser superior al de muros y techo bajo condiciones de convección natural interior (Awbi, 2003; ASHRAE, 2021).

Para el techo caliente, donde la superficie horizontal superior tiende a mantener el aire caliente en la parte alta del recinto, se adoptó:

$$h_{c,techo} = 0.65 |\Delta T_i|^{1/3} \quad (3. 21)$$

Donde:

$h_{c,techo}$ = coeficiente convectivo interior para techo caliente (W/m^2K)

ΔT_i = diferencia térmica entre el techo y la temperatura de referencia (K o $^{\circ}C$)

Esta correlación representa una condición convectiva menos favorable, debido a que el aire caliente permanece cerca de la parte superior del recinto y reduce la mezcla con el resto del volumen interior. Estas correlaciones se utilizaron únicamente para estimar el coeficiente convectivo interior de cada superficie.

3.9.6 Integración del balance térmico y evaluación de la ventilación natural

Con base en las formulaciones desarrolladas en los apartados 2.5.4, 2.5.5 y 2.5.6, se integró el balance térmico del cuarto crítico y se evaluó la capacidad potencial de la ventilación natural para remover calor sensible. El procedimiento comprendió tres etapas: determinación de las ganancias procedentes de la envolvente, incorporación de las cargas internas y comparación entre la capacidad de remoción del caudal disponible y la carga sensible total del recinto.

En la primera etapa se calcularon las contribuciones convectiva y radiativa del piso, la cubierta y los cuatro muros interiores. Para cada superficie se utilizaron el área correspondiente, la temperatura superficial obtenida mediante termografía infrarroja cuantitativa y los coeficientes $h_{c,i}$ y $h_{r,i}$ y determinados en los apartados 3.9.4 y 3.9.5.

Las diferencias térmicas se establecieron respecto a la temperatura de referencia de 26° C. La suma de las seis contribuciones permitió determinar la carga térmica de la envolvente mediante la ecuación (3.13).

En la segunda etapa se incorporaron las cargas internas correspondientes a una condición representativa de ocupación integrada por dos adultos y un menor. Para el menor se adoptó, como supuesto metodológico, un factor de equivalencia térmica de 0.70 respecto de un adulto:

Para una condición de reposo o actividad ligera se adoptaron los siguientes valores por ocupante equivalente:

La carga sensible generada por los ocupantes se determinó mediante la ecuación (2.12), mientras que la carga latente se calculó mediante la ecuación (2.13). Para la iluminación se consideró una lámpara 60 W de con un factor de utilización unitario. No se incorporaron equipos eléctricos adicionales, debido a que no se identificó su operación durante la condición analizada.

La carga interna sensible se sumó a la carga de la envolvente para obtener, conforme a la ecuación (2.17). La carga latente de los ocupantes se reportó de manera independiente y no se utilizó para evaluar la remoción de calor sensible mediante ventilación natural.

En la tercera etapa se evaluó el caudal potencial de ventilación correspondiente a las condiciones registradas a las 19:00 h. Ambas ventanas fueron consideradas como aberturas de entrada de aire. Cada una presentó un área abierta de: 0.087 m^2

Las velocidades medias registradas fueron:

Debido a que las velocidades fueron obtenidas directamente en las ventanas, el caudal disponible se calculó mediante la suma de los productos entre el área y la velocidad de cada abertura, de acuerdo con la ecuación (2.22). No se aplicó un coeficiente de descarga adicional.

Para la evaluación térmica se utilizaron las condiciones de aire interior y exterior registradas a las 19:00 h:

La capacidad instantánea de remoción de calor sensible se calculó mediante la ecuación (2.20). Posteriormente, el caudal requerido para compensar la carga sensible total se determinó mediante la ecuación (2.28), y la cobertura térmica del caudal disponible se obtuvo mediante la ecuación (2.25).

La condición de velocidad utilizada presentó una frecuencia relativa de ocurrencia equivalente al del periodo monitoreado. Por consiguiente, además de la capacidad instantánea, se calculó la capacidad de remoción ponderada mediante la ecuación (2.24). Este segundo indicador permitió incorporar la disponibilidad temporal de la condición de viento y evitar que su capacidad máxima fuera interpretada como una condición permanente.

Los resultados correspondientes a las cargas internas, la carga sensible total, el caudal disponible, el caudal requerido y las capacidades de remoción instantánea y ponderada se presentan y analizan en el capítulo 4

3.10 Modelo de carta bioclimática ajustada a Morelos

La carta base de Givoni fue ajustada a las condiciones climáticas del estado de Morelos con el propósito de representar la variabilidad regional entre zonas cálidas, semicálidas y templadas. Esta adaptación fue necesaria debido a que el estado presenta diferencias térmicas asociadas a altitud, topografía, humedad relativa y régimen climático, lo cual influye directamente en la efectividad de estrategias pasivas como la ventilación natural, la masa térmica, la ventilación nocturna o el enfriamiento evaporativo (Vázquez-Chávez et al., 2026b; INEGI, 2013; ASHRAE, 2021).

Las zonas bioclimáticas fueron representadas mediante polígonos dentro del plano psicrométrico. Para el caso de estudio, el mayor interés se concentró en las zonas de confort, ventilación natural, masa térmica con ventilación nocturna, enfriamiento evaporativo y sobrecalentamiento, debido a su relación directa con la evaluación de ventilación pasiva y torre de viento. De manera complementaria, se incluyeron zonas asociadas a ganancia solar pasiva, aislamiento térmico y protección frente a ventilación fría, con el fin de conservar la representación climática de regiones de mayor altitud dentro del estado Givoni (1992, 1998), ASHRAE (2021), Nicol y Humphreys (2002), Fernández et al. (2010), Bastide et al. (2006), CIBSE (2013, 2017) y Vázquez-Chávez et al. (2026b).

Zona bioclimática	Rango metodológico considerado	Uso dentro del análisis
Confort térmico	22–26 °C, con extensión adaptativa hasta aproximadamente 29 °C; HR 30–65 %	Identificar condiciones interiores o exteriores cercanas al confort térmico en espacios naturalmente ventilados.
Ventilación natural	26–32 °C; HR 20–35 %	Evaluar si el movimiento de aire puede favorecer la disipación térmica y mejorar la sensación térmica del ocupante.
Masa térmica y ventilación nocturna	20–26 °C; HR 20–55 %	Identificar condiciones donde la envolvente podría disipar calor acumulado mediante enfriamiento nocturno.
Enfriamiento evaporativo	27–36 °C; HR 35–75 %	Evaluar el potencial de reducción térmica mediante procesos evaporativos, considerando la humedad disponible.
Sobrecalentamiento y enfriamiento asistido	Temperaturas superiores a 30 °C fuera del rango de confort	Identificar condiciones críticas donde la ventilación natural o la torre de

		viento podrían ser insuficientes como estrategia aislada.
Ganancia solar pasiva	10–18 °C; HR 35–70 %	Zona complementaria para representar condiciones frías o de mayor altitud dentro del estado.
Masa térmica para calefacción	14–20 °C; HR 30–60 %	Identificar condiciones donde la inercia térmica puede conservar y liberar calor en climas templados o fríos.
Aislamiento térmico	9–16 °C; HR 25–55 %	Zona complementaria donde se requiere reducir pérdidas térmicas de la envolvente.
Protección frente a ventilación fría	9–15 °C; HR 35–65 %	Identificar condiciones donde el movimiento de aire puede incrementar la pérdida de calor corporal y reducir el confort.

Tabla 3. 3. Zonas bioclimáticas , establecidas para las características climáticas de Morelos, Mex..

En este apartado se incorpora únicamente la carta base vacía ajustada a Morelos, con el objetivo de mostrar el modelo de clasificación empleado. Los puntos correspondientes al monitoreo real se integran y analizan en el Capítulo 4, donde se evalúa la posición de los registros respecto a las zonas de confort, ventilación natural, enfriamiento evaporativo y sobrecalentamiento.

Carta bioclimática de Givoni para estaciones representativas de Morelos

Base de datos: INEGI / SEMARNAT

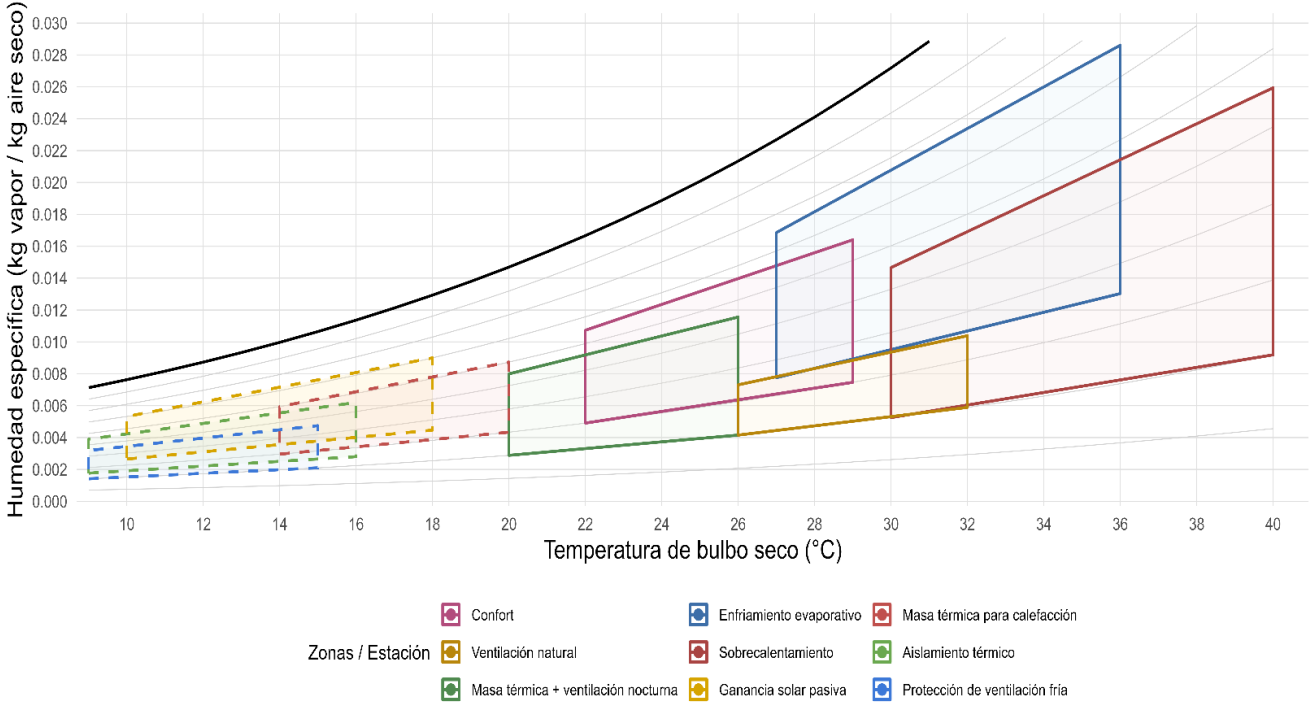


Figura 3. 23. Carta bioclimática base de Givoni ajustada a las condiciones climáticas de Morelos. Fuente: elaboración propia con base en Givoni (1992, 1998), ASHRAE (2021) y Vázquez-Chávez et al. (2026b).

3.10.1 Integración de datos monitoreados

La integración de datos monitoreados se planteó como la segunda etapa del análisis bioclimático. A partir de los registros de temperatura del aire y humedad relativa obtenidos en la vivienda, se calcularon las propiedades psicrométricas necesarias para ubicar cada punto dentro de la carta ajustada a Morelos. Este procedimiento permitió transformar los registros higrotérmicos en coordenadas interpretables dentro del espacio bioclimático (ASHRAE, 2021; Moran et al., 2018). Los datos utilizados para esta etapa provinieron del monitoreo higrotérmico descrito en el apartado 3.6 y del procesamiento estadístico indicado en el apartado 3.8.

En el Capítulo 4, los datos monitoreados se representan como puntos horarios y trayectorias dentro de la carta. Esta representación permitirá identificar si las condiciones reales de la vivienda se ubican dentro de zonas de confort, ventilación natural, enfriamiento evaporativo o sobrecalentamiento. Con ello se evaluará si el aire disponible en el sitio presenta condiciones favorables para que la ventilación natural o una torre de viento puedan contribuir a una reducción térmica perceptible.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS DE LA CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL

Los capítulos anteriores establecieron el problema, los fenómenos físicos que lo condicionan y la metodología utilizada para medirlos. A partir de esa base, el presente capítulo integra los resultados experimentales obtenidos durante el monitoreo higrotérmico, termográfico, bioclimático y atmosférico del caso de estudio.

4.1 Integración de resultados experimentales

El análisis se centra en el mes de mayo del 2025, identificado como periodo térmicamente crítico para la vivienda. Los resultados se presentan de forma comparativa entre ambiente exterior e interior, considerando temperatura, humedad relativa, temperatura superficial de la envolvente y comportamiento del viento cercano a la vivienda. Esta integración permitió identificar que el sobrecalentamiento interior no depende únicamente de la temperatura exterior, sino también de la acumulación térmica en muros y cubierta, la humedad relativa, la estratificación interior y la disponibilidad real de ventilación natural.

El análisis higrotérmico permitió comparar en una misma lectura las condiciones exteriores e interiores durante mayo, identificando horarios críticos, persistencia térmica y diferencias entre planta baja, planta alta y zonas de transición. De manera complementaria, la termografía infrarroja cuantitativa permitió reconocer superficies críticas de la envolvente capaces de almacenar y transferir calor hacia el interior.

La caracterización del viento mediante UAV permitió evaluar si el flujo cercano a la vivienda presentaba velocidad, dirección y continuidad suficientes para favorecer enfriamiento pasivo.

La integración de todos los datos permitió junto con la carta bioclimática de Givoni para valorar si las condiciones ambientales eran compatibles con confort térmico, ventilación natural o estrategias complementarias.

Con esta integración se estableció la base para seleccionar el periodo crítico de análisis y definir las condiciones representativas de frontera utilizadas posteriormente en la modelación CFD.

4.2 Monitoreo higrotérmico comparativo durante mayo

La Figura 4. 1 presenta la evolución temporal de la temperatura del aire y la humedad relativa durante mayo, considerando el sensor exterior ubicado en jardín y los cinco sensores interiores instalados en la vivienda. Esta representación conjunta permite comparar la respuesta higrotérmica exterior–interior y reconocer diferencias entre planta baja, planta alta, escaleras y habitaciones monitoreadas.

La temperatura del aire presentó ciclos diarios claramente definidos. El sensor exterior mostró mayor amplitud térmica, con descensos aproximados cercanos a 22–25 °C y aumentos diurnos próximos a 37–39 °C. En contraste, los sensores interiores presentaron una oscilación más amortiguada, con temperaturas comunes entre 26 y 39 °C. Este comportamiento indica que el interior no responde de forma instantánea al ambiente exterior, sino que conserva calor por efecto de la inercia térmica de la envolvente.

Monitoreo temporal de temperatura y humedad relativa durante mayo

Periodo crítico de análisis higrotérmico · Todos los sensores monitoreados

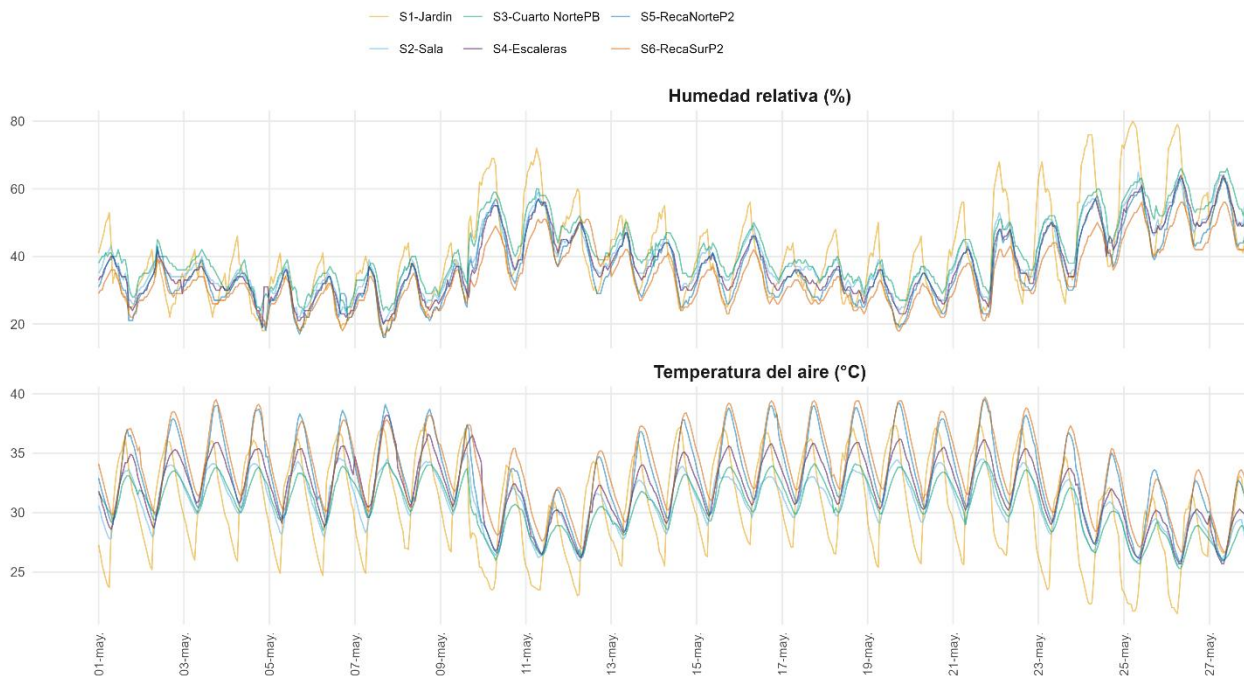


Figura 4. 1. Monitoreo temporal de temperatura del aire y humedad relativa durante mayo en sensor exterior e interiores de la vivienda.

A partir de la serie temporal se identificaron dos periodos de comportamiento cíclico o cuasiestacionario con tendencias similares: del 1 al 10 de mayo y del 14 al 20 de mayo. En ambos intervalos, las ondas diarias de temperatura mostraron patrones repetitivos de calentamiento y enfriamiento, con picos interiores elevados y persistencia térmica posterior al máximo exterior. Por ello, estos periodos se consideran críticos para el análisis de sobrecalentamiento y discomfort.

Los sensores de planta alta, particularmente las recámaras del segundo nivel registraron algunos de los valores interiores más elevados, con picos cercanos a 39–40 °C durante varios días del mes. Esta condición se relaciona con la proximidad de estos espacios a la cubierta, elemento expuesto directamente a la radiación solar y con capacidad de almacenar calor durante el día. La sala y el cuarto de planta baja presentaron valores ligeramente menores, aunque también mantuvieron temperaturas elevadas durante los periodos críticos.

La humedad relativa mostró un comportamiento inverso respecto a la temperatura. Durante los periodos de mayor calentamiento tendió a disminuir, mientras que en los periodos de menor temperatura aumentó. El sensor exterior presentó las mayores variaciones, con valores aproximados entre 20 % y 80 %, mientras que los sensores interiores se mantuvieron generalmente entre 25 % y 65 %. A partir del 23 al 27 de mayo se observó un incremento general de humedad relativa, condición que puede reducir el potencial de enfriamiento evaporativo y aumentar la sensación de bochorno.

En conjunto, la Figura 4. 1 evidencia que mayo presentó condiciones higrotérmicas críticas para la vivienda, congruentes con la opinión de la población encuestada sección 3.2. La identificación de los periodos del 1 al 10 de mayo y del 14 al 20 de mayo permitió reconocer ventanas representativas de sobrecalentamiento, persistencia térmica y discomfort, las cuales servirán como base para el análisis bioclimático, la evaluación de la envolvente y la selección posterior del periodo crítico para la modelación CFD.

4.2.1 Evolución conjunta de temperatura interior y exterior

Temperatura promedio diaria por sensor

Stats globales: $\mu=31.14$, $\sigma=2.07$, mediana=31.36 [p25=29.51, p75=32.46]

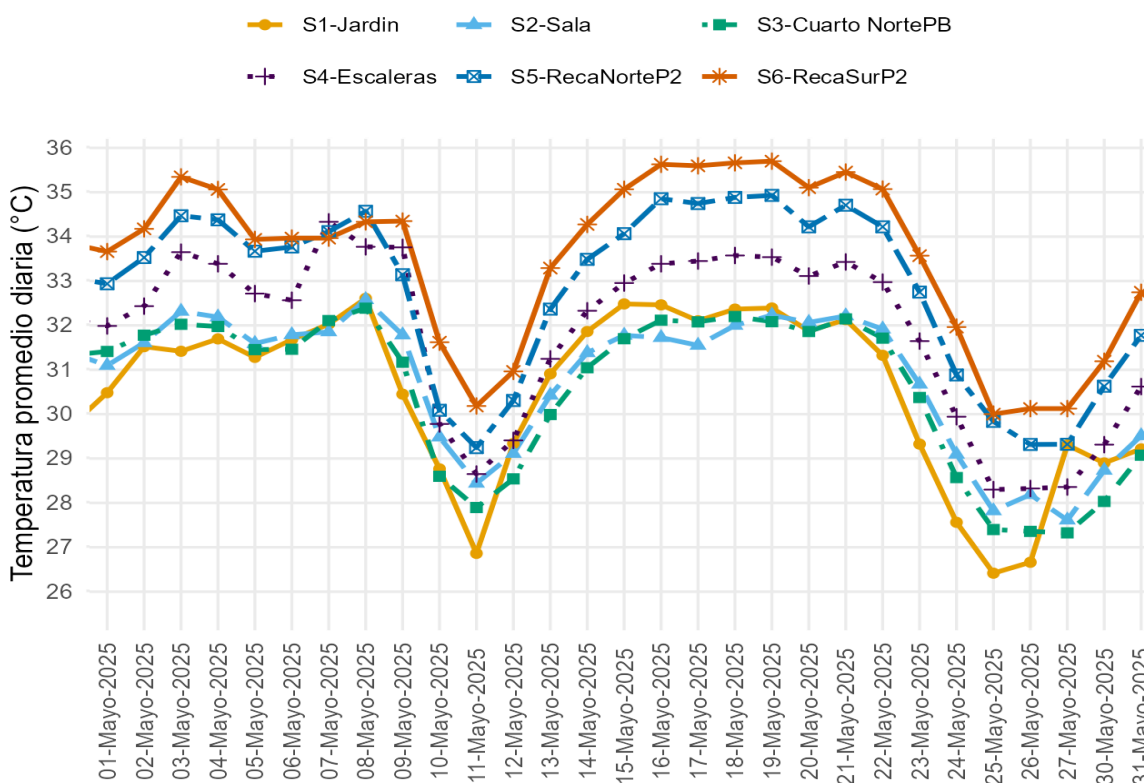


Figura 4. 2. Temperatura promedio diaria por sensor durante el periodo de monitoreo. Fuente: elaboración propia.

La Figura 4. 2 presenta la temperatura promedio diaria registrada por el sensor exterior y los cinco sensores interiores. En conjunto, la temperatura promedio fue de 31.14 °C, con desviación estándar de 2.07 °C, mediana de 31.36 °C y rango intercuartílico entre 29.51 y 32.46 °C.

Durante el periodo monitoreado se identificaron dos intervalos críticos con comportamiento cíclico o cuasiestacionario: del 1 al 10 de mayo y del 14 al 20 de mayo. En ambos casos se observaron patrones diarios repetitivos, temperaturas elevadas y mayor calentamiento en los sensores ubicados en planta alta.

Dentro del segundo intervalo, el 17 de mayo se seleccionó como día representativo porque formó parte de una meseta térmica sostenida, no de un pico aislado. En este periodo, la recámara sur de planta alta alcanzó promedios cercanos a 35–36 °C, la recámara norte alrededor de 34–35 °C, las escaleras entre 33–34 °C, y planta baja y jardín valores cercanos a 31–32 °C.

4.2.2 Evolución conjunta de humedad relativa interior y exterior

La Figura 4. 3, muestra la humedad relativa promedio diaria registrada por el sensor exterior y los sensores interiores. La humedad relativa presentó un promedio global de 34.56 %, desviación estándar de 10.02 %, mediana de 32.12 % y rango intercuartílico entre 27.42 y 39.66 %.

Humedad relativa promedio diaria por sensor

Stats globales: $\mu=34.56$, $\sigma=10.02$, mediana=32.12 [p25=27.42, p75=39.66]

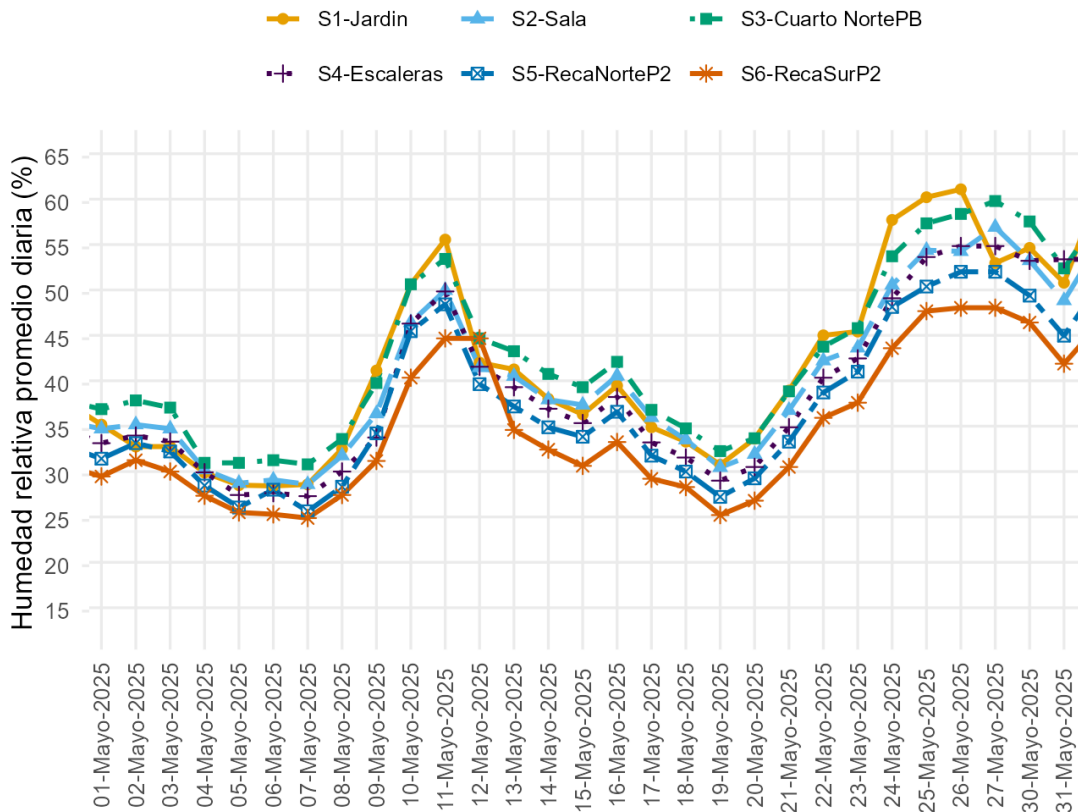


Figura 4. 3. Humedad relativa promedio diaria por sensor durante el periodo de monitoreo. Fuente: elaboración propia.

En los periodos de mayor temperatura, la humedad relativa tendió a disminuir, especialmente en los sensores interiores de planta alta. Durante el intervalo del 14 al 20 de mayo, los valores se mantuvieron en rangos moderados, aproximadamente entre 30 y 40 % en la mayoría de los sensores, mientras la temperatura permaneció elevada.

El 17 de mayo presentó una condición higrótérmica representativa del segundo periodo crítico: alta temperatura interior, humedad relativa moderada y diferencias claras entre sensores. Esta combinación permite evaluar si la ventilación natural o una torre de viento podrían mejorar la sensación térmica, o si la carga térmica acumulada limita su efectividad.

A partir del 23 de mayo se observó un incremento general de humedad relativa, con valores cercanos o superiores a 55–60 % en algunos sensores. Sin embargo, para la selección del periodo crítico, el 17 de mayo resulta más adecuado porque combina sobrecalentamiento interior con una humedad que no domina completamente la respuesta ambiental.

4.2.3 Índice de Calor y Déficit de Presión de Vapor durante el periodo cálido

Heat Index (Índice de Calor) promedio diario por sensor

Stats globales: $\mu=34.35$, $\sigma=3.26$, mediana=34.89 [p25=32.63, p75=36.59]

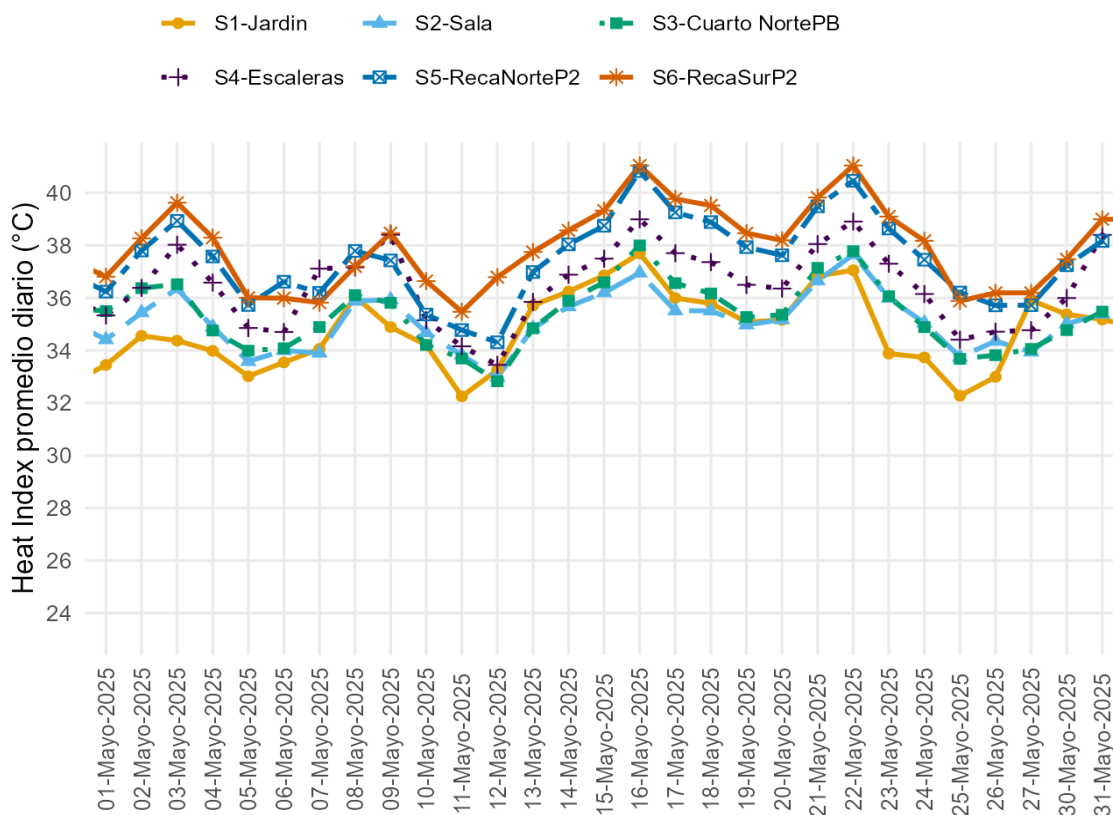


Figura 4. 4. Índice de Calor promedio diario por sensor durante mayo..

La Figura 4. 4, presenta el Índice de Calor promedio diario por sensor durante mayo. Este indicador integra la temperatura del aire y la humedad relativa para estimar la temperatura aparente percibida por el ocupante, por lo que permite interpretar la severidad térmica más allá de la temperatura medida. Su cálculo se realizó mediante las ecuaciones (3.3) y (3.4), con base en la formulación de Rothfusz utilizada por el National Weather Service (Rothfusz, 1990; NOAA, 2023).

En términos globales, el Índice de Calor presentó un promedio de 34.35 °C, desviación estándar de 3.26 °C, mediana de 34.89 °C y rango intercuartílico entre 32.63 y 36.59 °C. Estos valores indican que, durante gran parte del mes, la sensación térmica estimada se mantuvo en condiciones elevadas, aun cuando la humedad relativa no siempre alcanzó valores extremos.

Los sensores de planta alta, principalmente S6-Recámara Sur P2 y S5-Recámara Norte P2, registraron los valores más elevados, con promedios diarios cercanos o superiores a 39–40 °C en los días más críticos. Las escaleras también presentaron valores altos, mientras que sala, cuarto de planta baja y jardín se mantuvieron generalmente por debajo de las recámaras superiores.

En conjunto, el Índice de Calor evidencia que el discomfort no depende solo de la temperatura del aire, sino de su combinación con la humedad relativa.

4.2.4 Diferenciales Interior–Exterior

La Figura 4. 5, presenta el diferencial de temperatura entre el promedio de los sensores interiores y el sensor exterior ubicado en jardín. Valores positivos indican que el interior se encuentra más caliente que el exterior, mientras que valores negativos indican mayor temperatura exterior.

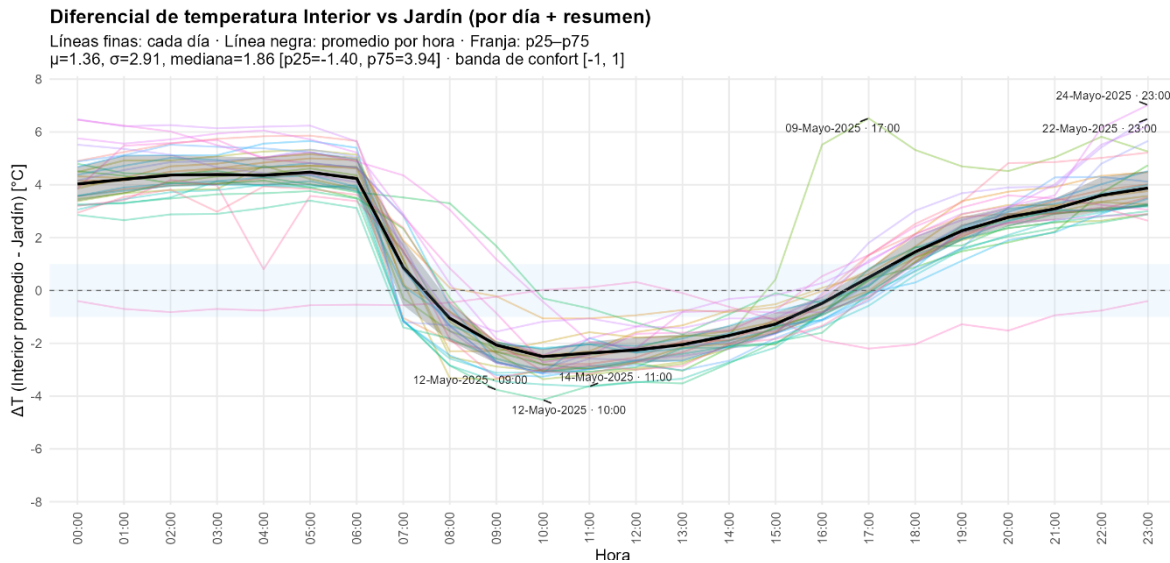


Figura 4. 5. Diferencial de temperatura Interior–Jardín por hora durante el periodo de monitoreo.

El diferencial promedio fue de 1.36 °C, con desviación estándar de 2.91 °C, mediana de 1.86 °C y rango intercuartílico entre -1.40 y 3.94 °C. Estos valores muestran que la vivienda tiende a conservar una condición interior más cálida durante una parte importante del día.

El comportamiento horario evidencia tres etapas. Entre 00:00 y 06:00 h, el interior se mantiene aproximadamente entre 4 y 4.5 °C por encima del jardín. Entre 08:00 y 14:00 h, el diferencial se vuelve negativo, con valores cercanos a -2.5 °C, indicando que el exterior se calienta más rápido durante la mañana. Posteriormente, hacia la tarde y noche, el diferencial vuelve a ser positivo, alcanzando valores entre 2 y 4 °C.

Este comportamiento confirma retardo térmico y persistencia de calor interior. La vivienda no se enfría al mismo ritmo que el exterior, debido a la energía almacenada en la envolvente.

4.2.5 Diferenciales Planta Alta–Planta Baja

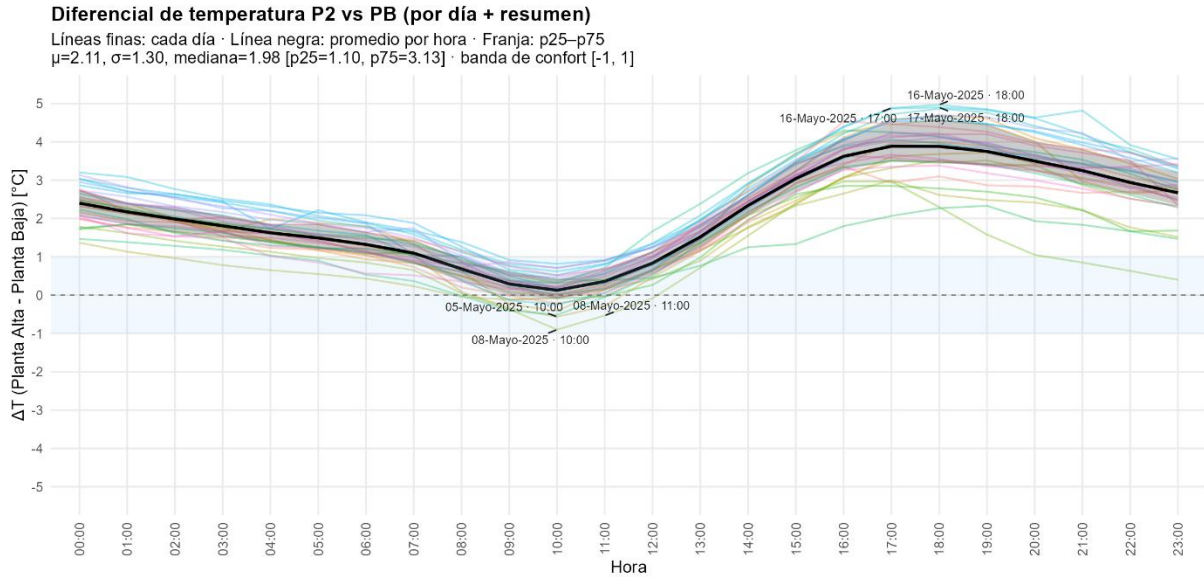


Figura 4. 6. Diferencial de temperatura Planta Alta–Planta Baja por hora durante el periodo de monitoreo..

La Figura 4. 6, presenta el diferencial térmico entre planta alta y planta baja, calculado conforme a la ecuación (3.8). Valores positivos indican que la planta alta se encuentra más caliente que la planta baja. En términos globales, el diferencial promedio fue de 2.11 °C, con desviación estándar de 1.30 °C, mediana de 1.98 °C y rango intercuartílico entre 1.10 y 3.13 °C.

El comportamiento horario muestra que la planta alta permanece más caliente durante la mayor parte del día. Entre las 16:00 y 19:00 h se observan los diferenciales más altos, con valores cercanos a 4–5 °C, especialmente durante los días críticos del 16 y 17 de mayo. En contraste, entre las 09:00 y 11:00 h el diferencial se aproxima a 0 °C, lo que indica una reducción temporal de la estratificación.

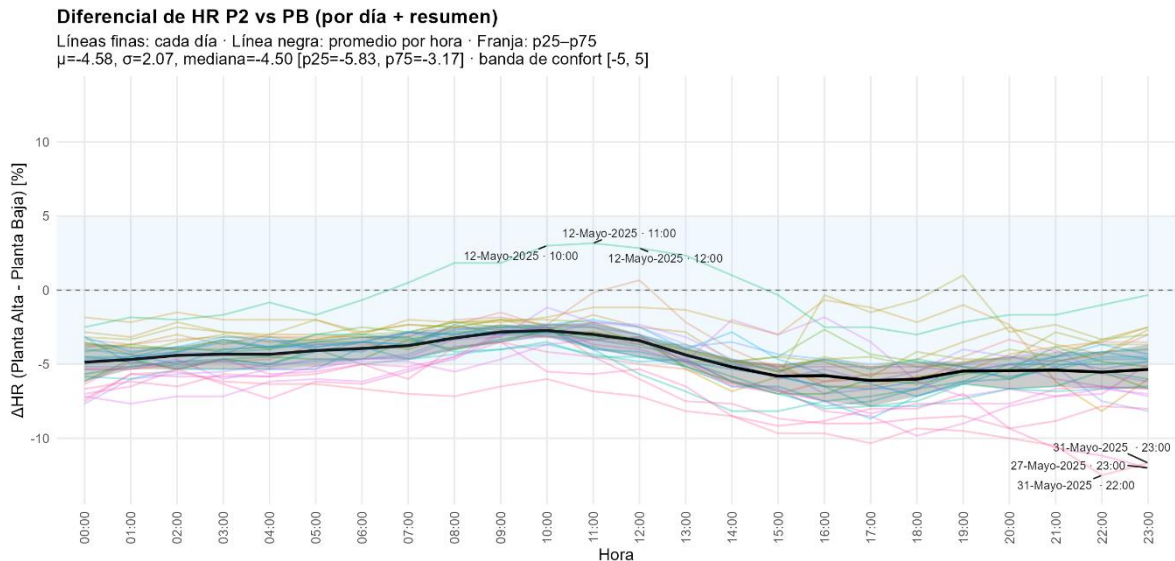


Figura 4. 7. Diferencial de humedad relativa Planta Alta–Planta Baja por hora durante el periodo de monitoreo.

La Figura 4. 7 muestra el diferencial de humedad relativa entre planta alta y planta baja, calculado conforme a la ecuación (3.9). El diferencial promedio fue de -4.58 %, con desviación estándar de 2.07 %, mediana de -4.50 % y rango intercuartílico entre -5.83 y -3.17 %. Estos valores indican que

la planta alta presentó menor humedad relativa que la planta baja durante la mayor parte del periodo monitoreado.

Esta relación entre mayor temperatura y menor humedad relativa en planta alta es coherente con la dinámica higrotérmica del aire interior. Al incrementarse la temperatura, la humedad relativa tiende a disminuir si el contenido de vapor no aumenta en la misma proporción. Por ello, los diferenciales Planta Alta–Planta Baja confirman la presencia de estratificación térmica interior, asociada a la proximidad de la planta alta con la cubierta y a la acumulación de calor en la envolvente.

4.2.6 Persistencia térmica y retardo de respuesta interior

A partir de los periodos críticos identificados en los apartados anteriores, el 17 de mayo se tomó como día representativo para analizar el desfase térmico e higrotérmico entre el ambiente exterior y el cuarto crítico ubicado en planta alta. Esta selección se justificó porque el día pertenece a una meseta térmica sostenida, con altas temperaturas interiores y comportamiento estable dentro del segundo periodo crítico del mes.

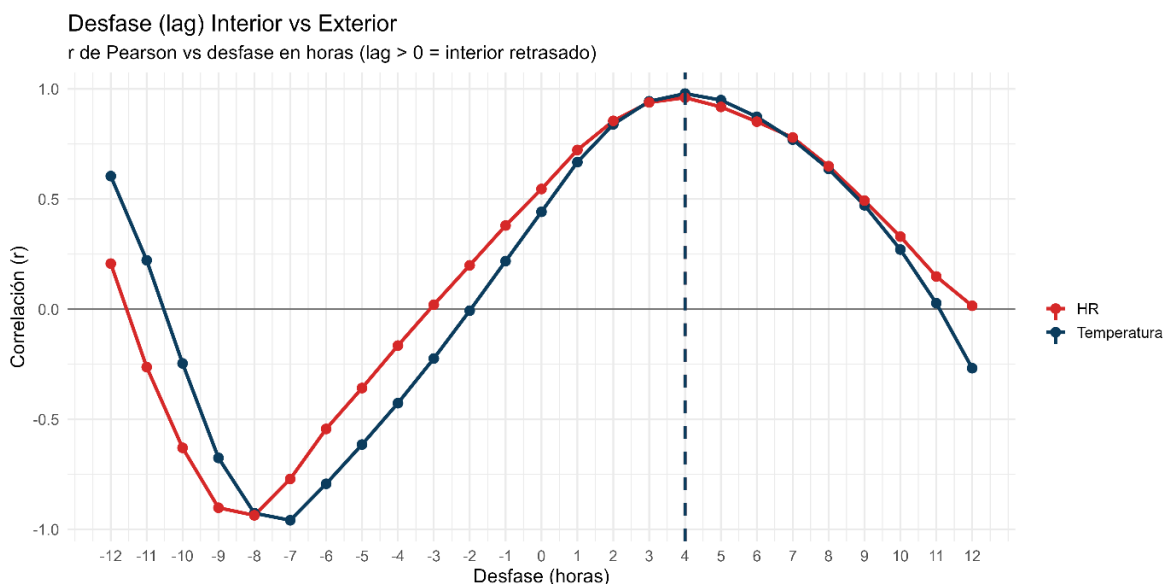


Figura 4. 8. Desfase térmico e higrotérmico Interior–Exterior mediante correlación por retraso horario.

La Figura 4. 8 muestra el análisis de desfase mediante correlación entre las condiciones interiores y exteriores. Para este cálculo se empleó el criterio de correlación de Pearson definido en la ecuación (3.10), desplazando temporalmente las señales para identificar el retraso con mayor correspondencia. La máxima correlación se presentó con un desfase aproximado de 4 horas, lo que indica que el cuarto crítico responde de manera retardada al forzamiento térmico exterior.

La Figura 4. 9 presenta la comparación horaria de temperatura entre el sensor exterior ubicado en jardín y el cuarto crítico del segundo piso. El exterior registró una temperatura mínima aproximada de 27.1 °C y un máximo cercano a 36.2 °C. En contraste, el cuarto crítico presentó una mínima cercana a 31.9 °C y un máximo aproximado de 39.4 °C, manteniéndose por encima del exterior durante gran parte del día. Este comportamiento es coherente con el diferencial Interior–Exterior analizado en el apartado 4.2.4

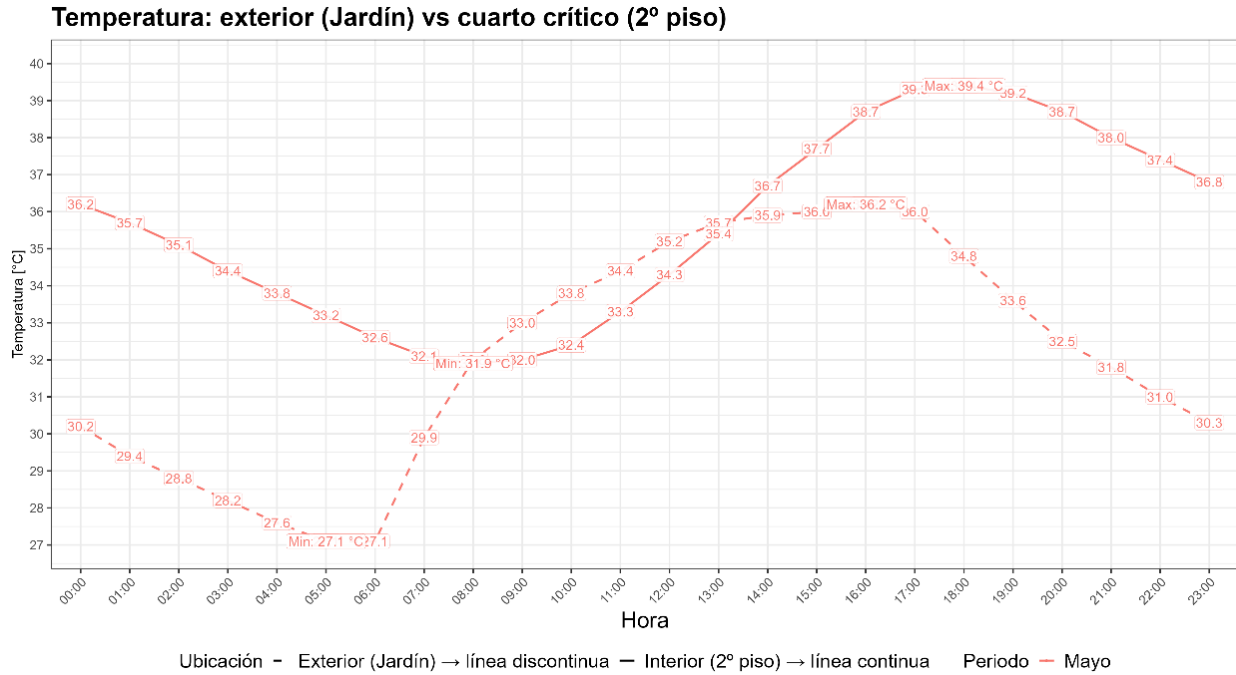


Figura 4. 9. Comparación horaria de temperatura entre exterior y cuarto crítico del segundo piso para el 17 de mayo

La Figura 4. 10 muestra la comparación horaria de humedad relativa entre exterior y cuarto crítico. El exterior presentó valores aproximados entre 27 % y 44 %, mientras que el cuarto crítico se mantuvo entre 26 % y 33 %. Aunque la humedad relativa interior presentó menor amplitud, también mostró una respuesta diferida respecto al exterior, lo que confirma que el comportamiento higrotérmico interior no depende únicamente de las condiciones ambientales instantáneas.

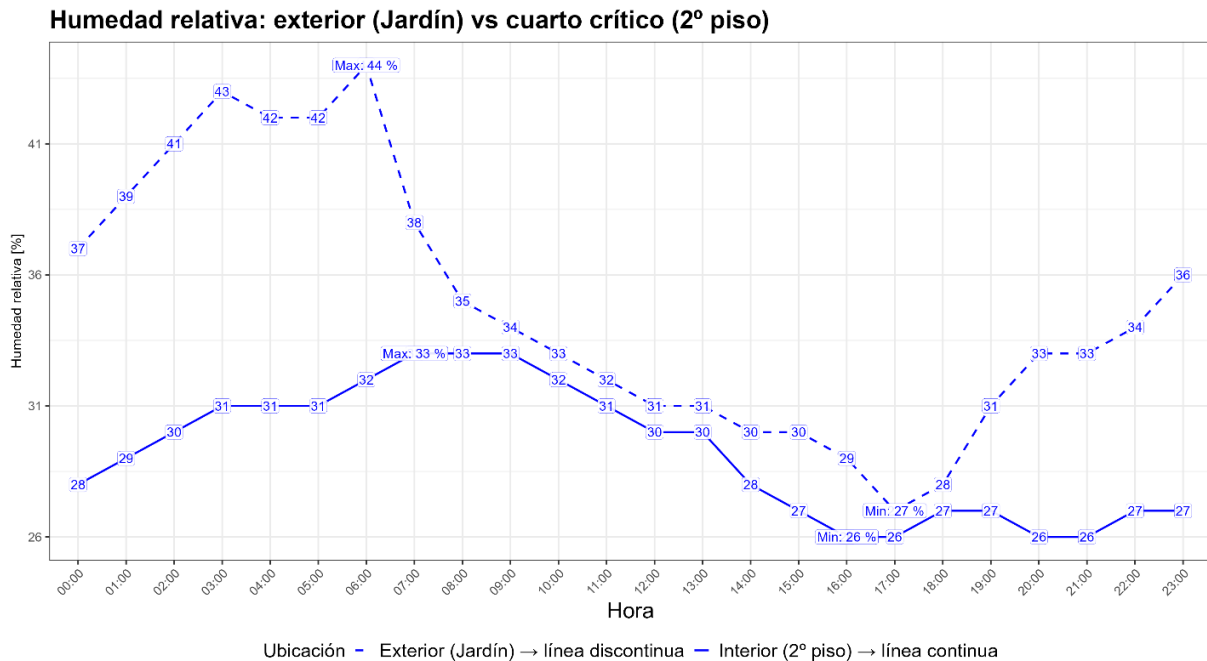


Figura 4. 10. Comparación horaria de humedad relativa entre exterior y cuarto crítico del segundo piso para el 17 de mayo.

Estos resultados se relacionan directamente con la encuesta de percepción térmica. Los habitantes identificaron la tarde como el horario de mayor calor, la planta alta como la zona más afectada y la dificultad para dormir como una de las principales consecuencias del discomfort. El desfase de aproximadamente 4 horas ayuda a explicar esta percepción, ya que el interior alcanza o conserva condiciones críticas cuando el exterior ya comenzó a descender térmicamente.

En conjunto, las Figura 4. 8 a 4.10 que el problema térmico no se limita a las temperaturas exteriores elevadas, sino a la forma en que la vivienda almacena y libera calor de manera diferida. Este retardo prolonga el periodo de discomfort hacia la tarde y noche, reforzando la necesidad de analizar la envolvente, la ventilación natural y las condiciones de frontera que serán utilizadas posteriormente en la modelación CFD.

4.3 Evaluación bioclimática mediante carta de Givoni

A partir de la selección del 17 de mayo como día representativo del segundo periodo crítico, se integraron los datos horarios de temperatura del aire y humedad relativa en la carta bioclimática de Givoni. Esta evaluación permitió analizar si las condiciones ambientales registradas eran compatibles con confort térmico, ventilación natural o estrategias pasivas complementarias.

HORA	TEMPERATURAS °C					HUMEDAD RELATIVA %H							
	JARDIN Exterior	INTERIOR 1ER PISO	INTERIOR 1ER PISO ATRÁS	INTERIOR ESCALERAS	INTERIOR 2DO PISO	INTERIOR 2DO PISO ATRÁS	PISO	H JARDIN Exterior	H INTERIOR 1ER PISO	H INTERIOR 1ER PISO ATRÁS	H INTERIOR ESCALERAS	H INTERIOR 2DO PISO	H INTERIOR 2DO PISO ATRÁS
12:00:00 a.m.	30.20	31.60	32.40	33.50	36.20	35.20		37%	35%	35%	32%	28%	30%
01:00:00 a.m.	29.40	31.10	32.00	33.10	35.70	34.60		39%	36%	36%	33%	29%	32%
02:00:00 a.m.	28.80	30.80	31.70	32.70	35.10	33.90		41%	37%	37%	33%	30%	33%
03:00:00 a.m.	28.20	30.40	31.30	32.30	34.40	33.30		43%	37%	37%	34%	31%	34%
04:00:00 a.m.	27.60	30.10	30.90	31.80	33.80	32.80		42%	37%	38%	34%	31%	34%
05:00:00 a.m.	27.10	29.90	30.60	31.40	33.20	32.20		42%	37%	38%	34%	31%	34%
06:00:00 a.m.	27.10	29.60	30.20	31.00	32.60	31.70		44%	38%	38%	35%	32%	35%
07:00:00 a.m.	29.90	29.60	29.90	30.70	32.10	31.20		38%	37%	39%	36%	33%	36%
08:00:00 a.m.	32.00	30.00	29.90	30.80	31.90	30.80		35%	37%	38%	36%	33%	35%
09:00:00 a.m.	33.00	30.60	30.20	31.40	32.00	31.00		34%	37%	39%	36%	33%	36%
10:00:00 a.m.	33.80	31.20	30.60	32.20	32.40	31.50		35%	37%	39%	35%	32%	36%
11:00:00 a.m.	34.40	31.80	31.20	33.10	33.30	32.40		32%	36%	38%	35%	31%	34%
12:00:00 p.m.	35.20	32.10	31.80	33.80	34.30	33.50		31%	36%	38%	34%	30%	33%
01:00:00 p.m.	35.70	32.50	32.40	34.40	35.40	34.70		34%	37%	39%	34%	30%	33%
02:00:00 p.m.	35.90	32.70	32.80	34.70	36.70	35.90		30%	37%	38%	33%	28%	31%
03:00:00 p.m.	36.00	32.90	33.30	35.10	37.70	37.10		30%	36%	37%	32%	27%	30%
04:00:00 p.m.	36.20	33.00	33.70	35.50	38.70	38.20		29%	36%	37%	32%	26%	29%
05:00:00 p.m.	36.00	33.30	33.90	35.80	39.30	38.90		27%	37%	37%	33%	26%	28%
06:00:00 p.m.	34.80	33.20	34.10	35.80	39.40	39.00		28%	36%	36%	32%	27%	28%
07:00:00 p.m.	33.60	33.10	34.00	35.50	39.20	38.60		31%	34%	35%	32%	27%	28%
08:00:00 p.m.	32.50	32.70	33.70	35.10	38.70	38.00		33%	34%	34%	31%	26%	28%
09:00:00 p.m.	31.80	32.40	33.40	34.70	38.00	37.20		32%	32%	33%	30%	26%	27%
10:00:00 p.m.	31.00	32.10	33.10	34.30	37.40	36.40		34%	33%	33%	30%	27%	28%
11:00:00 p.m.	30.30	32.00	32.80	34.10	36.80	35.80		36%	34%	34%	31%	27%	30%

Figura 4. 11. Registro horario de temperatura y humedad relativa del 17 de mayo para sensor exterior e interiores de la vivienda.

La Figura 4. 11 presenta el monitoreo horario completo del 17 de mayo, considerando el sensor exterior ubicado en jardín y los cinco sensores interiores instalados en la vivienda. Aunque se registraron todos los puntos de monitoreo, para la carta bioclimática se seleccionaron dos condiciones principales: el sensor de jardín, como referencia del aire exterior disponible para ventilación, y el cuarto crítico de planta alta, por representar el espacio interior con mayor temperatura y condición de discomfort.

Esta selección permitió comparar directamente la condición ambiental exterior con la condición interior más desfavorable. El jardín representa el aire que podría ingresar a la vivienda mediante ventilación natural o a través de una torre de viento, mientras que el cuarto crítico permite evaluar si dicho aire tendría potencial para reducir la sensación térmica interior. De esta manera, la carta de Givoni no se empleó únicamente para clasificar confort, sino para valorar la viabilidad bioclimática de la ventilación natural bajo condiciones reales de monitoreo.

Durante el 17 de mayo, el jardín presentó temperaturas aproximadas entre 27.1 y 36.2 °C, con humedad relativa entre 27 y 44 %. En contraste, el cuarto crítico de planta alta alcanzó temperaturas cercanas a 39.4 °C durante la tarde, manteniéndose por encima del exterior durante una parte importante del día. Esta diferencia confirma que la condición interior no depende únicamente del ambiente exterior, sino también de la acumulación térmica en la envolvente y del retardo de respuesta identificado previamente.

Por ello, la integración de estos dos puntos en la carta de Givoni permitió evaluar si el aire exterior disponible se encontraba dentro de zonas aptas para ventilación natural o enfriamiento evaporativo, y si dichas condiciones podían contribuir a desplazar el ambiente interior hacia zonas de menor desconfort. Los resultados de esta comparación se presentan en los siguientes apartados.

4.3.1 Carta bioclimática con datos exteriores monitoreados

La Figura 4.12 presenta la ubicación horaria de las condiciones exteriores registradas en el sensor de jardín dentro de la carta bioclimática de Givoni ajustada a Morelos. Para este análisis se utilizaron los datos de temperatura del aire y humedad relativa del 17 de mayo, día seleccionado como representativo del segundo periodo crítico.

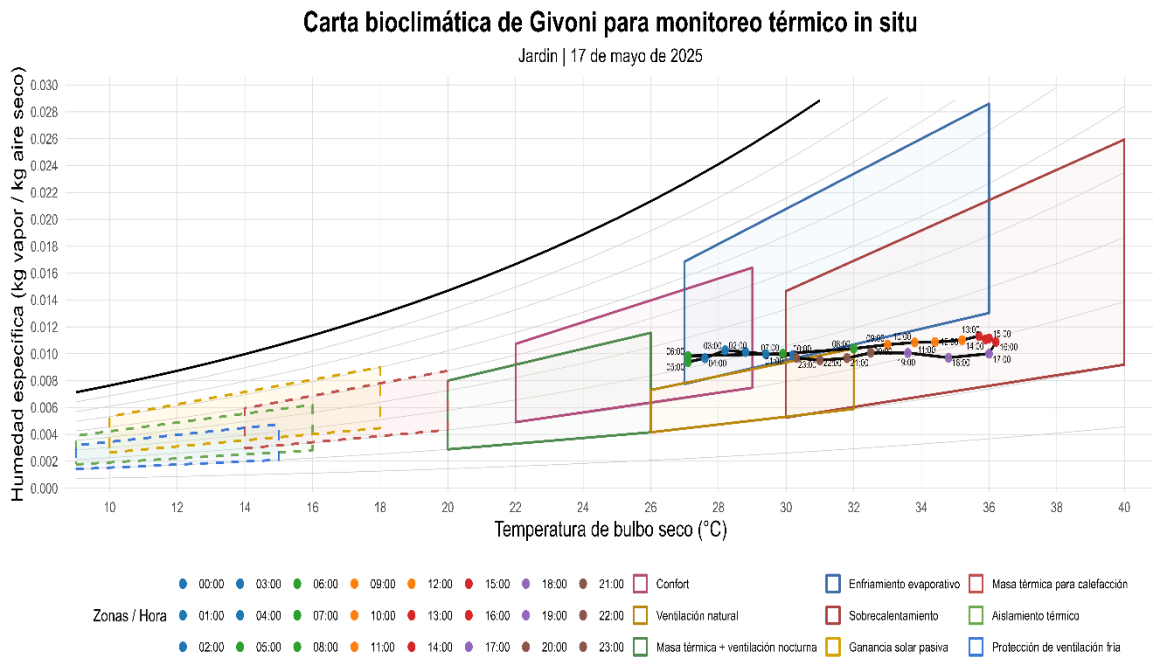


Figura 4. 12. Carta bioclimática de Givoni para el sensor exterior en jardín durante el 17 de mayo.

Los puntos horarios se ubicaron aproximadamente entre 27.1 y 36.2 °C de temperatura de bulbo seco, con una humedad específica cercana a 0.009–0.011 kg de vapor/kg de aire seco. Durante las primeras horas del día, las condiciones exteriores se aproximaron a la zona de confort / ventilación natural; sin embargo, conforme avanzó la tarde, los puntos se desplazaron hacia la región de sobrecalentamiento.

Esta lectura indica que el aire exterior disponible no correspondía a condiciones de confort directo, pero sí permite evaluar su posible aprovechamiento mediante ventilación natural o torre de viento. En este sentido, el jardín representa la condición ambiental de entrada que podría ingresar a la vivienda, por lo que su comparación posterior con el cuarto crítico permitirá valorar si dicho aire tenía potencial real para reducir la sensación térmica interior.

4.3.2 Carta bioclimática con datos interiores monitoreados

Carta bioclimática de Givoni para monitoreo térmico in situ

Cuarto crítico: interior segundo piso | 17 de mayo de 2025

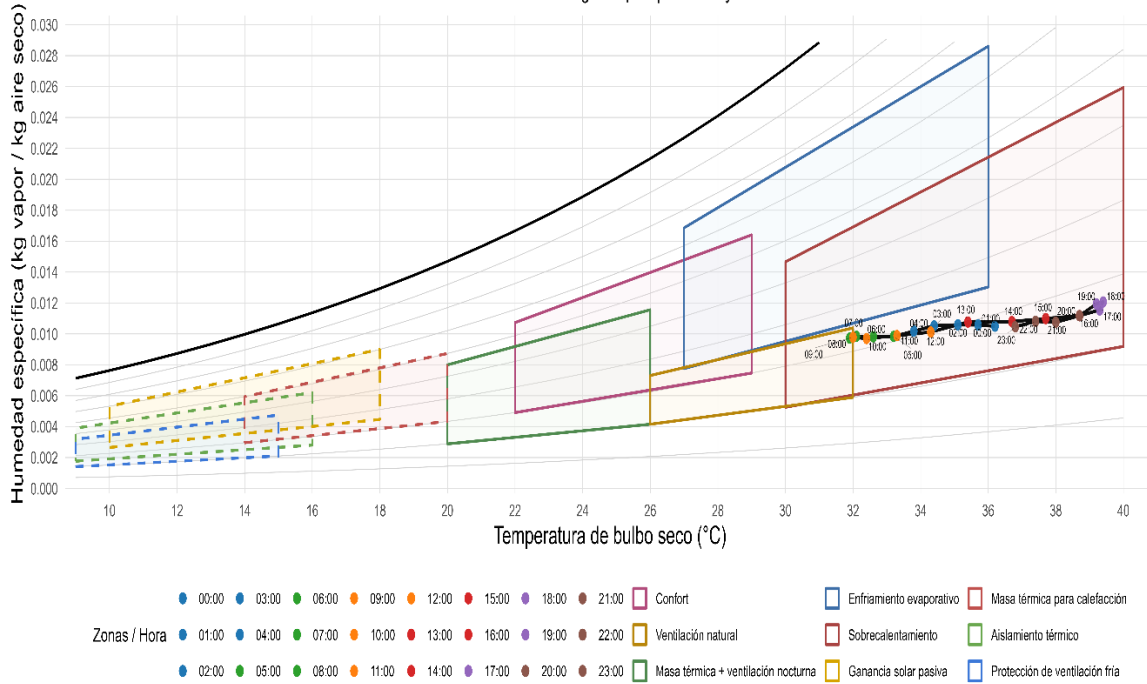


Figura 4. 13. Carta bioclimática de Givoni para el cuarto crítico del segundo piso durante el 17 de mayo.

La Figura 4. 13 presenta la ubicación horaria de las condiciones interiores del cuarto crítico del segundo piso dentro de la carta bioclimática de Givoni. Para este análisis se utilizaron los registros del 17 de mayo, correspondiente al día representativo seleccionado dentro del segundo periodo crítico.

Los puntos horarios se concentraron aproximadamente entre 32 y 39.4 °C de temperatura de bulbo seco, con una humedad específica cercana a 0.009–0.012 kg de vapor/kg de aire seco. Durante la madrugada y primeras horas del día, las condiciones interiores se ubicaron en una zona de transición cercana a ventilación natural; sin embargo, conforme avanzó el día, los puntos se desplazaron hacia la región de sobrecalentamiento.

Esta distribución confirma que el cuarto crítico permaneció fuera de la zona de confort durante todo el día. La mayor concentración de puntos hacia temperaturas superiores a 34 °C indica que el espacio interior mantuvo una condición térmica severa, aun cuando la humedad específica no fue extrema.

Esta lectura refuerza que el disconfort interior no se explica únicamente por el aire exterior, sino por la acumulación térmica y el retardo de respuesta de la vivienda. La comparación directa con la condición exterior y la evaluación del potencial de ventilación natural se desarrollan en los apartados siguientes.

4.3.3 Comparación psicrométrica Interior–Exterior

La comparación psicrométrica Interior–Exterior se realizó a partir de las cartas bioclimáticas presentadas en las Figura 4. 12 y 4.13. El objetivo fue contrastar el aire exterior disponible en jardín

con la condición interior del cuarto crítico, utilizando los registros horarios del 17 de mayo y el modelo de carta de Givoni ajustado a Morelos descrito en el apartado 3.10.2.

En la condición exterior, los puntos se ubicaron aproximadamente entre 27.1 y 36.2 °C de temperatura de bulbo seco, con humedad específica cercana a 0.009–0.011 kg de vapor/kg de aire seco. En contraste, el cuarto crítico se desplazó hacia temperaturas superiores, aproximadamente entre 32 y 39.4 °C, con humedad específica cercana a 0.009–0.012 kg de vapor/kg de aire seco. Esta diferencia muestra que el interior no solo replicó las condiciones exteriores, sino que presentó un desplazamiento térmico hacia la derecha de la carta, asociado al calentamiento acumulado en la vivienda.

La comparación confirma que el aire exterior presentó, en ciertos horarios, una condición menos severa que el ambiente interior. Sin embargo, el cuarto crítico permaneció fuera de la zona de confort durante todo el día, ubicándose principalmente en regiones de ventilación natural y sobrecalentamiento. Este comportamiento es coherente con el retardo térmico identificado en el apartado 4.2.6 y con el diferencial Interior–Exterior analizado en el apartado 4.2.4.

Desde el punto de vista bioclimático, esta diferencia resulta relevante porque permite evaluar si el aire exterior podría utilizarse como recurso de enfriamiento pasivo. La carta de Givoni permite relacionar temperatura y humedad con estrategias pasivas como ventilación natural, masa térmica, ventilación nocturna y enfriamiento evaporativo, por lo que su uso resulta pertinente para interpretar la compatibilidad climática del sitio con soluciones pasivas (Givoni, 1992, 1998; ASHRAE, 2021).

En síntesis, la comparación Interior–Exterior muestra que el exterior ofrecía una condición relativamente más favorable que el cuarto crítico, pero no necesariamente confortable. Por ello, la ventilación natural debía evaluarse no solo por la diferencia de temperatura, sino también por la humedad, la disponibilidad de viento y la capacidad de la envolvente para disipar el calor acumulado.

4.3.4 Correlación higrotérmica del sistema estudiado

Relación entre temperatura y humedad relativa

La pendiente indica la recuperación estimada de humedad relativa por cada 1 °C de reducción térmica

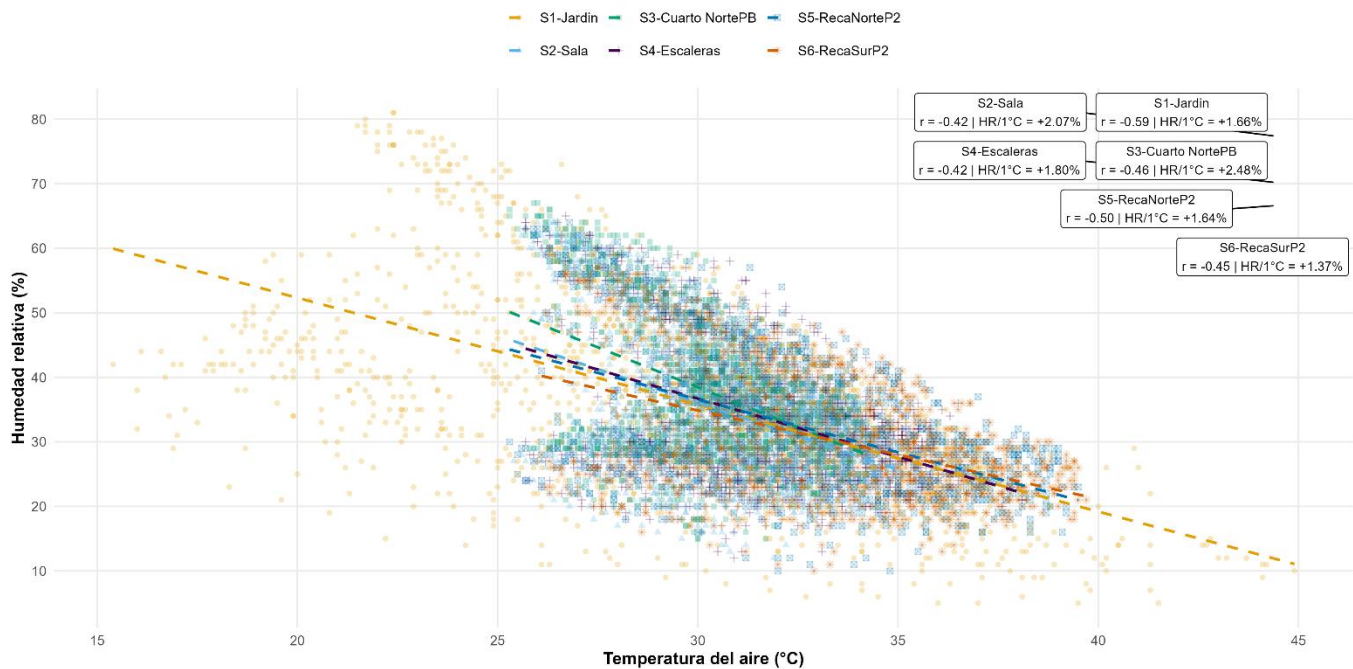


Figura 4. 14. Correlación higrotérmica del sistema exterior e interior.

La Figura 4. 14 presenta la relación entre temperatura del aire y humedad relativa para los sensores monitoreados durante el periodo experimental. Procesamiento realizado con la metodología del punto 3.11. Cada punto corresponde a un registro horario, mientras que las líneas punteadas representan el ajuste lineal calculado individualmente para cada sensor. A diferencia de una comparación puntual, esta gráfica integra el comportamiento higrotérmico de todos los días monitoreados, permitiendo evaluar la tendencia general de recuperación de humedad relativa durante los periodos de disminución térmica.

En todos los sensores se observa una relación inversa entre temperatura y humedad relativa. Esto significa que, conforme la temperatura del aire aumenta, la humedad relativa tiende a disminuir; por el contrario, cuando la temperatura desciende, la humedad relativa se recupera. Esta respuesta es coherente con el comportamiento psicrométrico del aire, ya que la presión de saturación del vapor de agua depende de la temperatura.

<i>Sensor</i>	<i>Recuperación estimada (%HR/°C)</i>
<i>S1-Jardín</i>	+1.66
<i>S2-Sala</i>	+2.07
<i>S3-Cuarto FRIO PB</i>	+2.48
<i>S4-Escaleras</i>	+1.80
<i>S5-Recámara B PA</i>	+1.64
<i>S6-Recámara Critico</i>	+1.37

Tabla 4. 1. Relación entre temperatura del aire y humedad relativa por sensor durante el periodo monitoreado.

Estos valores indican que la recuperación de humedad relativa no ocurre con la misma intensidad en todos los espacios. Las zonas de planta baja muestran una mayor recuperación higrotérmica por grado de enfriamiento, mientras que las recámaras de planta alta presentan una recuperación menor. Este comportamiento puede asociarse a la mayor acumulación térmica en planta alta, la proximidad con la cubierta y la persistencia de calor en la envolvente, factores que reducen la velocidad de recuperación higrotérmica durante los periodos de enfriamiento.

4.4 Termografía infrarroja y respuesta térmica de la envolvente

La evaluación bioclimática mediante la carta de Givoni permitió identificar que el cuarto crítico se mantuvo fuera de la zona de confort y se desplazó hacia regiones asociadas a ventilación natural y sobrecalentamiento. Sin embargo, la carta no explica por sí sola el origen físico de esa condición interior. Por ello, el análisis se complementó con termografía infrarroja cuantitativa, con el objetivo de identificar las superficies de la envolvente que concentraron mayor temperatura y que pudieron actuar como fuentes de carga térmica hacia el interior.

La termografía permitió pasar de una lectura ambiental, basada en temperatura del aire y humedad relativa, a una lectura superficial del sistema constructivo. Mientras los sensores higrotérmicos registraron la respuesta del aire interior, las imágenes infrarrojas permitieron observar la distribución espacial de temperatura en cubierta, muros, pisos y zonas interiores. Este enfoque resulta pertinente porque el sobrecalentamiento interior no depende únicamente del aire exterior, sino también de la energía absorbida, almacenada y liberada por los materiales de la envolvente (Maldague, 2001; Usamentiaga et al., 2014).

En el caso de estudio, la termografía fue necesaria para explicar el desplazamiento térmico observado en la carta de Givoni y el retardo térmico identificado en el apartado 4.2.6. La cubierta y los muros expuestos no funcionaron únicamente como cerramientos, sino como superficies de almacenamiento térmico. Durante el día absorbieron radiación solar y, posteriormente, liberaron parte de esa energía hacia el interior, prolongando el discomfort durante la tarde y la noche.

4.4.1 Superficies críticas de la envolvente

A partir del análisis termográfico se identificaron como superficies críticas aquellos elementos constructivos con mayor exposición solar, mayor temperatura superficial y mayor capacidad de transferir calor hacia el interior. En la vivienda estudiada, las superficies dominantes fueron la cubierta plana y los muros expuestos, especialmente aquellos con orientación asociada a mayor incidencia solar durante el día.

La cubierta representa el principal elemento crítico debido a su exposición directa a la radiación solar y a su área aproximada de 40 m². Esta superficie recibe carga solar durante gran parte del día y, al estar construida con materiales convencionales sin aislamiento térmico, tiende a almacenar energía dentro de la masa constructiva. Este comportamiento explica por qué la planta alta y el cuarto crítico presentaron mayores temperaturas que la planta baja.

De manera complementaria, los muros expuestos también contribuyeron al calentamiento interior. La fachada con incidencia solar temprana inició el proceso de carga térmica desde las primeras horas del día, mientras que las superficies interiores mantuvieron temperaturas elevadas durante la tarde. Esta combinación favoreció un comportamiento de envolvente tipo reservorio térmico, donde el calor no se disipa de forma inmediata, sino que se libera progresivamente hacia el espacio habitable.

La identificación de estas superficies críticas permite explicar por qué la ventilación natural no puede evaluarse de forma aislada. Aunque el aire exterior pueda presentar condiciones parcialmente favorables en ciertos horarios, la carga térmica almacenada en cubierta y muros mantiene al interior en una condición de sobrecalentamiento.

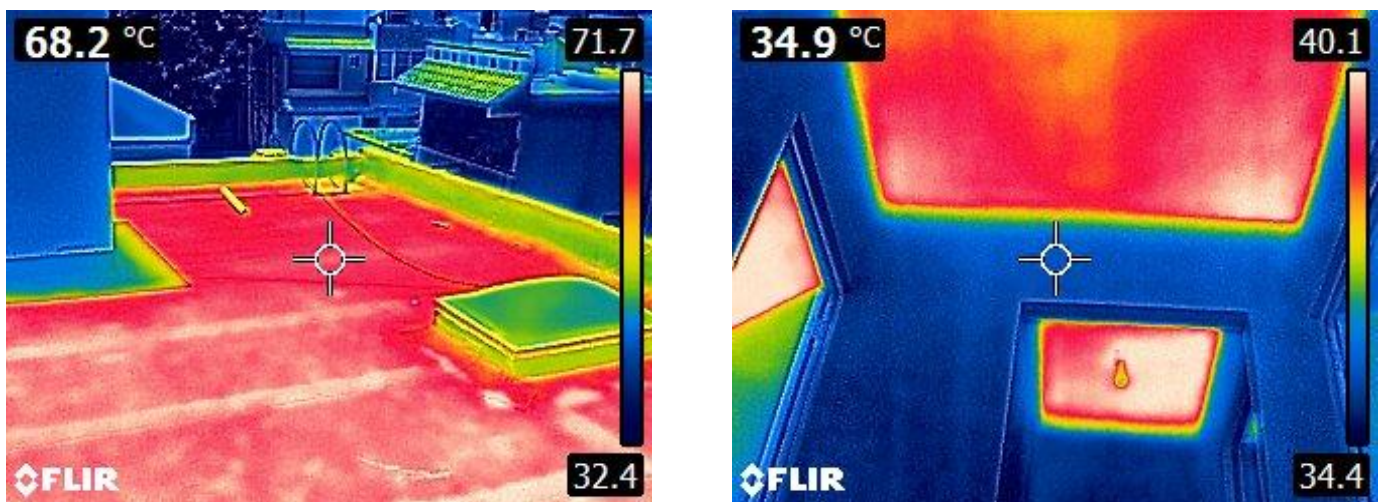


Figura 4. 15. Levantamiento termográfico- Superficie crítica EXTERNA e INTERNA.

4.4.2 Resultados de Temperatura superficial promedio por polígonos digitales, 17 de mayo 7 pm

Con base en el procedimiento metodológico descrito en el apartado 3.5.4, el procesamiento termográfico en Python permitió seleccionar resultados por horarios específicos o analizar la evolución temporal de cada superficie durante el periodo monitoreado. En este apartado se presentan los resultados correspondientes al 17 de mayo a las 19:00 h, debido a que este horario representa una condición relevante para la ventilación natural: el aire exterior comienza a disminuir térmicamente, mientras el cuarto crítico de planta alta mantiene temperaturas elevadas por efecto del almacenamiento térmico de la envolvente.

Como se observa en la Figura 4. 9, a las 19:00 h el exterior registró aproximadamente 33.6 °C, mientras que el cuarto crítico alcanzó 39.2 °C. Esta diferencia indica un gradiente térmico favorable para el ingreso de aire exterior más frío. Sin embargo, las superficies interiores aún conservaban temperaturas elevadas, por lo que el análisis de muros, techos y pisos permitió identificar qué elementos continuaban aportando calor al recinto. Por esta razón, el horario de 19:00 h resulta adecuado para vincular la termografía con la evaluación posterior de ventilación natural y torre de viento.

La Tabla 4. 2 representa una síntesis de las temperaturas superficiales más relevantes obtenidas mediante el procesamiento por máscaras y polígonos digitales. No obstante, el procedimiento completo permitió estimar temperaturas promedio para más de 40 superficies térmicas de la envolvente, incluyendo muros interiores, muros exteriores, cubierta, techos, pisos y zonas de transición. Por ello, los valores mostrados en la tabla deben interpretarse como un resumen representativo del punto crítico de las 19:00 h, no como la totalidad de la base de datos termográfica generada.

Cada superficie procesada fue identificada mediante una clave específica, con el objetivo de conservar correspondencia entre el levantamiento termográfico, la geometría física de la vivienda y la posterior modelación CFD. Esta codificación permitió que las superficies térmicas pudieran utilizarse como referencia para la definición de zonas nombradas o Named Selections dentro del modelo numérico. De esta manera, la información termográfica no solo describió el comportamiento térmico de la envolvente, sino que también funcionó como puente metodológico para asignar condiciones de frontera térmica en las paredes, techos y superficies internas del dominio CFD.

Aire exterior

33.60 °C

HR 31 %

Cuarto crítico PA

39.20 °C

HR 27 %

Escaleras

35.50 °C

HR 32 %

Cuarto PA Norte

38.60 °C

HR 28 %

Planta baja

Superficie	Ts	ΔExt
PISO PB	32.40	-1.20
MPBCO Int	32.40	-1.20
MPBS Int	34.20	+0.60
Techo PB	32.20	-1.40
M.IntPB-Norte	32.40	-1.20
MPBE Int	34.70	+1.10
MCUBO	32.60	-1.00
M2.IntPB-Norte	34.40	+0.80
MCocina-Norint	34.40	+0.80
M2.IntPB-ESTE	35.00	+1.40

Escaleras / unión

Superficie	Ts	ΔExt
Interior Colin-Unión	37.40	+3.80
AZOTEA Unión INT	41.80	+8.20
Piso Escalera 2	34.50	+0.90
Piso Escalera 1	32.90	-0.70
MPAEsca Int.	37.40	+3.80
AZOTEA Escaleras INT	43.90	+10.30

Planta alta / cuarto crítico		
Superficie	Ts	ΔExt
MPAS Int.	38.10	+4.50
PISO PA	36.10	+2.50
MPAE Int.	39.00	+5.40
MPAN Int.	37.40	+3.80
AZOTEA HP INT	46.00	+12.40
MPACO Int.	35.50	+1.90
PISO PA zona norte	34.80	+1.20
M2.IntPA-ESTE	38.80	+5.20
M2.IntPA-Norte	39.40	+5.80
M2.Int-2PA-Norte	36.60	+3.00
AZOTEA PA NORTE	45.90	+12.30
M2.IntPA-BAÑONORTE	39.40	+5.80
M2.IntPA-BAÑOCOLIN	37.20	+3.60

Exterior		
Superficie	Ts	ΔExt
AZOTEA	36.30	+2.70
MPAS Ext	33.90	+0.30
MPBS Ext	33.00	-0.60
MPAE Ext	34.60	+1.00
MPBE Ext	34.40	+0.80
M2.ExtB-Norte	37.40	+3.80
MCocina-NorExt	35.90	+2.30
MPAN EXT	36.20	+2.60
M2.Ext-2PA-Norte	36.70	+3.10

Tabla 4. 2. Síntesis de superficies termográficas segmentadas y temperaturas superficiales promedio a las 19:00 h.

4.4.3 Evolución térmica superficial en días críticos

La evolución térmica superficial se analizó a partir de las imágenes termográficas obtenidas durante los días críticos de mayo, considerando un intervalo de monitoreo comprendido entre las primeras horas de la mañana y el periodo nocturno. Este seguimiento permitió identificar no solo los valores máximos de temperatura superficial alcanzados por los elementos de la envolvente, sino también la variación térmica que presentaron las superficies a lo largo del ciclo diario.

El análisis termográfico permitió observar el proceso de absorción, almacenamiento y liberación de calor en muros, cubierta y demás superficies expuestas. Durante las horas de mayor radiación solar, la envolvente incrementó progresivamente su temperatura superficial, evidenciando la acumulación de energía térmica en los materiales constructivos. Posteriormente, durante la tarde y la noche, se registró una disminución gradual de la temperatura, asociada con la liberación del calor almacenado hacia el ambiente interior y exterior.

Este comportamiento resulta relevante para comprender la memoria térmica del recinto, ya que las superficies no responden de manera instantánea a las condiciones ambientales, sino que conservan parte de la energía absorbida durante el día. Por ello, el análisis de la evolución térmica superficial permitió establecer una relación directa entre el comportamiento de la envolvente, la acumulación de calor en el espacio interior y las condiciones térmicas que posteriormente fueron consideradas en la caracterización del caso base y en la modelación CFD.

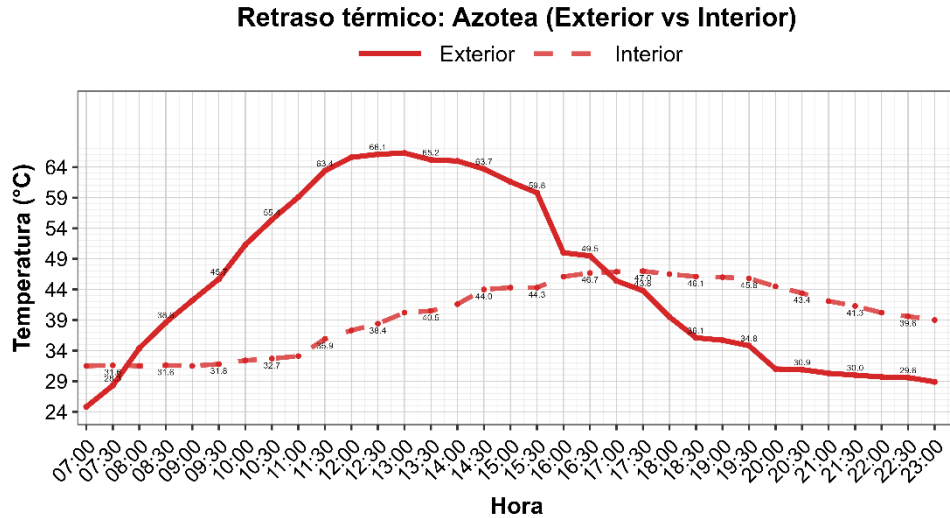


Figura 4. 16. Comparativa de temperaturas de superficie *TECHO EXTERIOR – INTERNO* - Monitoreo 17 de mayo.

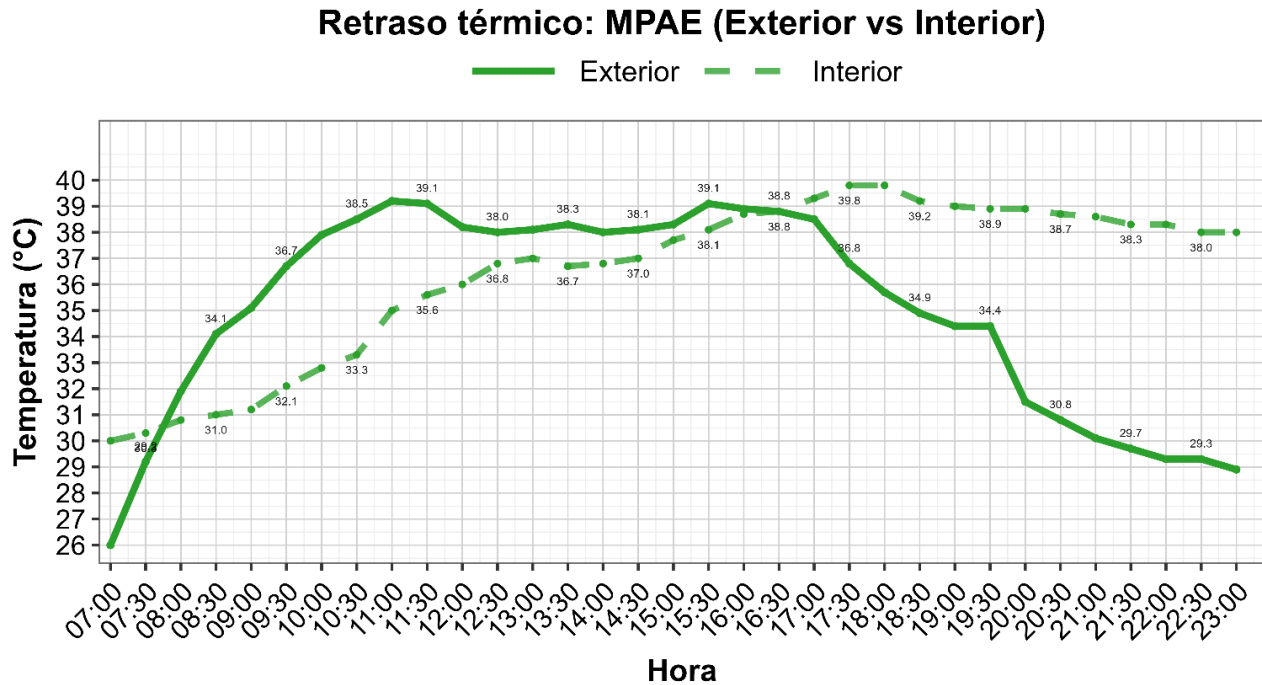


Figura 4. 17. Comparativa de temperaturas de superficie *MURO ESTE -EXTERIOR – INTERNO* - Monitoreo 17 de mayo.

Las Figura 4. 16 y 4.17 presentan la evolución de las temperaturas superficiales promedio en elementos exteriores e interiores, respectivamente. En las superficies exteriores, la cubierta mostró los incrementos más altos durante las horas de mayor radiación solar, mientras que los muros expuestos presentaron una respuesta térmica asociada a su orientación y periodo de incidencia solar.

Este comportamiento es consistente con el análisis térmico de edificaciones expuestas a radiación directa, donde la temperatura superficial puede superar ampliamente la temperatura del aire ambiente (ASHRAE, 2021; Incropera et al., 2011).

En las superficies interiores se observó una respuesta térmica retardada respecto al comportamiento exterior. Aunque las temperaturas superficiales externas comenzaron a disminuir hacia la tarde, las superficies internas mantuvieron valores elevados durante más tiempo. Este comportamiento es coherente con el retardo térmico identificado en el apartado 4.2.6, donde el análisis de correlación de Pearson, conforme a la ecuación (3.10), mostró un desfase aproximado de 4 horas entre el forzamiento exterior y la respuesta interior. Por lo tanto, la termografía confirma espacialmente el mismo fenómeno detectado en las series higrótérmicas: la energía absorbida por la cubierta y los muros no se disipa de forma inmediata, sino que se almacena en la envolvente y se libera progresivamente hacia el recinto. Esta lectura respalda la interpretación de la vivienda como un sistema con inercia térmica significativa, donde la envolvente actúa como reservorio de calor y prolonga el discomfort durante la tarde y la noche (Maldague, 2001; Usamentiaga et al., 2014; ASHRAE, 2021; CIBSE, 2015).

4.5 Caracterización del viento y disponibilidad de ventilación natural

Los resultados presentados en las secciones anteriores evidenciaron que la vivienda experimenta un importante almacenamiento de energía térmica en su envolvente, generando un desfase entre las condiciones exteriores e interiores y favoreciendo la persistencia de altas temperaturas durante gran parte del día. Asimismo, el análisis psicrométrico y termográfico indicó que la ventilación natural podría constituir una estrategia potencial para favorecer la disipación del calor acumulado, particularmente durante los periodos en que el aire exterior presenta condiciones más favorables que el ambiente interior.

Con el propósito de evaluar esta posibilidad, se desarrolló una campaña de monitoreo de viento mediante vehículos aéreos no tripulados (UAV) durante mayo de 2025. La selección de los horarios de medición se realizó a partir del comportamiento térmico previamente identificado en la vivienda. Se efectuaron vuelos a las 07:00 h, 14:00 h y 19:00 h, representando respectivamente una condición cercana al mínimo térmico diario, un periodo asociado a la máxima carga térmica y el inicio del enfriamiento vespertino, cuando la temperatura exterior comienza a disminuir y se genera un gradiente térmico potencialmente favorable para la ventilación natural.

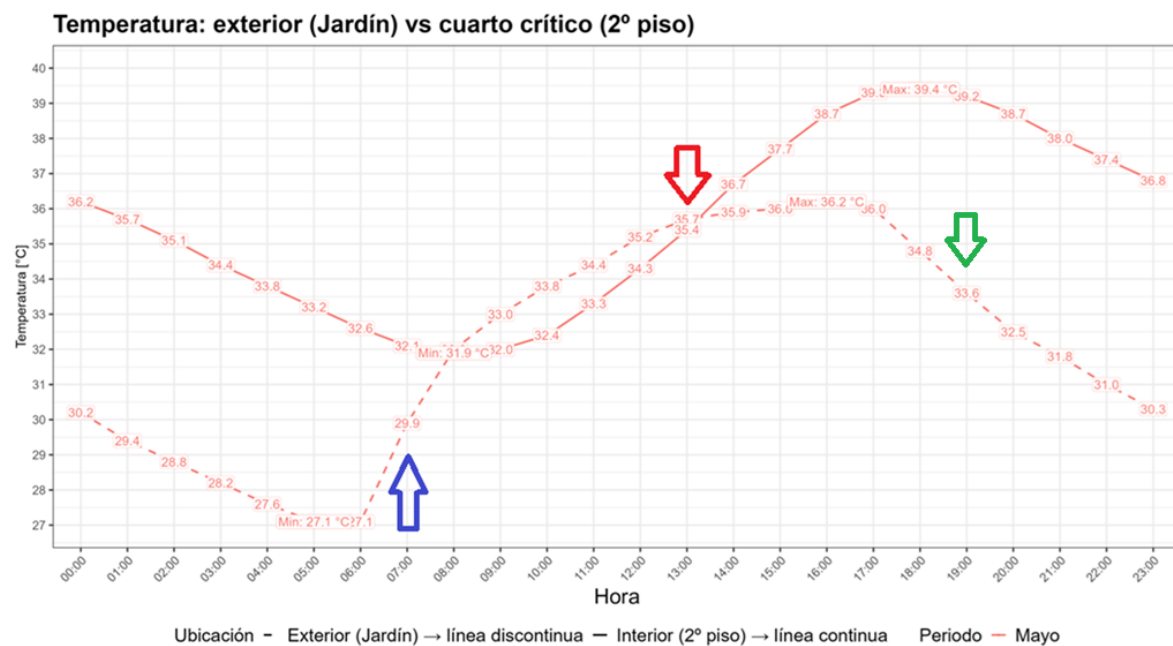


Figura 4. 18. Horario de vuelo, durante monitoreo de mayo.

En total, la campaña experimental integró aproximadamente 105 vuelos distribuidos en los tres horarios de estudio, conformando una base de datos representativa para analizar la evolución temporal y vertical del viento sobre la vivienda. Esta cantidad de mediciones permitió reducir la influencia de eventos atmosféricos puntuales y obtener una caracterización más robusta de las condiciones reales del sitio.

Más allá de una caracterización meteorológica convencional, el objetivo de este monitoreo fue analizar la disponibilidad real del viento en el entorno de la vivienda y comprender la estructura vertical del flujo atmosférico dentro de la capa límite urbana. Particularmente, se buscó identificar si los perfiles observados presentaban comportamientos compatibles con la Teoría de Similitud de Monin–Obukhov (MOST), así como evaluar la influencia de la rugosidad urbana, los obstáculos circundantes y los procesos de canalización sobre la disponibilidad de viento útil para estrategias de enfriamiento pasivo.

Los apartados siguientes presentan la evolución horaria de la velocidad y dirección del viento, los perfiles verticales obtenidos mediante UAV, la variabilidad direccional observada y las implicaciones de estos resultados para el potencial de ventilación natural y el desempeño de una torre de viento bajo condiciones reales de operación.

4.5.1 Velocidad y dirección del viento por horario

Con el objetivo de identificar la disponibilidad de ventilación natural a lo largo del ciclo diario, se analizaron de forma independiente las mediciones realizadas durante los tres horarios representativos definidos previamente: 07:00 h, 14:00 h y 19:00 h. La Figuras 4.19 a 4.21 presenta las rosas de viento globales obtenidas para cada condición del mes, integrando la totalidad de los vuelos realizados durante la campaña experimental.

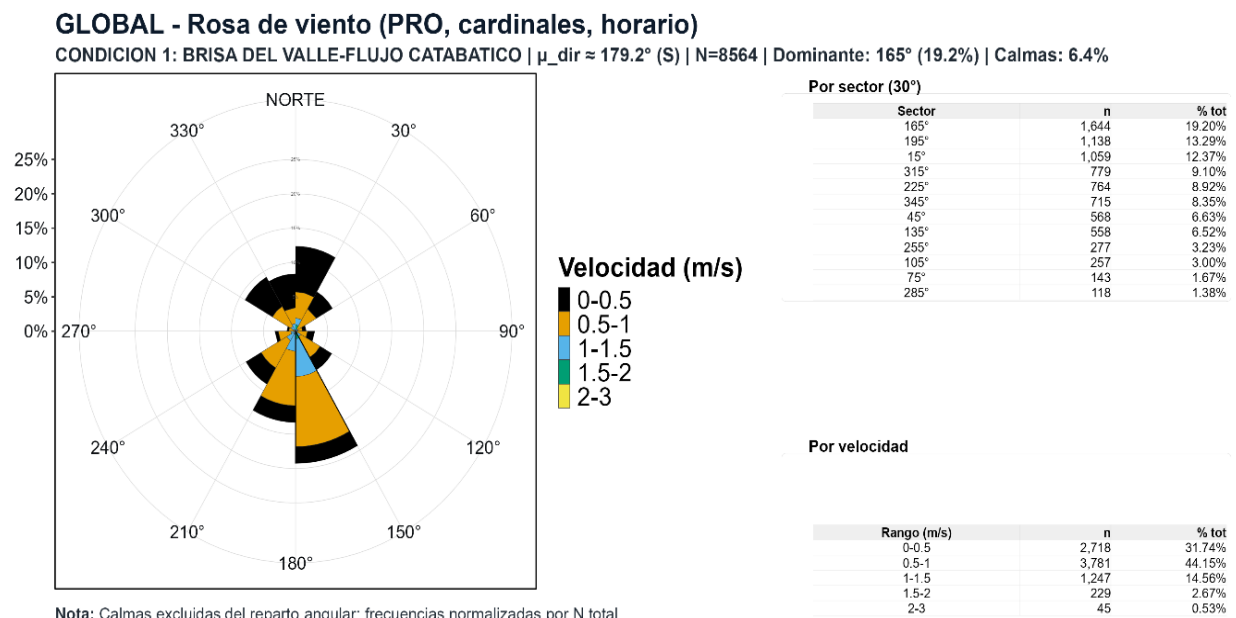


Figura 4. 19. Rosa de viento global para la condición matutina (07:00 h): estabilización atmosférica y brisa de valle..

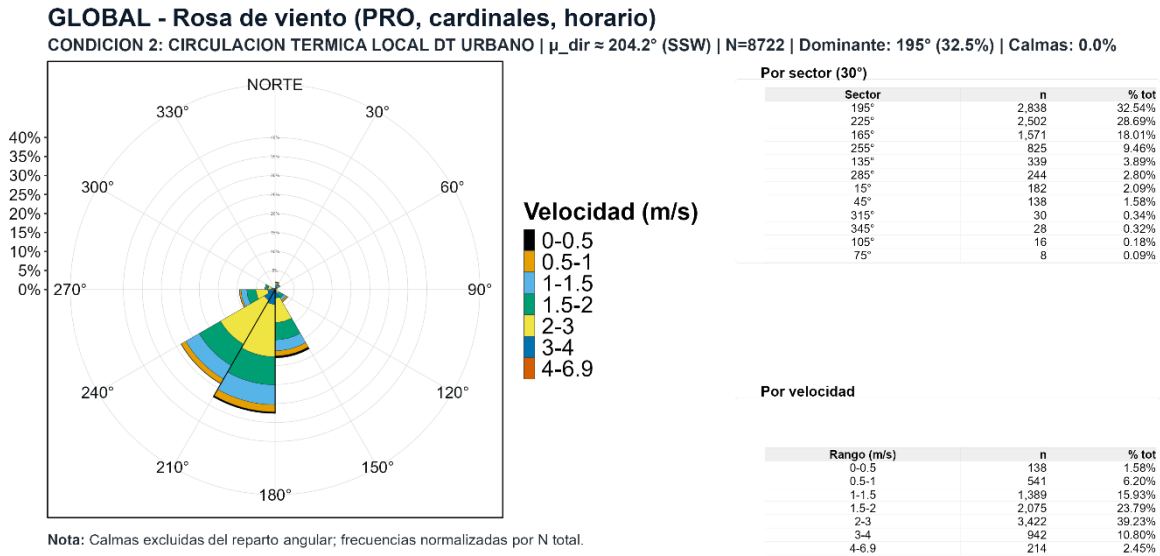


Figura 4. 20. Rosa de viento global para la condición diurna (14:00 h): máxima carga térmica exterior y circulación térmica urbana.

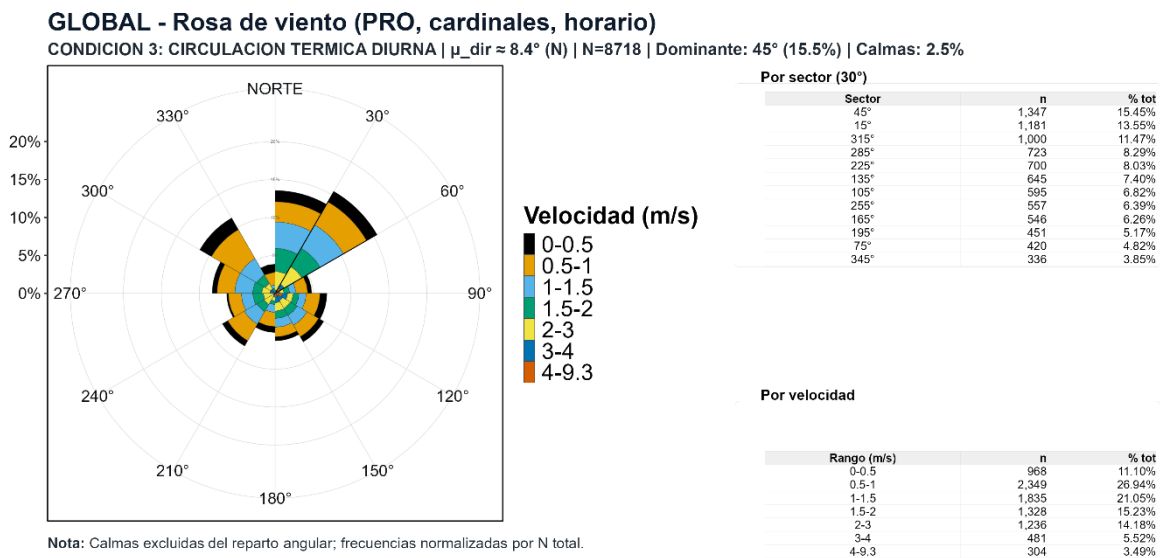


Figura 4. 21. Rosa de viento global para la condición vespertina-nocturna (19:00 h): transición atmosférica y mayor variabilidad direccional.

Los resultados muestran que cada periodo presenta características atmosféricas claramente diferenciadas. Durante la condición matutina (07:00 h), asociada al mínimo térmico diario, el viento mostró una distribución direccional relativamente organizada, predominando flujos provenientes del sector sur-sureste, con velocidades generalmente inferiores a 1.5 m/s. Este comportamiento es consistente con procesos de estabilización atmosférica cercanos a la superficie y con la presencia de brisas locales de baja intensidad.

Para la condición de máxima carga térmica (14:00 h), se observó el patrón direccional más repetitivo y concentrado de toda la campaña. La mayor parte de los registros se agruparon entre los sectores sur y suroeste, con una dirección predominante cercana a 195° , representando más del 30 % de las observaciones. Asimismo, este periodo presentó las mayores velocidades registradas, alcanzando

rangos superiores a 4 m/s en algunos eventos. Este comportamiento sugiere una circulación térmica local más estable y energizada por el calentamiento diurno de la superficie urbana.

Por el contrario, la condición vespertina–nocturna (19:00 h) mostró una distribución direccional considerablemente más dispersa. Aunque se identificó una dirección dominante cercana a 45°, la rosa de viento evidencia una mayor participación de múltiples sectores direccionales y una amplitud angular significativamente superior respecto a los otros horarios. Esta característica indica una mayor variabilidad direccional del flujo atmosférico durante la transición hacia condiciones nocturnas, reflejando la influencia simultánea de la rugosidad urbana, los obstáculos locales y la disminución progresiva de la actividad convectiva superficial.

Desde el punto de vista térmico, este último periodo resulta particularmente relevante para la presente investigación. Como se mostró previamente en el análisis interior–exterior (4.9), alrededor de las 19:00 h comienza a establecerse un gradiente térmico favorable para la ventilación natural, ya que la temperatura exterior inicia un descenso progresivo mientras el interior de la vivienda mantiene temperaturas elevadas debido al almacenamiento de energía en la envolvente. Por esta razón, los apartados siguientes se centran en el análisis detallado de la condición nocturna, evaluando su comportamiento mediante histogramas de velocidad y dirección, perfiles verticales de viento y variabilidad direccional.

4.5.2 Perfil vertical del viento hasta 120 m

De acuerdo con los fundamentos de la capa límite atmosférica desarrollados en el Capítulo 2, la velocidad del viento tiende a incrementarse con la altura debido a la reducción progresiva de la fricción superficial, mientras que la dirección puede modificarse por efecto de estabilidad atmosférica, rugosidad urbana y obstáculos locales (Oke, 1987; Stull, 1988; Garratt, 1992). Con base en este criterio, se realizaron mediciones mediante UAV entre 1 y 120 m de altura, con el propósito de identificar si el flujo sobre la vivienda presentaba un comportamiento vertical compatible con un perfil atmosférico desarrollado.

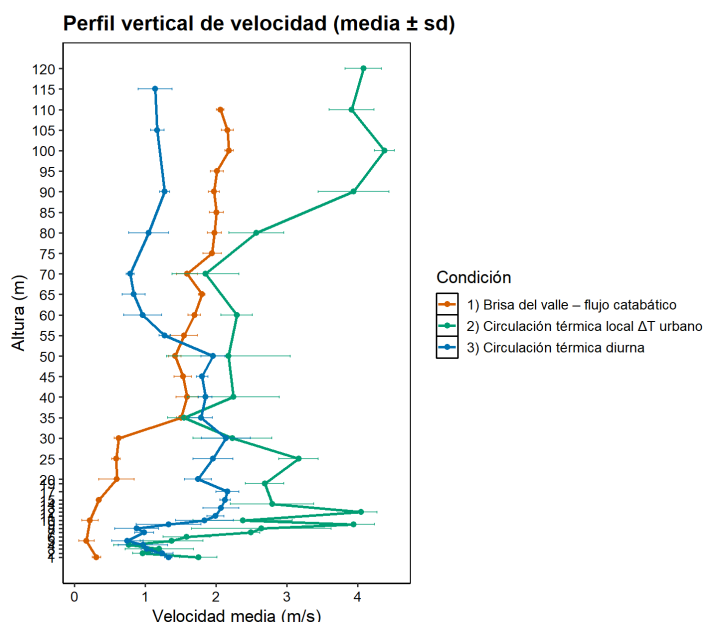


Figura 4. 22. Perfil vertical promedio de velocidad del viento entre 1 y 120 m de altura.

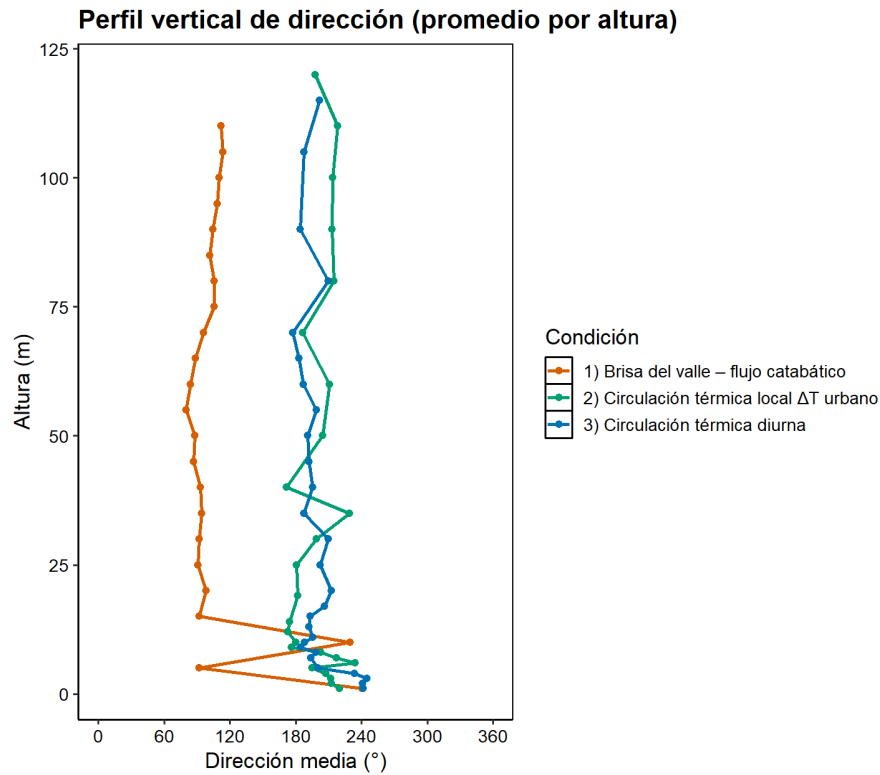


Figura 4. 23. Perfil vertical promedio de dirección del viento entre 1 y 120 m para las condiciones atmosféricas monitoreadas.

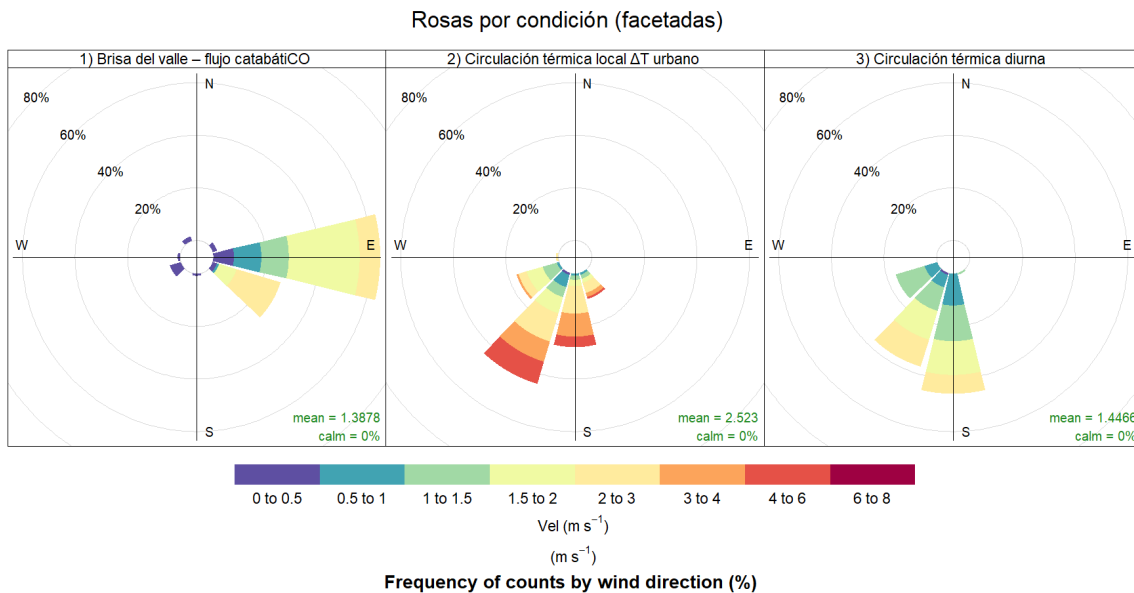


Figura 4. 24. Variabilidad direccional del viento para las tres condiciones atmosféricas evaluadas.

Las Figura 4. 22Figura 4. 23 a la 4.24 muestran los perfiles verticales promedio de velocidad y dirección obtenidos para las tres condiciones atmosféricas evaluadas. Las velocidades registradas oscilaron aproximadamente entre 0.2 y 4.5 m/s, con diferencias claras entre horarios y alturas. La

condición matutina, asociada a brisa de valle o flujo catabático, presentó la tendencia más cercana a un perfil desarrollado, ya que mostró una evolución más ordenada de velocidad y dirección conforme aumentó la altura. Este comportamiento es coherente con los perfiles verticales descritos para la capa superficial atmosférica bajo condiciones de mayor estabilidad (Stull, 1988; Arya, 2001).

Sin embargo, dicha tendencia comenzó a ser evidente únicamente por encima de aproximadamente 35 m. Por debajo de esta altura persistieron fluctuaciones importantes de velocidad y dirección, lo cual coincide con lo discutido en los apartados 2.3 y 2.4 sobre la subcapa rugosa urbana, donde edificaciones, vegetación, calles y obstáculos modifican el flujo mediante fricción, canalización, recirculaciones y efectos de estela (Oke, 1987; Grimmond & Oke, 1999; Barlow, 2014).

Este resultado tiene una implicación directa para la evaluación de torres de viento en vivienda social. Una torre residencial difícilmente alcanzaría alturas superiores a 35 m; por lo tanto, su captación ocurriría dentro de una región perturbada de la capa límite urbana, no dentro de un flujo plenamente desarrollado. En consecuencia, el potencial de ventilación natural debe evaluarse considerando velocidades bajas, alta variabilidad direccional y fuerte influencia del entorno construido, condiciones que posteriormente deberán incorporarse en la interpretación CFD del sistema.

4.5.3 Monitoreo simultáneo a diferentes alturas

Como se discutió en los apartados anteriores, el análisis térmico, higratérmico y termográfico evidenció la existencia de un importante almacenamiento de energía en la envolvente de la vivienda, así como la necesidad de aprovechar los periodos nocturnos para favorecer la disipación del calor acumulado. Asimismo, en la sección 4.5.1 se identificó que el periodo nocturno presentó las condiciones más favorables para el aprovechamiento de la ventilación natural, razón por la cual los análisis posteriores se concentraron en este horario.

Con el objetivo de caracterizar el flujo disponible para la vivienda, se analizaron mediciones simultáneas realizadas a 1.2 m, 4.5 m y 11.0 m de altura, representativas de las condiciones de viento sobre ventanas de planta baja, ventanas de planta alta y una posible entrada de torre de viento, respectivamente. Las Figuras 4.25 – 4.28 presentan las rosas de viento, la evolución temporal de la dirección, los histogramas de velocidad y las series temporales de velocidad obtenidas durante el periodo nocturno.

La Figura 4.26 muestra que el comportamiento direccional del viento cambia significativamente con la altura. A 11.0 m predominó el sector 135° (SE) con aproximadamente 45.3 % de frecuencia, mientras que a 4.5 m la dirección dominante cambió hacia 255° (WSW) con 42.5 % de ocurrencia. Por su parte, a 1.2 m predominó el sector 105° (ESE) con aproximadamente 53.1 % de los registros. Estas diferencias evidencian que el flujo atmosférico experimenta modificaciones importantes dentro de los primeros metros sobre la superficie, confirmando la influencia de la rugosidad urbana descrita previamente en el Capítulo 2.

Los histogramas mostrados en la Figura 4.27 indican que la velocidad media del viento aumentó con la altura, pasando de aproximadamente 1.05 m/s a 1.2 m, 1.12 m/s a 4.5 m y 1.90 m/s a 11.0 m. Además, mientras que a nivel de planta baja la mayoría de los registros se concentraron entre 0.8 y 1.3 m/s, en la altura correspondiente a la posible captación de una torre de viento se observaron eventos superiores a 4.0 m/s, lo que confirma la disminución progresiva de los efectos de fricción superficial conforme aumenta la altura.

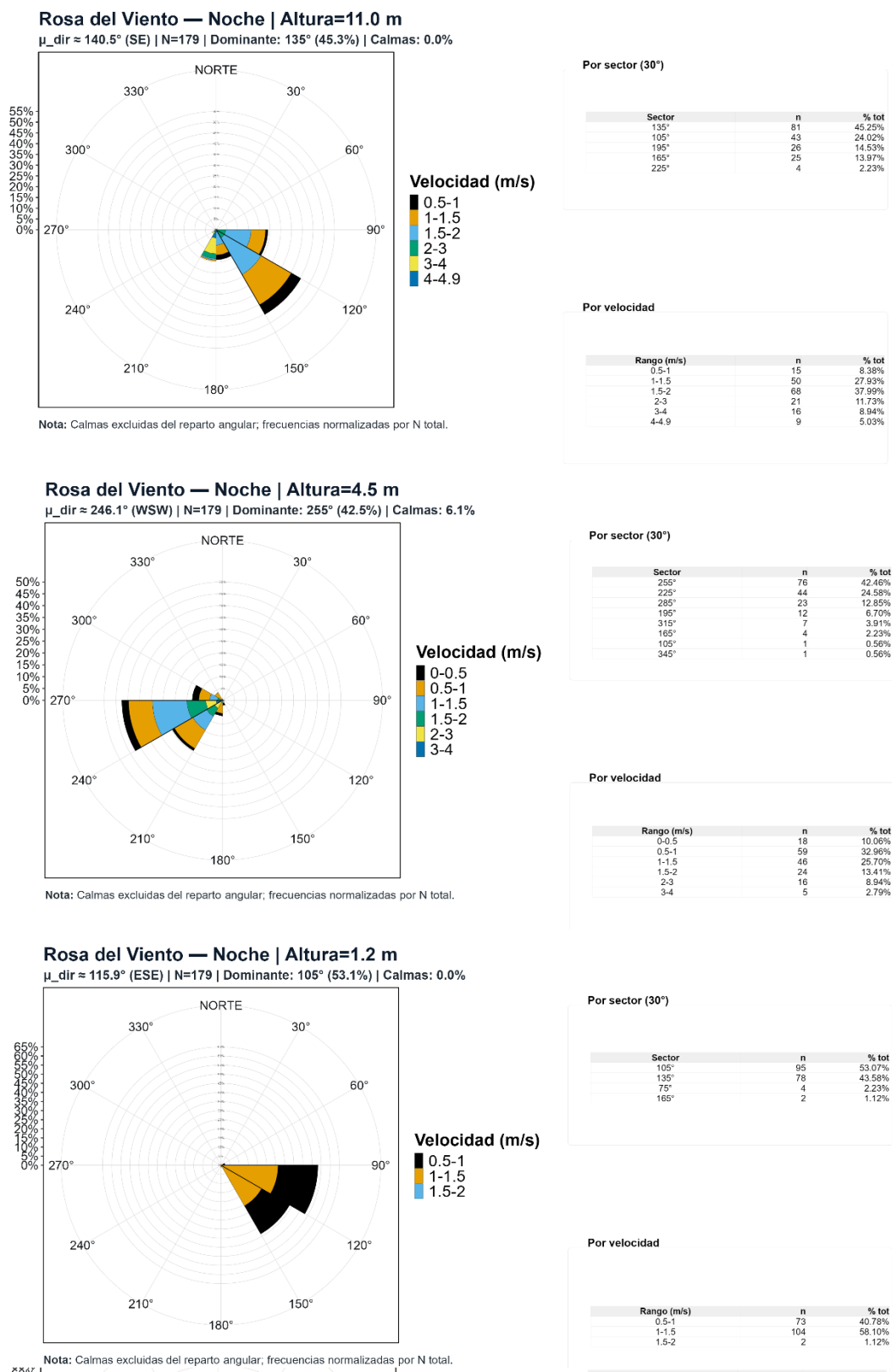


Figura 4. 25. Rosas de viento nocturnas obtenidas simultáneamente a 1.2 m, 4.5 m y 11.0 m de altura.

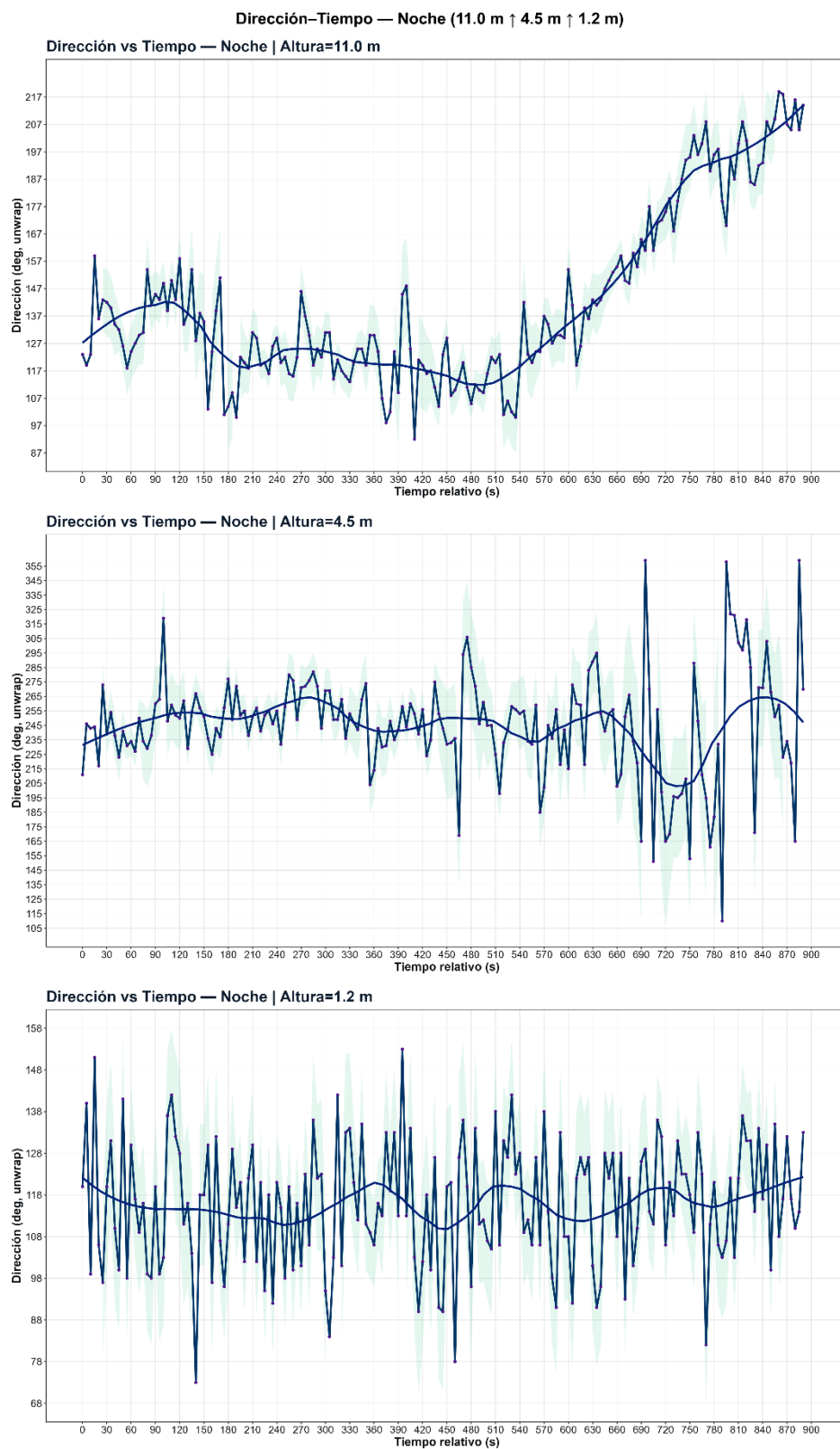


Figura 4. 26. Evolución temporal de la dirección del viento durante el periodo nocturno.

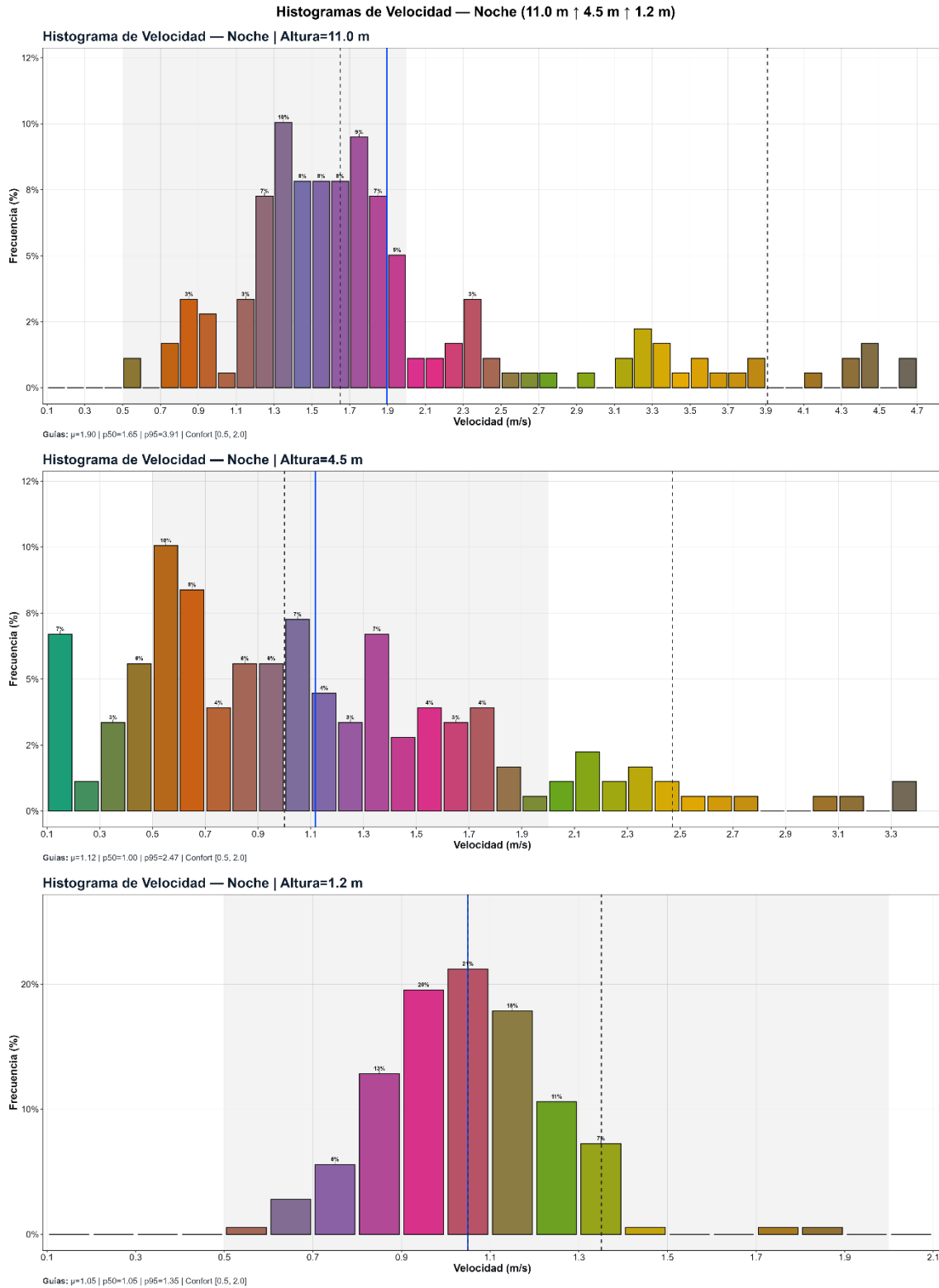


Figura 4. 27. Histogramas de velocidad del viento para las tres alturas monitoreadas.

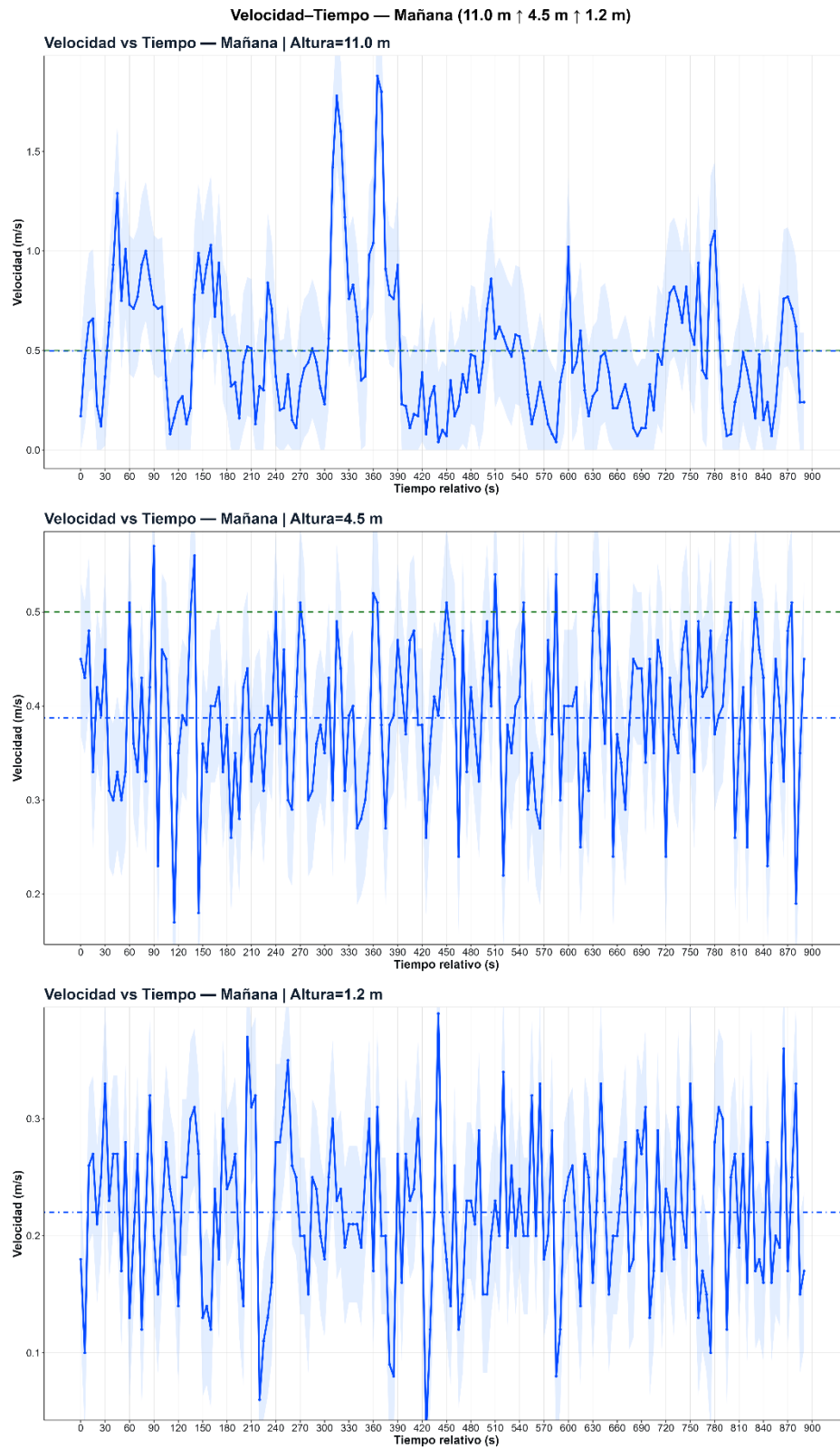


Figura 4. 28. Evolución temporal de la velocidad del viento durante el periodo nocturno evaluado.

Las series temporales de dirección y velocidad presentadas en las Figura 4. 25 - Figura 4. 28b permiten observar que el viento mantiene fluctuaciones continuas durante todo el periodo de monitoreo. Este comportamiento coincide con lo observado anteriormente en los perfiles verticales (Sección 4.5.2), donde se identificó que la región comprendida por debajo de aproximadamente 35 m se encuentra inmersa dentro de una zona fuertemente influenciada por la rugosidad urbana. En consecuencia, las condiciones que experimentaría una torre de viento residencial no corresponden a un flujo atmosférico completamente desarrollado, sino a un flujo con alta variabilidad espacial y temporal.

Debido a que estas tres alturas representan directamente los posibles puntos de intercambio de aire entre la atmósfera y la vivienda, los valores obtenidos fueron utilizados posteriormente para definir las condiciones de frontera de entrada empleadas en las simulaciones CFD. De esta manera, el modelo numérico se fundamentó en condiciones experimentales reales medidas sobre la vivienda, permitiendo establecer una relación directa entre la caracterización atmosférica y la evaluación del desempeño de la torre de viento propuesta.

4.5.4 Canalización urbana y flujo cercano a la vivienda

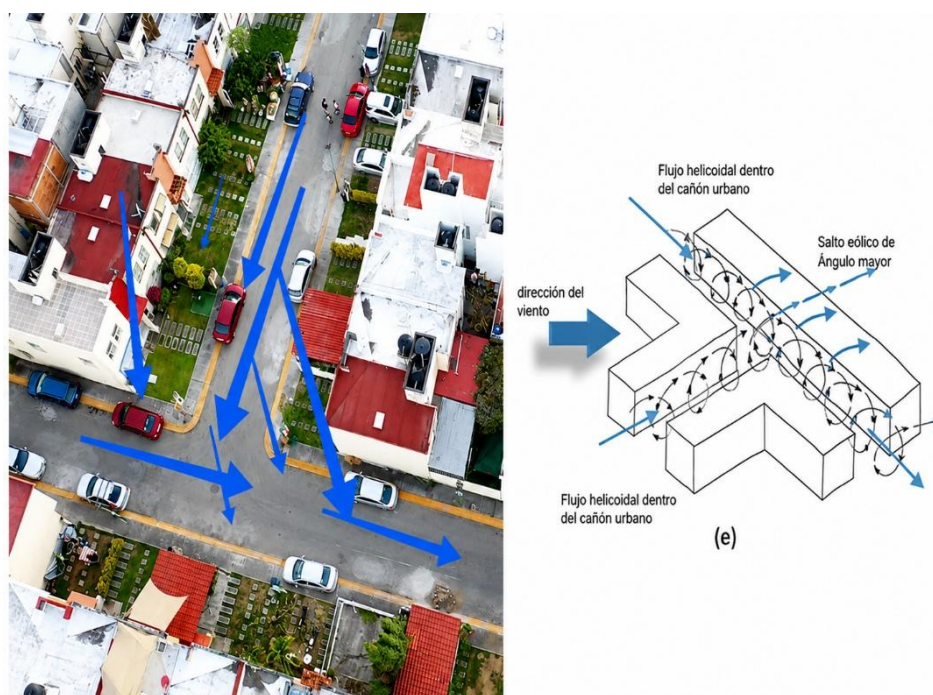


Fig 28 b Evidencia experimental de canalización urbana y modificación del flujo atmosférico en el entorno de la vivienda.

La configuración urbana observada alrededor de la vivienda favorece la aparición de procesos de canalización del viento dentro de la capa rugosa urbana. Como se aprecia en la Figura 28b , la disposición de calles, viviendas y espacios abiertos genera corredores preferenciales que modifican la trayectoria original del flujo atmosférico. En estas condiciones, el viento deja de comportarse como una corriente uniforme y comienza a adaptarse a la geometría del entorno construido, produciendo aceleraciones locales, cambios bruscos de dirección, recirculaciones y fenómenos de guiado del flujo a través de las vialidades.

Este comportamiento fue consistente con los resultados obtenidos durante la campaña experimental realizada en mayo de 2025. Las rosas de viento por altura (Figura 4. 25), los perfiles verticales (Figura 4. 23) y los registros simultáneos de velocidad y dirección (Figura 4. 26Figura 4. 27) mostraron que las mediciones realizadas a 1.2 m y 4.5 m presentaron direcciones dominantes claramente asociadas a la orientación de calles y corredores urbanos cercanos. En contraste, a medida que aumentó la altura de medición, el flujo comenzó a mostrar direcciones diferentes y una menor dependencia respecto a los obstáculos inmediatos.

Los perfiles verticales indicaron que esta influencia urbana fue particularmente significativa por debajo de aproximadamente 35 m de altura, región donde se observaron las mayores variaciones direccionales y los cambios más importantes en velocidad. Por encima de esta cota el flujo comenzó a estabilizarse progresivamente, mostrando un comportamiento más cercano al descrito por la teoría de la capa límite atmosférica superficial y los perfiles desarrollados de viento utilizados en la Monin–Obukhov Similarity Theory (MOST).

Desde el punto de vista físico, este resultado sugiere que la vivienda opera principalmente dentro de la denominada subcapa rugosa urbana (Urban Roughness Sublayer), donde la influencia de edificaciones, bardas, árboles y vialidades domina el comportamiento del flujo.

En consecuencia, las condiciones de viento disponibles para la ventilación natural no dependen exclusivamente del recurso eólico regional, sino de la interacción entre dicho flujo y la morfología urbana inmediata. Esta observación resulta especialmente relevante para la evaluación de torres de viento y sistemas de ventilación pasiva.

4.5.5 Viento disponible y escenario favorable.

A partir del análisis conjunto de las rosas de viento, perfiles verticales, monitoreos simultáneos y fenómenos de canalización urbana, se determinó que no toda la velocidad registrada era necesariamente aprovechable para ventilación natural. Por esta razón, se realizó una evaluación adicional considerando únicamente el viento incidente de forma aproximadamente normal a las ventanas y aberturas de captación, condición necesaria para favorecer el ingreso efectivo de aire al interior de la vivienda.

La Figura 4.30 presenta los escenarios con mayor potencial de ventilación identificados durante la campaña experimental. Para ello se aplicó un criterio angular de $\pm 45^\circ$ respecto a la normal de cada abertura, permitiendo cuantificar tanto la frecuencia de ocurrencia como la velocidad promedio efectiva asociada a cada orientación. Los resultados muestran que la fachada principal presentó los mayores porcentajes de incidencia directa a 1.2 m y 11.0 m, alcanzando frecuencias de 53.6 % y 80.4 %, respectivamente. Asimismo, la ventana de captación propuesta, ubicada a 11.0 m, correspondiente a la altura propuesta para la torre de viento, registró velocidades promedio cercanas a 1.50 m/s, superiores a las observadas en los niveles inferiores de la vivienda.

Estos resultados permitieron seleccionar las condiciones de frontera empleadas posteriormente en las simulaciones CFD desarrolladas en el Capítulo 5.



Figura 4. 29. Identificación de viento efectivo normal a las aberturas de la vivienda y selección de condiciones de frontera para simulación CFD...

4.6 Memoria térmica y estimación física de cargas en la envolvente

A partir de la metodología de estimación de carga térmica definida en el Capítulo 3, en esta sección se presentan los resultados obtenidos para el cuarto crítico de la vivienda. El análisis integra las temperaturas superficiales interiores obtenidas mediante termografía infrarroja cuantitativa, las áreas reales de las superficies evaluadas y los coeficientes de transferencia de calor previamente establecidos.

El propósito de esta sección es cuantificar la carga térmica sensible asociada a la envolvente interior y establecer una base física para evaluar la capacidad potencial de remoción de calor mediante ventilación natural.

La Tabla 4. 3 presenta los valores del coeficiente radiativo equivalente h_r calculados para las superficies interiores del cuarto crítico. Estos valores se obtuvieron a partir de las temperaturas superficiales medidas mediante termografía infrarroja cuantitativa y de la formulación aplicada

definida en la ecuación (3.18) del Capítulo 3, correspondiente a la linealización del intercambio radiativo interior.

SUPERFICIE	(T _s) (°C)	(T _s) (K)	(h _r) [W/m ² K]
Azotea (máx)	46.0	319.15	6.04
Muro Este	39.0	312.15	5.83
Muro Sur	38.1	311.25	5.79
Muro Norte	37.4	310.55	5.75
Piso	36.1	309.25	5.69
Muro colindante (mín)	35.5	308.65	5.66

Tabla 4. 3. Valores de Coeficiente radiativo de cada muro del caso de análisis.

Los resultados muestran que el coeficiente radiativo equivalente se mantiene en un intervalo cercano, entre 5.66 y $\frac{6.04 \text{ W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$. El valor mayor corresponde a la azotea interior, asociada con la temperatura superficial más elevada, mientras que el menor corresponde al muro colindante, que presentó la temperatura superficial más baja dentro del conjunto evaluado.

La Tabla 4.4 presenta la estimación de carga térmica sensible aportada por cada superficie interior del cuarto crítico. Los valores fueron obtenidos a partir de las áreas reales de intercambio, las temperaturas superficiales medidas mediante termografía infrarroja cuantitativa y los coeficientes de transferencia de calor definidos previamente en la metodología.

Superficie	(A) (m ²)	(T _s) (°C)	(Δ T) (K)	(h _c)	(h _r)	(h _{tot})	$\dot{Q}_i$ (W)
Techo	12.47	46.0	20.0	1.76	6.04	7.80	1,945.32
Piso	12.47	36.1	10.1	4.03	5.69	9.72	1,224.20
Muro Sur	10.32	38.1	12.1	2.58	5.79	8.37	1,045.18
Muro Este	6.96	39.0	13.0	2.66	5.83	8.49	768.18
Muro Norte	10.32	37.4	11.4	2.55	5.75	8.30	976.48
Muro Oeste	6.96	35.5	9.5	2.51	5.66	8.17	540.20

Tabla 4. 4. Resultados de coeficiente por superficie.

La diferencia térmica (Δ T) fue calculada respecto a la temperatura de referencia de confort mediante la ecuación (3.11). Posteriormente, el coeficiente total de transferencia de calor (h_{tot}) se obtuvo mediante la suma del coeficiente convectivo interior y el coeficiente radiativo equivalente, conforme a la ecuación (2.24). Finalmente, la carga térmica por superficie $\dot{Q}_i$ se estimó mediante la ecuación (3.12), integrando el área de cada elemento, el coeficiente total y la diferencia térmica correspondiente.

Una vez estimada la carga térmica sensible aportada por cada superficie interior del cuarto crítico, se integraron las contribuciones individuales para obtener la carga total asociada a la envolvente. Esta suma corresponde a la aplicación directa del balance por superficies definido en la metodología, donde cada elemento constructivo aporta una fracción de la carga térmica en función de su área, temperatura superficial y coeficiente total de transferencia de calor.

4.6.1 Carga total por envolvente.

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{total} &= \sum \dot{Q}_i \\ &= 1945.32 + 1224.20 + 1045.18 + 768.18 + 976.48 + 540.20 \\ \dot{Q}_{total} &= \mathbf{6499.56 \text{ W}}\end{aligned}$$

CARGAS INTERNAS (PERSONAS + ILUMINACIÓN). Ecuación (2.11) – (2.14)

Iluminación

Una lámpara de 60 W termina prácticamente como calor en el recinto:

$$\dot{Q}_{\text{luz}} = 60.00 \text{ W}$$

Personas: 2 adultos y 1 menor (metabolismo lento):

- Adulto

$$\dot{q}_{s,ad} = 75 \text{ W}, \dot{q}_{l,ad} = 55 \text{ W}$$

- Menor 0.70 de un adulto

(ASHRAE, 2021)

(reposo):

Carga sensible personas

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{pers},s} &= 2(75) + 1(0.70 \cdot 75) \\ &= 150 + 52.50 = \mathbf{202.50 \text{ W}}\end{aligned}$$

Carga latente personas

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{\text{pers},l} &= 2(55) + 1(0.70 \cdot 55) \\ &= 110 + 38.50 = \mathbf{148.50 \text{ W}}\end{aligned}$$

CARGA INTERNA TOTAL

Sensible interna

$$\dot{Q}_{\text{int},s} = \dot{Q}_{\text{luz}} + \dot{Q}_{\text{pers},s} = 60.00 + 202.50 = 262.50 \text{ W}$$

Latente interna

$$\dot{Q}_{\text{int},l} = 148.50 \text{ W}$$

CARGA TOTAL CON ENVOLVENTE

Sensible total (mantener 26°C)

$$\dot{Q}_{\text{sens,perm}} = \dot{Q}_{\text{env}} + \dot{Q}_{\text{int},s} = 6499.56 + 262.50 = \mathbf{6762.06 \text{ W}}$$

Total, incluyendo latente (personas)

$$\dot{Q}_{\text{tot,perm}} = \dot{Q}_{\text{sens,perm}} + \dot{Q}_{\text{int},l} = 6762.06 + 148.50 = \mathbf{6910.56 \text{ W}}$$

Masa térmica (cama + closet) como carga transitoria.

Cama y closet no “generan” W constantes; son masa térmica.

En el arranque, el equipo debe extraer energía almacenada:

$$Q_{\text{alm}} = m c_p \Delta T$$

Energía almacenada.

Usamos un supuesto explícito de masa total muebles + cama:

- $m_{\text{mob}} = 200 \text{ kg}$
- $c_p = 1.6 \text{ kJ/kgK}$ (madera/MDF)
- $\Delta T_{\text{mob}} = 39.2 - 26 = 13.2 \text{ K}$

$$Q_{\text{alm}} = 200(1.6)(13.2) = \mathbf{4224 \text{ kJ}}$$

$$4224 \text{ kJ} = \frac{4224}{3600} = \mathbf{1.17 \text{ kWh}}$$

Energía por extraer por muebles/cama

DIMENSIONAMIENTO DE LA CARGA TÉRMICA TOTAL DEL INTERIOR

$$\dot{Q}_{\text{tot},1h} = \dot{Q}_{\text{tot,perm}} + \dot{Q}_{\text{alm},1h} = 6910.56 + 1170.00 = 8080.56 \text{ W}$$

$$8080.56 \cdot 3.412 = 27570.87 \text{ BTU/h} \Rightarrow \text{TR} = \frac{27570.87}{12000} = \mathbf{2.30 \text{ TR}}$$

$$\dot{Q}_{\text{tot},} = 8080.56 \text{ W} = 27,570.87 \text{ BTU/h} = 2.30 \text{ TR}$$

El resultado final se expresó en watts, BTU/h y toneladas de refrigeración únicamente como equivalencia energética, no como dimensionamiento definitivo de un sistema de climatización.

Una vez estimada la carga térmica sensible del recinto, el análisis se orientó a evaluar qué características debería presentar el viento para contribuir de manera efectiva al confort térmico del cuarto crítico. Esta etapa corresponde a la aplicación de la metodología definida en el apartado 3.9.8, donde la ventilación natural se planteó como un mecanismo de remoción de calor sensible dependiente del caudal de aire, la diferencia de temperatura interior–exterior y la continuidad temporal del flujo.

De acuerdo con la metodología del Capítulo 3, la ventilación natural solo representa enfriamiento sensible cuando la temperatura exterior es menor que la temperatura interior. Por esta razón, el viento útil para confort no depende únicamente de su velocidad, sino también de su temperatura, dirección efectiva hacia las aberturas, persistencia temporal y capacidad real de atravesar el recinto.

Para esta evaluación se utilizó como referencia la carga sensible permanente del cuarto crítico:

$\dot{Q}_{\text{sens}}$ sería tu carga sensible permanente:

$$\dot{Q}_{\text{sens}} = 6762.06 \text{ W}$$

SI EL VIENTO FUERA FAVORABLE. ¿PODRÍAMOS ENFRIAR?

Modelo de ventilación para remover calor sensible. El calor removido por ventilación ($T_{\text{out}} < T_{\text{room}}$) se estima con:

$$\dot{Q}_{\text{sens}} = \rho c_p \dot{V} (T_{\text{room}} - T_{\text{out}})$$

Despeje:

$$\dot{V} = \frac{\dot{Q}_{\text{sens}}}{\rho c_p (T_{\text{room}} - T_{\text{out}})}$$

Área de las ventanas de fachada sur.

$$A_{\text{abierta}} = 0.87 \text{ m}^2$$

Y la velocidad media requerida sería:

$$v = \frac{\dot{V}}{A_{\text{abierta}}}$$

ESCENARIOS “FAVORABLES” (HIPOTÉTICOS) Y RENOVACIONES (ACH)

$$\dot{Q}_{\text{sens}} = 7932 \text{ W}, T_{\text{room}} = 26^\circ \text{C}.$$

- Caso 1: Exterior muy favorable $T_{\text{out}} = 18^\circ \text{C}$ ($\Delta T = 8 \text{ K}$)

$$\dot{V} = \frac{7932}{1.18 * 1006 * 8} = \frac{0.835 \text{ m}^3}{s} = \frac{3006 \text{ m}^3}{h}$$

$$v = \frac{0.835}{0.87} = 0.96 \text{ m/s}$$

$$ACH = \frac{3006}{34.3} = 87.6 \text{ h}^{-1}$$

Caso 2: Exterior favorable $T_{out} = 20^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 6 \text{ K}$)

$$\dot{V} = \frac{7932}{1.18 * 1006 * 6} = \frac{1.113 \text{ m}^3}{s} = \frac{4007 \text{ m}^3}{h}$$

$$v = \frac{1.113}{0.87} = 1.28 \text{ m/s}$$

$$ACH = \frac{4007}{34.3} = 116.8 \text{ h}^{-1}$$

- Caso 3: Apenas favorable $T_{out} = 24^\circ\text{C}$ ($\Delta T = 2 \text{ K}$)

$$\dot{V} = \frac{7932}{1.18 * 1006 * 2} = \frac{3.339 \text{ m}^3}{s} = \frac{12,020 \text{ m}^3}{h}$$

$$v = \frac{3.339}{0.87} = 3.84 \text{ m/s}$$

$$ACH = \frac{12020}{34.3} = 350.4 \text{ h}^{-1}$$

Observación técnica: Si el exterior no es bastante más frío que 26°C , la ventilación necesaria se vuelve excesiva, de “modo o parecida a ventilador industrial”.

4.6.2 Caso real a las 19:00 en sitio.

Condiciones a esa hora:

$$T_{out} = 33.6^\circ\text{C} > T_{room} = 26^\circ\text{C}$$

En la ecuación:

$$\dot{Q}_{sens} = \rho c_p \dot{V} (T_{room} - T_{out})$$

En el caso de que se lograra tener la temperatura de 26°C interior, ya sea por método asistido o algún otro, el término $(T_{room} - T_{out})$ es negativo, por lo que, después de llegar a un punto de confort, quisiéramos aplicar ventilación natural exclusiva: **la opción aportaría calor en vez de removerlo.**

A las 19:00 se midió un viento de 0.3 m/s , considerado favorable y normal para las ventanas.

Si entrara de forma sostenida por el área abierta:

$$\dot{V} = vA = 0.3(0.87) = \frac{0.261 \text{ m}^3}{s} = \frac{939 \text{ m}^3}{h}$$

$$ACH = \frac{939}{34.3} = 27.4 \text{ h}^{-1}$$

Pero $T_{out} = 33.6^\circ\text{C}$, ESE CAUDAL SERÍA UNA INYECCIÓN DE CALOR.

Los resultados muestran que la capacidad de enfriamiento por ventilación natural depende fuertemente del diferencial térmico disponible. Cuando el aire exterior es considerablemente más frío que el interior, el caudal requerido disminuye y la velocidad necesaria en la abertura se mantiene en

un rango más factible para ventilación natural. En cambio, cuando el aire exterior se aproxima a la temperatura de confort, el caudal necesario aumenta de forma significativa.

CAPÍTULO 5. MODELACIÓN CFD Y RESULTADOS NUMÉRICOS

La modelación CFD se desarrolló como etapa de comprobación física del sistema de ventilación pasiva. Los capítulos previos mostraron que la vivienda presenta sobrecalentamiento interior, carga térmica elevada en la envolvente y disponibilidad limitada de viento útil, condiciones que pueden comprometer el desempeño de una torre de viento como estrategia aislada.

En primer lugar, la revisión de Li et al. (2025), basada en 126 estudios sobre windcatcher y tecnologías pasivas o de baja energía integradas, señala que el desempeño de las torres de viento depende del clima de aplicación, la velocidad y dirección del viento, la temperatura exterior, la humedad relativa y la estrategia pasiva complementaria utilizada. Por ello, en climas cálidos subhúmedos, su funcionamiento no debe asumirse como garantía de confort, sino evaluarse bajo condiciones representativas del sitio.

En segundo lugar, la carta bioclimática de Givoni aplicada al caso de estudio (4.3.1- 4.3.2) mostró que el aire exterior puede presentar condiciones parcialmente favorables para ventilación natural en ciertos horarios; sin embargo, el cuarto crítico se mantuvo fuera de la zona de confort y con tendencia al sobrecalentamiento. Esto indica que el problema térmico interior no depende únicamente del aire exterior disponible, sino también de la acumulación de calor en la vivienda.

En tercer lugar, la memoria térmica evidenció que la envolvente aporta una carga sensible importante hacia el recinto (4.6.1). Por esta razón, la ventilación natural debe evaluarse no solo como movimiento de aire, sino como un mecanismo con capacidad real para remover calor. En consecuencia, el CFD se utilizó para comprobar si, bajo condiciones favorables de flujo constante obtenidas del monitoreo UAV, la torre de viento puede generar reducción térmica, redistribución del aire caliente y mejora del comportamiento higrotérmico interior.

En cuarto lugar, la caracterización del sitio de estudio permitió contextualizar las condiciones locales de viento y compararlas, de manera referencial, con las condiciones reportadas en regiones donde las torres de viento han tenido un desarrollo histórico significativo, como Yazd, Irán. Para el estado de Morelos, el estudio de Mendoza Uribe Indalecio (2018) indica que la zona analizada presenta velocidades promedio de viento entre 1 y 2 m/s. En contraste, Mirnezami et al. (2022) reportan para Yazd una velocidad promedio cercana a 5 m/s, con valores diurnos que oscilan entre 4 y 5.5 m/s. Esta diferencia resulta relevante, ya que permite reconocer que el desempeño de una torre de viento no depende únicamente de su geometría, sino también de la disponibilidad del recurso eólico local y de las condiciones atmosféricas que alimentan el sistema de ventilación natural.

El objetivo de este capítulo no es repetir los fundamentos numéricos desarrollados en el Capítulo 2, sino aplicar la configuración CFD al caso de estudio, validar el modelo base y comparar el comportamiento de la vivienda con y sin torre de viento.

Integración de la evidencia experimental en el modelo CFD.

El modelo CFD se configuró a partir de la geometría real de la vivienda y de las condiciones registradas durante la etapa experimental. El dominio incluyó los espacios interiores, la escalera y las aberturas; para el segundo escenario se incorporó la torre de viento, manteniendo las mismas condiciones generales del caso base.

La velocidad y dirección del aire se definieron con los datos obtenidos mediante UAV para la condición seleccionada del 17 de mayo a las 19:00 h. Las temperaturas de techo, muros y piso se establecieron a partir de los valores superficiales promedios obtenidos mediante termografía infrarroja cuantitativa.

Los registros de temperatura del aire se utilizaron para seleccionar la condición de análisis y para comparar los resultados del modelo base con los valores experimentales en puntos próximos a la ubicación de los sensores. La humedad relativa se reservó para la evaluación higrotérmica y de confort, por lo que no se incorporó como variable de frontera en la simulación.

La integración metodológica se resume de la siguiente forma:

Monitoreo experimental → condiciones de frontera → simulación del caso base → simulación con torre de viento → comparación de resultados

Ambos escenarios se resolvieron con las mismas condiciones térmicas y aerodinámicas. Por lo tanto, las diferencias obtenidas en los campos de velocidad, temperatura y turbulencia se atribuyeron principalmente a la incorporación de la torre de viento

5.1 Síntesis del modelo físico y numérico

La configuración físico-numérica del modelo CFD se definió con el propósito de representar el comportamiento térmico y aerodinámico del volumen de aire interior de la vivienda bajo una condición crítica derivada del monitoreo experimental. El modelo no se planteó como una reconstrucción completa del comportamiento transitorio diario, sino como una herramienta de análisis comparativo entre dos escenarios: la vivienda base y la vivienda con torre de viento.

<i>Criterio</i>	<i>Configuración aplicada</i>
<i>Software</i>	ANSYS Fluent 2026 R1 Student
<i>Tipo de análisis</i>	CFD tridimensional
<i>Régimen</i>	Estacionario
<i>Método numérico</i>	Volúmenes finitos
<i>Dominio</i>	Volumen de aire interior de la vivienda
<i>Escenarios</i>	Caso base y caso con torre de viento
<i>Fluido</i>	Aire incompresible
<i>Modelo de turbulencia</i>	RANS ($k - \varepsilon$) estándar
<i>Tratamiento cercano a pared</i>	Scalable Wall Functions
<i>Ecuación de energía</i>	Activada
<i>Flotabilidad</i>	Aproximación de Boussinesq
<i>Radiación</i>	Surface-to-Surface
<i>Acoplamiento presión-velocidad</i>	SIMPLE
<i>Presión</i>	PRESTO!
<i>Gradientes</i>	Least Squares Cell Based
<i>Discretización</i>	First Order Upwind
<i>Malla seleccionada</i>	Body-Fitted Cartesian, tamaño 0.09 m

<i>Fronteras térmicas</i>	Temperaturas superficiales obtenidas mediante termografía infrarroja cuantitativa
<i>Fronteras aerodinámicas</i>	Velocidad y dirección de viento derivadas del monitoreo con UAV
<i>Variables de comparación</i>	Temperatura, velocidad, distribución de flujo y energía cinética turbulenta
<i>Criterios de solución</i>	Residuales, conservación de masa, estabilidad de variables monitoreadas y coherencia física de campos

En conjunto, el modelo físico y numérico quedó definido por la siguiente relación:

$$\text{Condiciones experimentales} + \text{Ecuaciones gobernantes} + \text{Modelos CFD} + \text{Método numérico} = \text{Campos de presión, velocidad y temperatura}$$

Por tanto, el apartado 2.8 estableció la base física y numérica necesaria para interpretar los resultados CFD presentados posteriormente, conectando la mecánica del fluido, la transferencia de calor y la solución computacional con el fenómeno real observado en la vivienda analizada.

5.2 Escenarios de simulación CFD

Para evaluar el efecto de la torre de viento sobre el comportamiento térmico interior, se plantearon dos escenarios de simulación CFD:

El **caso base** representó la condición actual de la vivienda, sin torre de viento. Este escenario permitió reproducir el comportamiento térmico interior observado experimentalmente y funcionó como referencia para validar el modelo CFD. Su análisis fue necesario antes de evaluar cualquier modificación geométrica o estrategia pasiva.

El **caso con torre de viento** incorporó el dispositivo de ventilación pasiva bajo condiciones favorables de flujo. La velocidad de entrada se definió a partir del monitoreo experimental con UAV, considerando un flujo constante y representativo del viento útil identificado en el entorno inmediato de la vivienda. Este escenario no buscó representar toda la variabilidad diaria del viento, sino evaluar si, bajo una condición favorable y controlada, la torre podía inducir movimiento de aire, redistribuir calor y reducir la temperatura interior.

Ambos escenarios se configuraron con la misma formulación física, modelos numéricos y condiciones térmicas de frontera, con el propósito de que la comparación reflejara principalmente el efecto de la incorporación del sistema pasivo.

La comparación entre ambos escenarios permitió identificar si la torre de viento generaba cambios relevantes en el campo de velocidad, la distribución térmica y la estratificación interior. De esta manera, el CFD funcionó como herramienta de comprobación física para evaluar si la ventilación pasiva podía compensar parcialmente la carga térmica previamente estimada en la envolvente.

5.3 Geometría computacional y dominio de aire interior

La geometría computacional se desarrolló a partir de la configuración arquitectónica de la vivienda, considerando únicamente el volumen de aire interior como dominio de simulación. Esta decisión permitió concentrar el análisis CFD en el comportamiento del flujo de aire, la distribución térmica interior y el efecto de la ventilación pasiva, sin resolver de forma directa la conducción dentro de los elementos sólidos.

El dominio de aire se delimitó mediante las superficies interiores de muros, piso, cubierta, aberturas y zonas de conexión entre espacios. Las superficies sólidas se trataron como fronteras tipo pared, a las cuales se asignaron temperaturas superficiales obtenidas experimentalmente mediante termografía infrarroja cuantitativa. De esta forma, la envolvente no se modeló como sólido térmico, sino como una condición de frontera térmica aplicada al aire interior, conforme al criterio metodológico definido en el apartado 2.8.

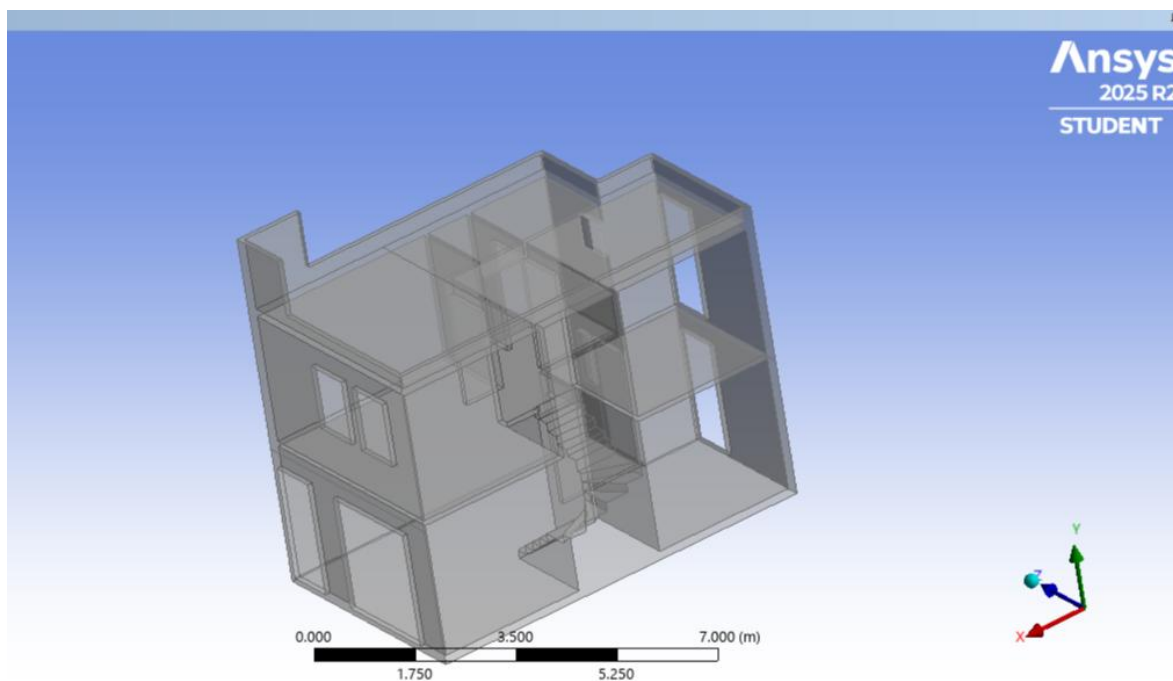


Figura 5. 1. Diseño modelo Base-Dominio solido (muros)..

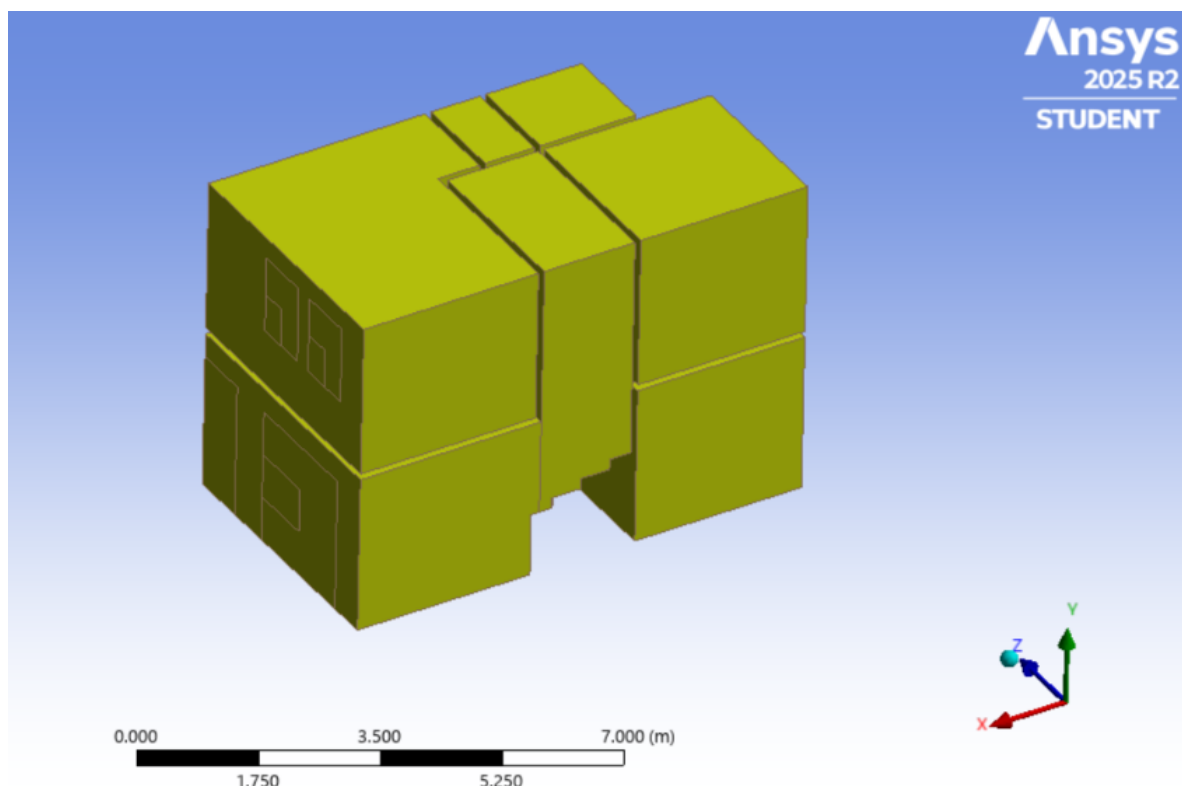


Figura 5. 2. Diseño modelo Base-Dominio Fluido Aire .

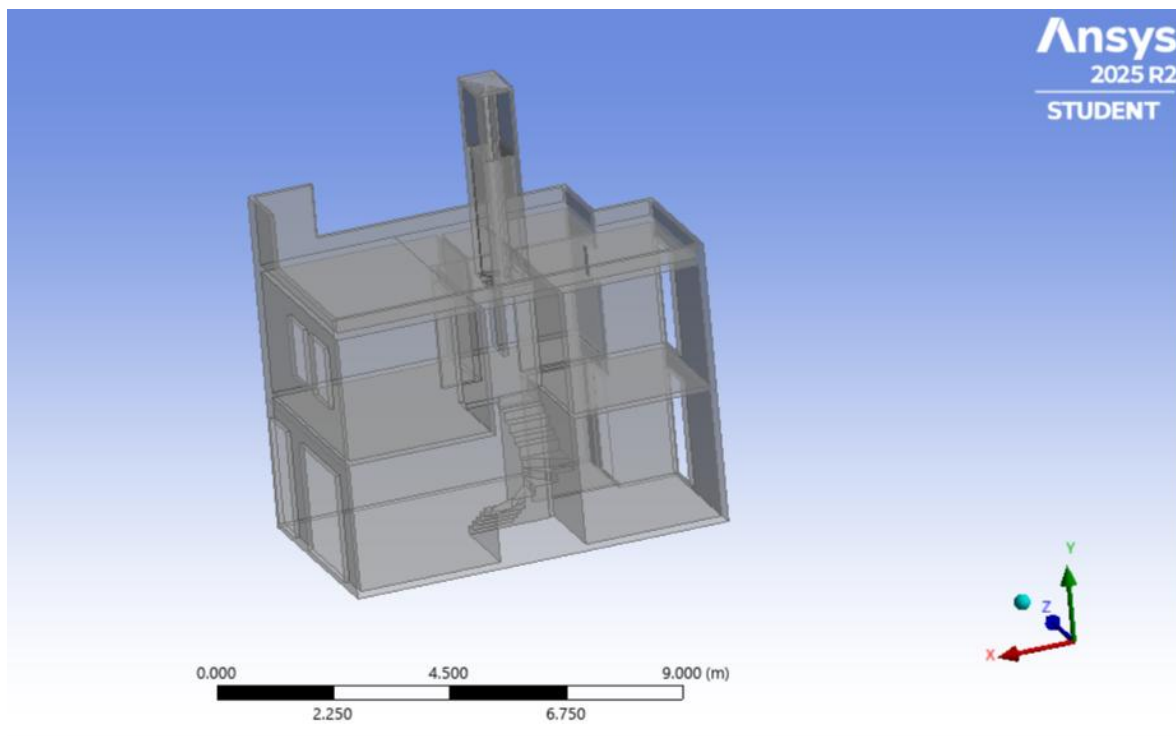


Figura 5. 3. Diseño modelo Base + Torre de viento-Dominio solido (muros).

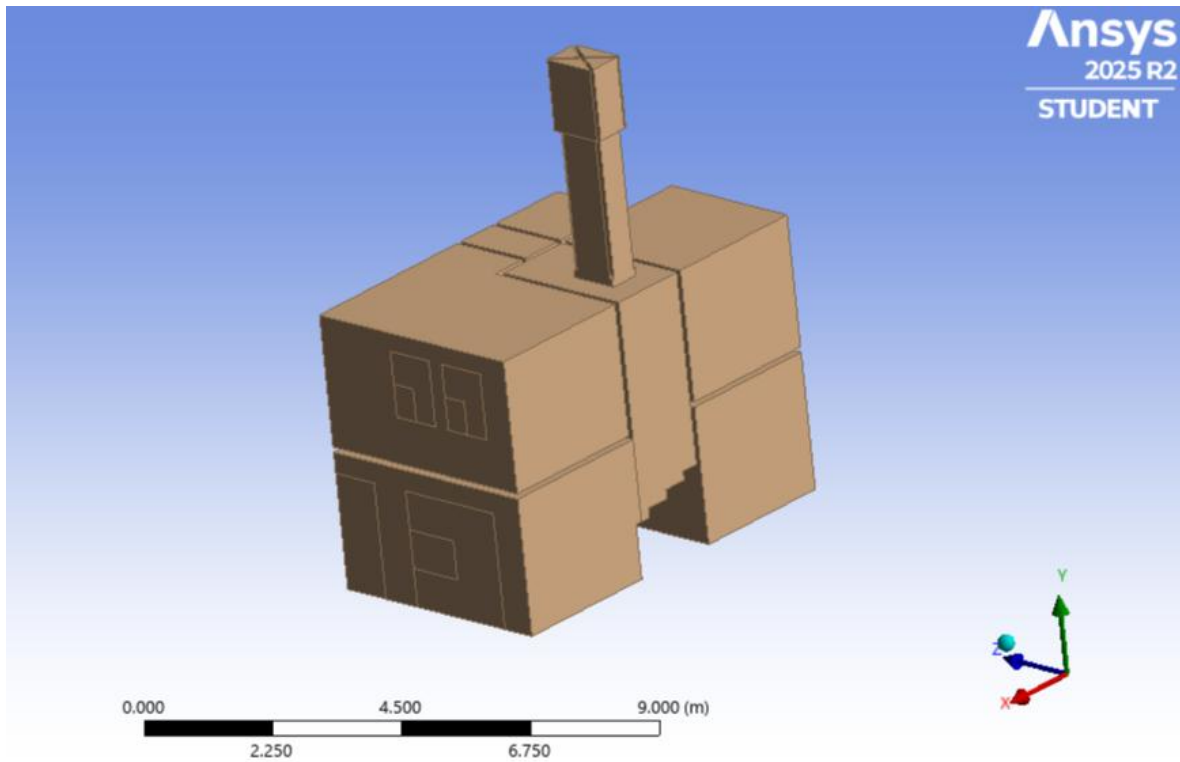


Figura 5. 4. Diseño modelo Base+ Torre de Viento -Dominio Fluido Aire.

5.4 Condiciones de frontera derivadas del monitoreo experimental

Las condiciones de frontera del modelo CFD se definieron a partir de la información obtenida durante la etapa experimental, con el propósito de representar de manera más fiel el comportamiento térmico y aerodinámico del caso de estudio. Esta decisión permitió que la simulación no dependiera de valores idealizados o condiciones genéricas, sino de datos medidos directamente en la vivienda, tales como temperaturas superficiales, temperatura del aire, velocidad de entrada y configuración física de las aberturas.

Con base en las opciones disponibles en el solver para la asignación de fronteras, cada elemento del dominio computacional fue definido de acuerdo con su función física dentro del modelo. De esta manera, los muros, techo, piso, aberturas de entrada, salidas de aire y demás superficies interiores se configuraron mediante condiciones de frontera específicas, considerando tanto la fuente experimental que alimentó cada parámetro como el objetivo de su incorporación en la simulación. En la Tabla 5. 1 se presentan los tipos de condiciones de frontera utilizados, la fuente de información empleada para su definición y la finalidad de cada una dentro del análisis CFD.

<i>Zona / elemento del modelo</i>	<i>Tipo de condición CFD</i>	<i>Valor / configuración aplicada</i>	<i>Origen del dato</i>	<i>Propósito dentro de la simulación</i>
<i>Muros interiores</i>	Wall	Temperatura superficial Monitoreada	Termografía infrarroja cuantitativa	Representar la carga térmica transferida desde la envolvente hacia el aire interior
<i>Techo / losa interior</i>	Wall	Temperatura superficial Monitoreada	Termografía infrarroja cuantitativa	Incorporar el efecto térmico de la cubierta sobre el cuarto crítico
<i>Piso interior</i>	Wall	Temperatura superficial Monitoreada	Termografía infrarroja cuantitativa	Representar el intercambio térmico entre el piso y el aire del recinto
<i>Entrada de aire del caso base</i>	Velocity-inlet	Velocidad representativa del viento disponible	Monitoreo UAV	Definir el flujo de aire incidente bajo condición experimental representativa
<i>Entrada de aire en torre de viento</i>	Velocity-inlet	Flujo constante favorable	Monitoreo UAV y escenario de viento útil	Evaluar el potencial de captación y redistribución de aire mediante la torre
<i>Salidas / aberturas</i>	Pressure-outlet	Presión manométrica (0\ Pa)	Criterio de ventilación natural	Permitir la salida del flujo según el balance interno de presión
<i>Superficies sólidas internas</i>	Radiación S2S	Superficies grises-difusas con emisividad definida	Propiedades radiativas de materiales y termografía	Representar el intercambio radiativo entre muros, techo y piso
<i>Dominio de aire interior</i>	Fluid domain	Aire interior con energía activada	Geometría computacional	Resolver velocidad, presión, temperatura y recirculaciones interiores
<i>Gravedad</i>	Body force	$g = \frac{(0, -9.81, 0) m}{s}$	Configuración física del modelo	Activar flotación térmica y estratificación interior
<i>Densidad del aire</i>	Boussinesq	$T_0 = 309.15 K$ $\beta = 0.00324 K - 1$	Metodología CFD del apartado 2.8.3	Representar variación de densidad por temperatura

Tabla 5. 1. Setup de condiciones de frontera.



Figura 5. 5. Condiciones de frontera -Viento 17 mayo 7 pm.

Planta baja		
Superficie	Ts	ΔExt
PISO PB	32.40	-1.20
MPBCO Int	32.40	-1.20
MPBS Int	34.20	+0.60
Techo PB	32.20	-1.40
M.IntPB-Norte	32.40	-1.20
MPBE Int	34.70	+1.10
MCUBO	32.60	-1.00
M2.IntPB-Norte	34.40	+0.80
MCocina-Norint	34.40	+0.80
M2.IntPB-ESTE	35.00	+1.40

Escaleras / unión		
Superficie	Ts	ΔExt
Interior Colín-Unión	37.40	+3.80
AZOTEA Unión INT	41.80	+8.20
Piso Escalera 2	34.50	+0.90
Piso Escalera 1	32.90	-0.70
MPAEscal Int.	37.40	+3.80
AZOTEA Escaleras INT	43.90	+10.30

Exterior		
Superficie	Ts	ΔExt
AZOTEA	36.30	+2.70
MPAS Ext	33.90	+0.30
MPBS Ext	33.00	-0.60
MPAE Ext	34.60	+1.00
MPBE Ext	34.40	+0.80
M2. ExtB-Norte	37.40	+3.80
MCocina-NorExt	35.90	+2.30
MPAN EXT	36.20	+2.60
M2. Ext-2PA-Norte	36.70	+3.10

Planta alta / cuarto crítico		
Superficie	Ts	ΔExt
MPAS Int.	38.10	+4.50
PISO PA	36.10	+2.50
MPAE Int.	39.00	+5.40
MPAN Int.	37.40	+3.80
AZOTEA HP INT	46.00	+12.40
MPACO Int.	35.50	+1.90
PISO PA zona norte	34.80	+1.20
M2.IntPA-ESTE	38.80	+5.20
M2.IntPA-Norte	39.40	+5.80
M2.Int-2PA-Norte	36.60	+3.00
AZOTEA PA NORTE	45.90	+12.30
M2.IntPA-BAÑONORTE	39.40	+5.80
M2.IntPA-BAÑOCOLIN	37.20	+3.60

Figura 5. 6. Condiciones de frontera, temperatura promedio de procesamiento de superficie- 17 mayo 2025.

5.5 Estudio de independencia de malla y configuración numérica

Con el propósito de verificar que los resultados CFD no dependieran de manera significativa del tamaño de elemento utilizado, se realizó un estudio de independencia de malla. Para ello se evaluaron tres discretizaciones con tamaños característicos de 0.08 m, 0.09 m y 0.10 m, manteniendo constante la misma configuración física y numérica en todos los casos.

Las simulaciones se ejecutaron bajo las mismas condiciones de frontera, modelo de turbulencia, radiación, energía, gravedad y criterios de solución. Esta estrategia permitió comparar las variaciones en temperatura, velocidad, conservación de masa y convergencia sin introducir cambios adicionales en la física del problema. De esta manera, cualquier diferencia observada entre simulaciones pudo atribuirse principalmente al tamaño de malla.

El criterio principal de selección fue obtener una malla con buena calidad geométrica, conservación de masa adecuada, estabilidad de residuales y resultados térmicos consistentes. Para ello se revisaron parámetros como Orthogonal Quality, Skewness, número de elementos, número de nodos, flujo másico neto, temperatura promedio del dominio, velocidad promedio y velocidad máxima.

Los resultados mostraron que las tres mallas presentaron calidad geométrica aceptable para el análisis CFD. Sin embargo, la malla de 0.09 m ofreció el mejor equilibrio entre precisión, estabilidad numérica y costo computacional. Esta malla presentó valores adecuados de calidad ortogonal y skewness, además de conservar la masa dentro del dominio y mantener diferencias pequeñas respecto a las otras discretizaciones evaluadas.

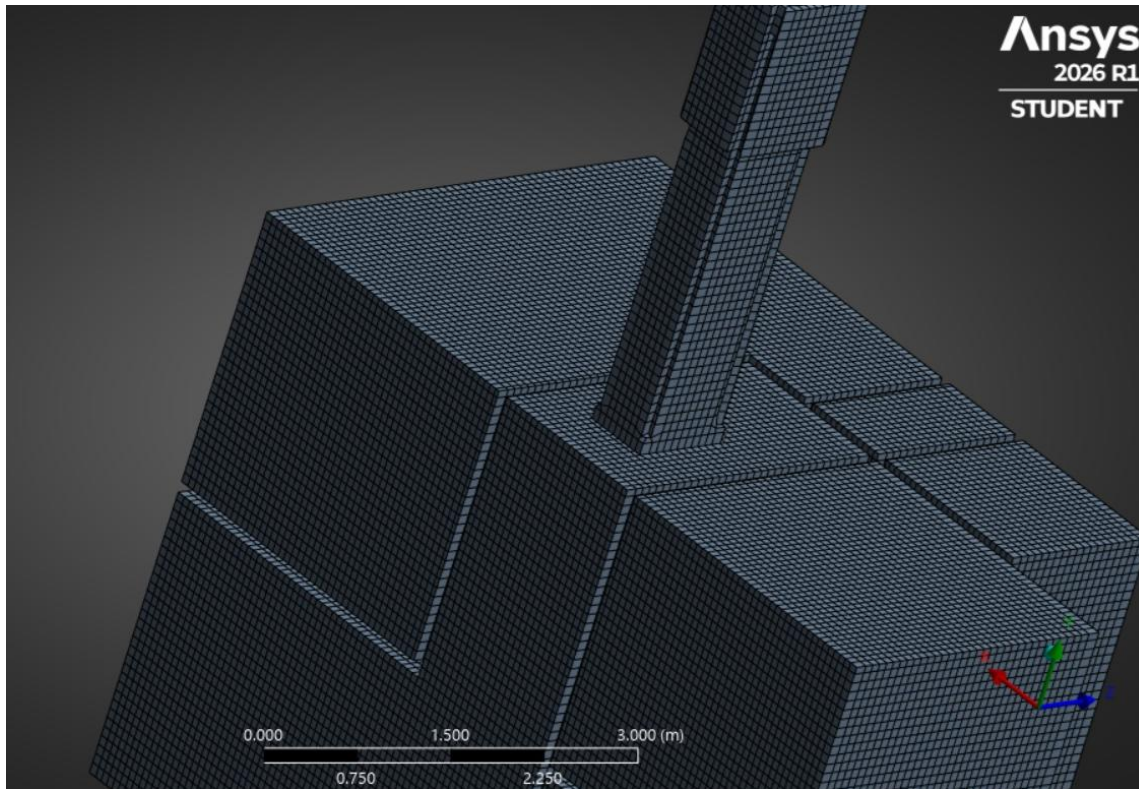


Figura 5. 7. Visualización de estructura de mallado.

La comparación térmica indicó que las variaciones de temperatura entre mallas fueron reducidas, lo que sugiere independencia de la solución respecto al refinamiento dentro del rango analizado. De forma similar, las velocidades promedio y máximas presentaron diferencias menores, por lo que el patrón general de flujo no se modificó de manera significativa al cambiar el tamaño de elemento.

La convergencia numérica también fue consistente entre los casos. Los residuales disminuyeron durante las iteraciones y alcanzaron un comportamiento estable antes de finalizar las 1000 iteraciones evaluadas. Esto permitió considerar que la solución obtenida era suficientemente estable para comparar los campos de temperatura y velocidad.

Con base en estos criterios, se seleccionó la malla de 0.09 m como discretización final para las simulaciones CFD. Esta elección permitió mantener independencia térmica y aerodinámica de la solución, conservar una calidad geométrica adecuada y evitar un incremento innecesario del costo computacional. Por lo tanto, la malla seleccionada se utilizó en los escenarios finales del caso base y del caso con torre de viento.

5. ESTADÍSTICAS GEOMÉTRICAS DE LAS MALLAS			
Parámetro	0.08 m	0.09 m	0.10 m
Nodos	323,278	367,537	≈360,000
Elementos	297,742	338,962	333,628
Orthogonal Quality (Prom.)	0.99861	0.99866	0.96750
Orthogonal Quality (Mín.)	0.51691	0.52489	0.47479
Orthogonal Quality (Máx.)	0.99999	0.99999	0.99999
Skewness (Prom.)	0.00533	0.00541	0.00541
Skewness (Máx.)	0.96720	0.96212	0.96212
Aspect Ratio (Prom.)	1.994	1.924	1.921
Aspect Ratio (Máx.)	9.679	11.097	12.345
Tiempo computacional	≈ 30 min	≈ 30 min	≈ 30 min

Tabla 5. 2. Estadísticas de las mallas utilizadas.

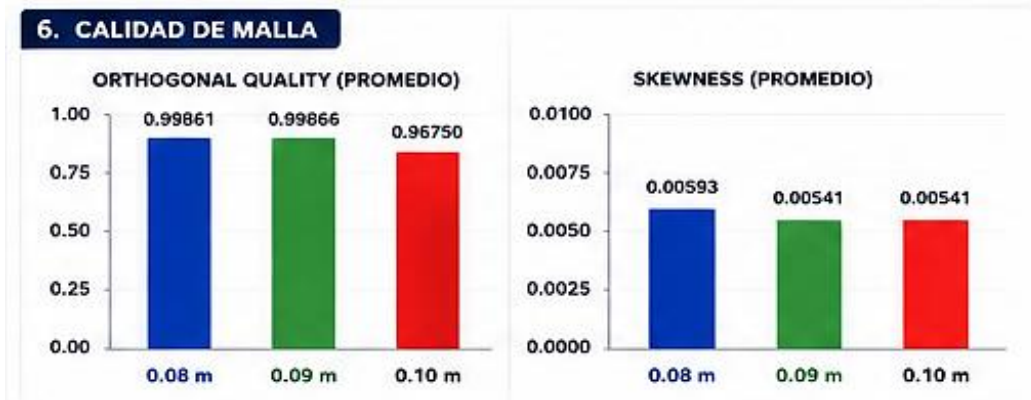


Figura 5. 8. Criterios de evaluación en la calidad de malla.

8. CONSERVACIÓN DE MASA			
Parámetro	0.08 m	0.09 m	0.10 m
$\Sigma \dot{m}$ Entrada (kg/s)	0.001033886	0.001045291	0.00103101
$\Sigma \dot{m}$ Salida (kg/s)	0.001026238	0.001015584	0.000000000
Error Neto (kg/s)	-7.65×10^{-6}	-2.94×10^{-5}	-1.03×10^{-3}
Error Relativo (%)	0.74	2.81	100.00

 Las mallas 0.08 m y 0.09 m conservan la masa adecuadamente (<3%).
 La malla 0.10 m presenta error elevado.

Tabla 5. 3. Evaluación de conservación de masa en malla de 0.08, 0.09 y 0.1 para elección de malla óptima.

9. VARIABLES GLOBALES DEL DOMINIO				
Parámetro	0.08 m	0.09 m	0.10 m	Variación máx.
Temperatura Prom. (°C)	35.03	33.71	33.99	3.92 %
Velocidad Prom. (m/s)	0.102	0.231	0.227	2.16 %
Velocidad Máx. (m/s)	0.764	4.760	4.758	0.04 %
Velocidad Mín. (m/s)	0.00069	0.00124	0.00043	186.05 %

✓ La malla 0.09 m ofrece el mejor equilibrio entre precisión y estabilidad.

Tabla 5. 4. Resultados de variables de interés para independencia de malla.

10. TEMPERATURA EN PUNTOS DE MONITOREO (CFD)				
Punto	0.08 m (°C)	0.09 m (°C)	0.10 m (°C)	ΔT máx. (°C)
Sala	34.16	33.51	34.08	0.65
Cuarto PB	33.69	33.69	34.00	0.31
Escaleras	34.08	34.96	35.31	0.88
Cuarto crítico PA	37.07	37.76	38.14	1.07
Cuarto PA	35.01	35.84	35.82	0.83

✓ Las temperaturas en puntos presentan diferencias menores a 1.1 °C entre mallas.

Tabla 5. 5. Temperaturas simuladas de tres mallas seleccionadas.

5.6 Validación CFD del caso base

La validación CFD del caso base se realizó con el propósito de verificar que el modelo numérico reprodujera de forma aceptable el comportamiento térmico medido experimentalmente en la vivienda antes de evaluar el escenario con torre de viento. Esta etapa permitió establecer que las diferencias posteriores entre escenarios estuvieran asociadas a la incorporación del sistema pasivo y no a inconsistencias en la configuración numérica.

La comparación se efectuó entre las temperaturas experimentales registradas por los sensores de monitoreo higrotérmico descritos en el apartado 3.3.4 y las temperaturas obtenidas mediante CFD en puntos equivalentes del dominio computacional. Para ello, los puntos de extracción de datos simulados se colocaron en las coordenadas más próximas a la ubicación real de los sensores instalados en la vivienda. Este criterio permitió comparar la respuesta térmica simulada con las mediciones reales en sala, cuarto frío de planta baja, escaleras, cuarto crítico de planta alta y cuarto B de planta alta.

Zona	Temperatura medida [°C]	CFD caso base [°C]	Error CFD base [°C] (CFD - Medida)	Error absoluto [°C]
 Sala	33.10	33.62	+0.52	0.52
 Cuarto frío PB	34.00	33.67	-0.33	0.33
 Escalera	35.50	35.51	-0.19	0.19
 Cuarto crítico PA	39.20	38.63	-0.57	0.57
 Cuarto B PA	38.60	38.24	-0.36	0.36

Tabla 5. 6. Comparativa de temperaturas monitoreadas 17 de mayo y temperaturas de simulación BASE.

Desde el punto de vista físico, el modelo logró reproducir el incremento térmico hacia planta alta, especialmente en el cuarto crítico y en el cuarto B. Este comportamiento es coherente con los fenómenos de acumulación térmica en cubierta, estratificación interior y flotación térmica descritos previamente. La correspondencia entre medición y CFD confirma que la configuración numérica fue capaz de representar la influencia de la envolvente caliente sobre el aire interior y la distribución vertical de temperatura dentro de la vivienda.

5.7 Resultados del caso base sin torre.

El caso base sin torre representa la condición original de la vivienda, considerando la geometría existente, las aberturas disponibles y las temperaturas superficiales de frontera obtenidas experimentalmente. Este escenario permitió identificar el comportamiento térmico y aerodinámico interior antes de incorporar la torre de viento.

5.7.1 Distribución de temperatura

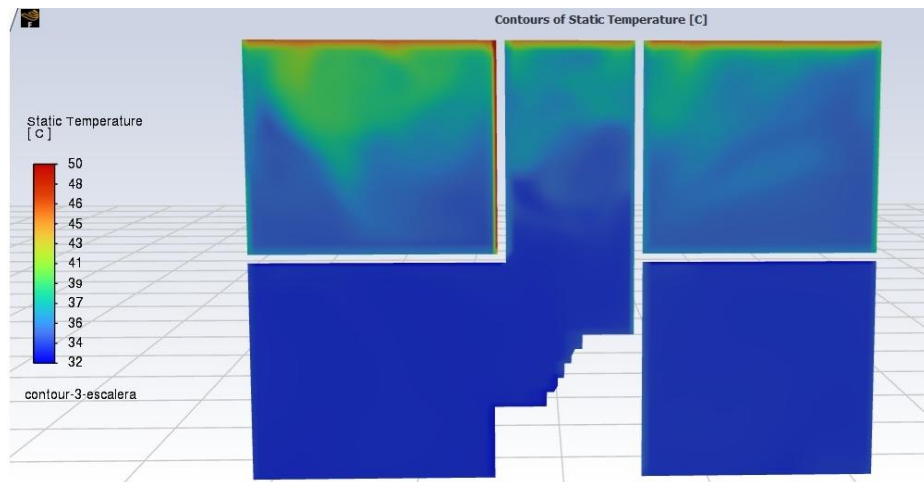


Figura 5. 9. Vista ESTE del perfil de temperatura de la simulación BASE , Malla 0.09.

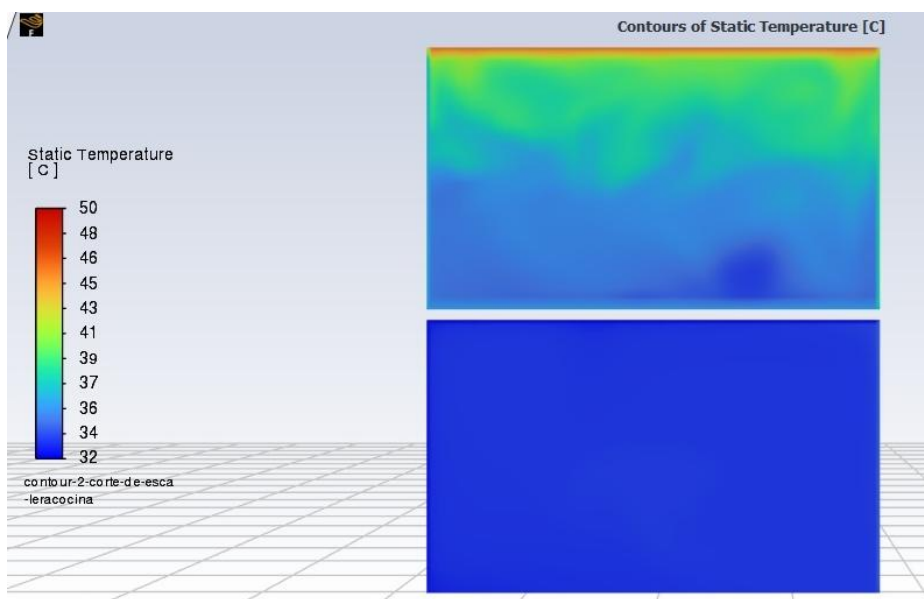


Figura 5. 10. Vista FRONTAL (Cuarto critico-SALA) del perfil de temperatura de la simulación BASE. 0.09m.

Las Figura 5. 9Figura 5. 10, muestra los contornos de temperatura estática obtenidos para el caso base sin torre. La distribución térmica evidencia una mayor acumulación de calor en la planta alta, principalmente en el cuarto crítico y en las zonas próximas a la cubierta. La temperatura máxima simulada fue de aproximadamente (39.3°C) mientras que la temperatura mínima fue cercana a (33.5°C) con una diferencia térmica aproximada de (6.0°C) dentro del dominio.

La interpretación de este resultado se sustenta en los mecanismos experimentales identificados previamente. Las temperaturas superficiales de muros, techo y piso, obtenidas mediante termografía infrarroja cuantitativa, fueron utilizadas como condiciones térmicas de frontera; por ello, el campo térmico simulado representa la respuesta del aire interior ante la carga de la envolvente. Este comportamiento se relaciona con el modelo superficie–aire desarrollado en el apartado 3.9.3 y con la ecuación de energía incorporada en la formulación CFD.

La mayor temperatura observada en planta alta es coherente con el monitoreo higrotérmico del Capítulo 4 y con la acumulación térmica de la cubierta identificada mediante termografía. En este escenario, el aire caliente tiende a concentrarse en la parte superior por efecto de flotación térmica, favoreciendo la estratificación vertical del recinto.

5.7.2 Campo de velocidad interior

Las Figura 5. 11Figura 5. 13, presentan los contornos de magnitud de velocidad del aire para el caso base sin torre. En general, se observó que la mayor parte del dominio interior presenta velocidades bajas, mientras que los incrementos de velocidad se concentran de forma localizada cerca de aberturas, zonas de paso y regiones donde el flujo encuentra menor resistencia geométrica.

Este comportamiento indica que la ventilación natural existente no genera una distribución homogénea del aire dentro de la vivienda. Aunque existen zonas puntuales con movimiento de aire, especialmente en planta baja y en trayectorias cercanas a las aberturas, el flujo no alcanza a renovar de manera efectiva todo el volumen interior. En planta alta predominan regiones de baja velocidad, condición que limita la remoción del aire caliente acumulado en las zonas superiores.

La interpretación del campo de velocidad se relaciona con la disponibilidad real de viento útil caracterizada mediante UAV en el Capítulo 4. Los resultados experimentales mostraron que el viento cercano a la vivienda presentó baja magnitud, variabilidad direccional e influencia de la rugosidad urbana, fenómenos discutidos en el Capítulo 2. Por ello, las bajas velocidades simuladas en el caso base son coherentes con las condiciones microclimáticas del sitio y con la limitada capacidad de ventilación natural de la vivienda original.

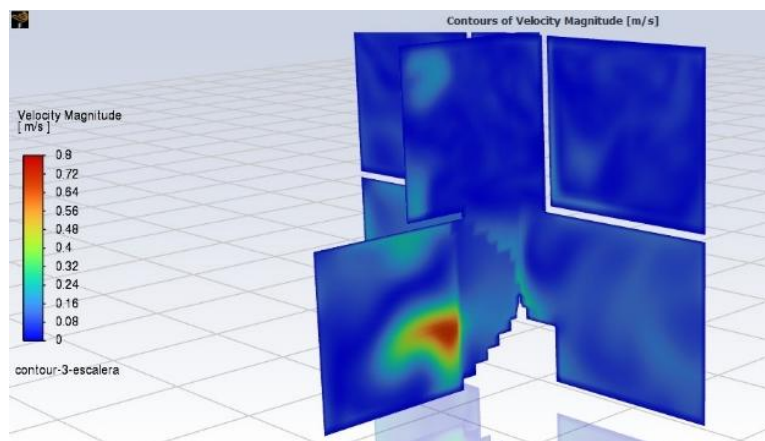


Figura 5. 11. CORTE (Cuarto critico-SALA- Escalera) de velocidad de la simulación BASE. 0.09m

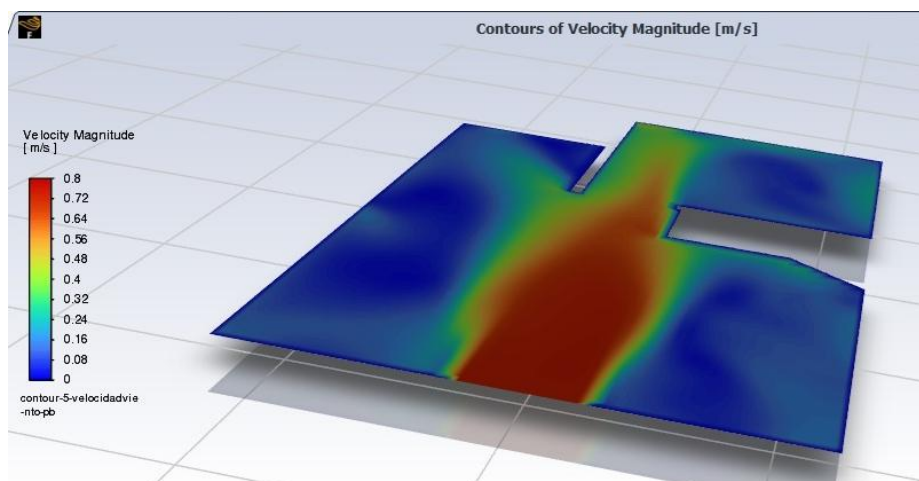


Figura 5. 12. CORTE medio PA. Velocidad de la simulación BASE. 0.09m

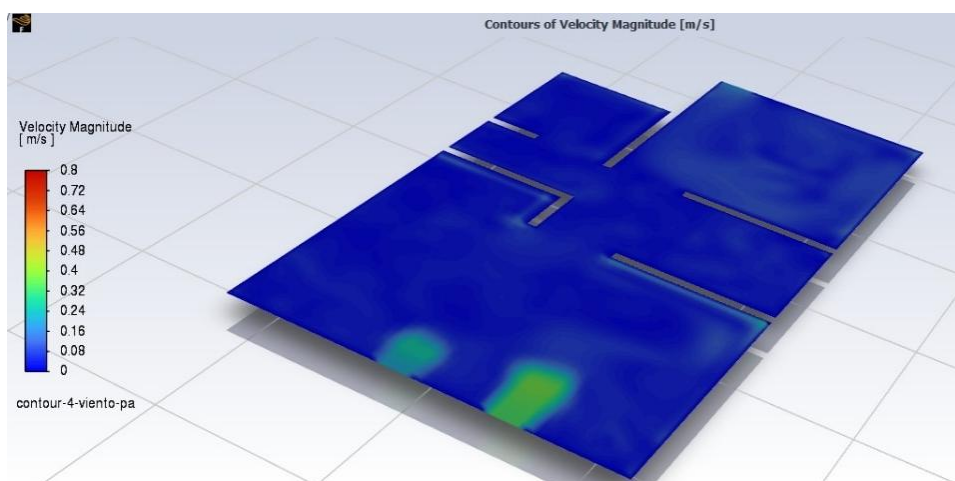


Figura 5. 13. CORTE medio PB. Velocidad de la simulación BASE. 0.09m.

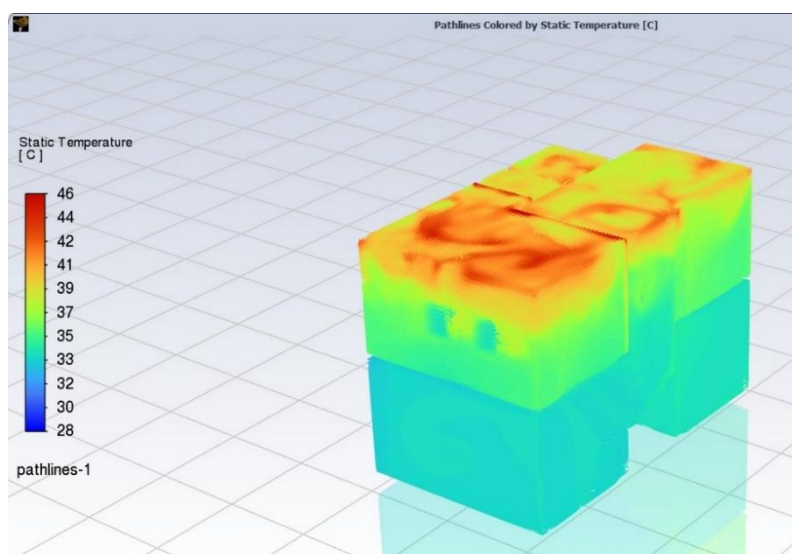


Figura 5. 14. Modelo isométrico de temperatura del caso BASE..

5.8 Resultados del escenario con torre de viento

El escenario con torre de viento representa la configuración pasiva propuesta para modificar el comportamiento térmico y aerodinámico interior de la vivienda. Este caso se resolvió utilizando la misma configuración numérica del caso base validado: malla de 0.09 m, modelo de energía activado, aproximación de Boussinesq, radiación Surface-to-Surface (S2S) y modelo de turbulencia Realizable k- ϵ . De esta forma, las diferencias observadas entre ambos escenarios se atribuyen principalmente a la incorporación de la torre de viento y no a cambios en la configuración CFD.

Para complementar la interpretación térmica del escenario con torre de viento, la Tabla 5. 7 presenta la comparación entre las temperaturas medidas durante el monitoreo, el caso base sin torre y el escenario con torre. Tomando para todos los casos las ubicaciones de los sensores y exportándolos a las coordenadas digitales de nuestro dibujo de simulación. Esta comparación permite observar el efecto térmico de la configuración pasiva propuesta respecto al caso base validado.

COMPARACIÓN DE TEMPERATURAS – DATOS MEDIDOS, CASO BASE Y CASO BASE + TORRE DE VIENTO										
Validación y evaluación del impacto térmico de las torres de viento en la vivienda monitoreada										
ID	Zona / Ubicación	Temperatura medida (monitoreo) [°C]	Caso base (sin torres)			Caso base + Torres de viento (configuración final ajustada)			Reducción térmica respecto al caso base	
			T [°C]	Error [°C] (CFD - Medida)	Error rel. [%]	T [°C]	Error [°C] (CFD - Medida)	Error rel. [%]	ΔT [°C] (Base - Torres)	Mejora [%] *
S1	Sala	33.10	33.62	+0.52	1.57	33.74	+0.64	1.93	-0.12	-0.36
S2	Cuarto frío PB	34.00	33.67	-0.33	0.97	33.52	-0.48	1.41	+0.15	+0.44
S3	Escalera	35.50	35.31	-0.19	0.54	34.09	-1.41	3.97	+1.22	+3.46
S4	Cuarto crítico PA	39.20	38.63	-0.57	1.45	35.00	-4.20	10.71	+3.63	+9.35
S5	Cuarto B PA	38.60	38.24	-0.36	0.93	35.04	-3.56	9.22	+3.20	+8.35

Tabla 5. 7. Resultados de simulación Base + Torre de viento y comparativa casos monitoreados y Base simulada.

La reducción térmica se concentró principalmente en planta alta. En el cuarto crítico se obtuvo una disminución de 3.63 °C respecto al caso base, mientras que en el cuarto B de planta alta la reducción fue de 3.20 °C. En la zona de escaleras se presentó una reducción de 1.22 °C, lo cual indica que la torre modifica la comunicación vertical del flujo y favorece la descarga parcial del aire caliente acumulado.

En planta baja, el efecto fue menor. El cuarto frío presentó una reducción de 0.15 °C, mientras que en sala se observó un incremento de 0.12 °C respecto al caso base. Esto indica que la torre no produce un enfriamiento homogéneo en toda la vivienda, sino un efecto más relevante en las zonas superiores, donde previamente se identificó mayor acumulación térmica.

Con base en estos resultados, el escenario con torre de viento muestra un desempeño favorable como estrategia de alivio térmico en planta alta. Su efecto se relaciona con la generación de una trayectoria vertical de flujo, la extracción parcial del aire caliente y la reducción de la estratificación térmica en las zonas críticas.

5.8.1 Distribución de temperatura con torre

Las figuras de la 5.15 a la 5.19 - muestra los contornos de temperatura estática obtenidos para el escenario con torre de viento. En comparación con el caso base, se observa una reducción térmica más marcada en las zonas superiores de la vivienda, principalmente en el cuarto crítico de planta alta

y en el cuarto B de planta alta. Este comportamiento indica que la torre modifica la distribución térmica interior y favorece la descarga parcial del aire caliente acumulado en la región superior.

En este escenario, las temperaturas simuladas fueron de 33.74 °C en sala, 33.52 °C en el cuarto frío de planta baja, 34.09 °C en escaleras, 35.00 °C en el cuarto crítico de planta alta y 35.04 °C en el cuarto B de planta alta. La reducción térmica más importante se presentó en planta alta, donde previamente se identificó la mayor acumulación de calor.

Este resultado es coherente con los fenómenos físicos discutidos en capítulos anteriores: flotación térmica, estratificación vertical y acumulación de calor bajo cubierta. Al incorporar una trayectoria superior de descarga, la torre permite modificar el patrón térmico del dominio y reducir la permanencia del aire caliente en los espacios superiores.

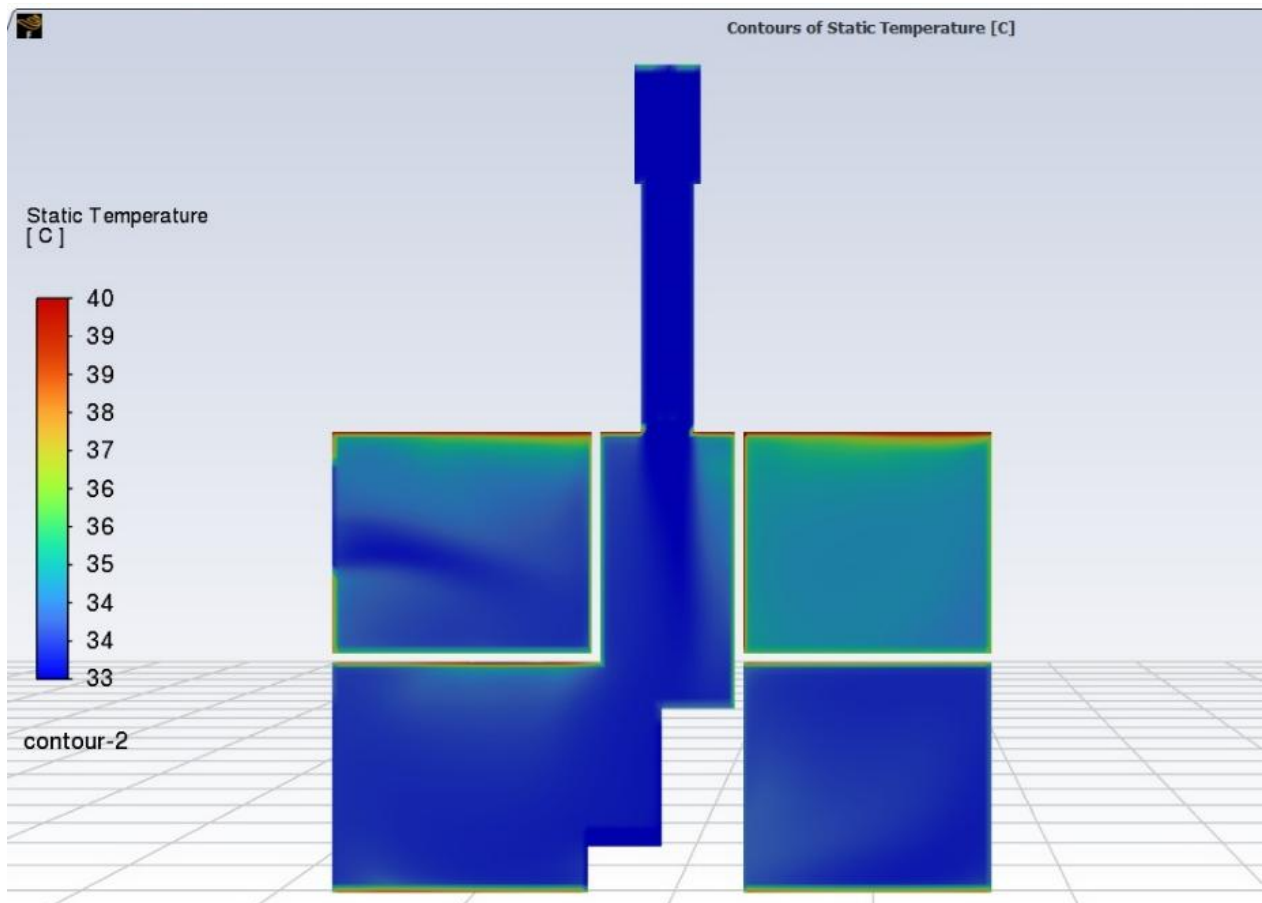


Figura 5. 15. Vista ESTE del perfil de temperatura de la simulación BASE + Torre , Malla 0.09

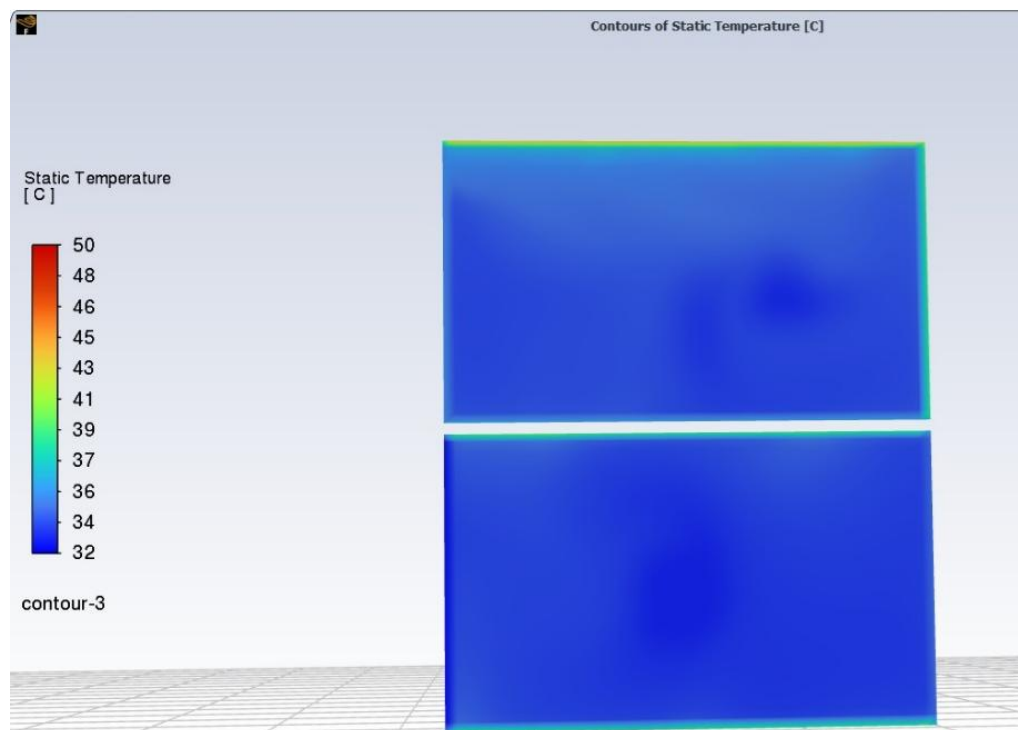


Figura 5. 16. Vista FRONTAL (Cuarto critico-SALA) del perfil de temperatura de la simulación BASE + Torre. 0.09m.

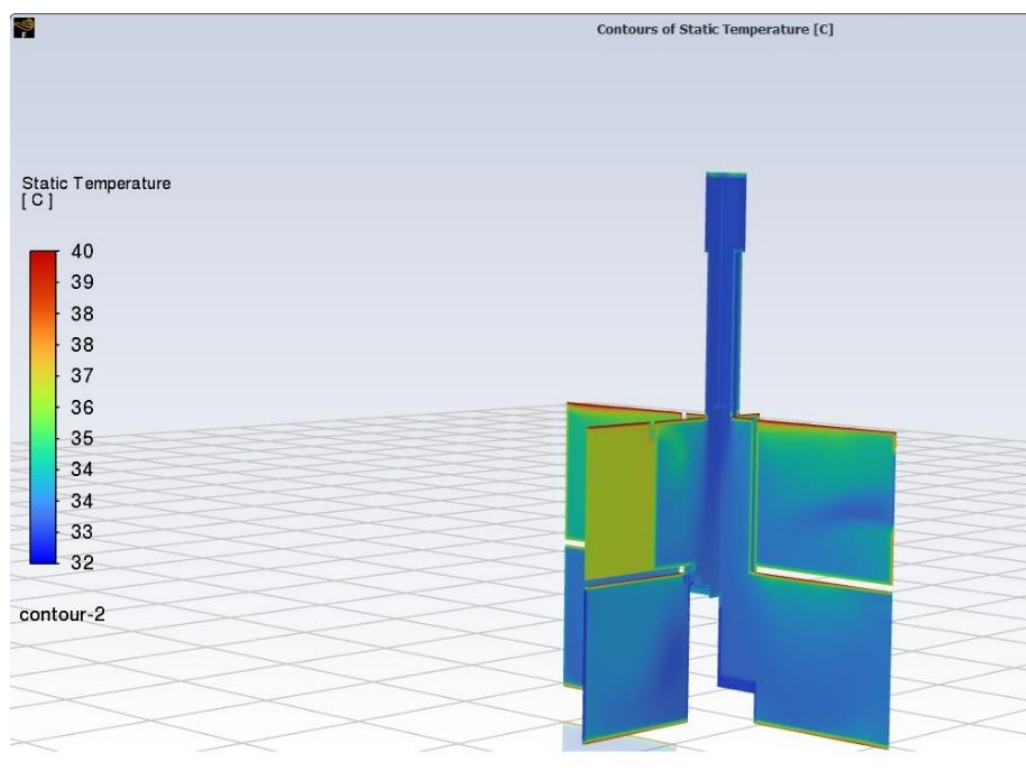


Figura 5. 17. CORTE (Cuarto critico-SALA- Escalera) de temperatura de la simulación BASE + Torre. 0.09m.

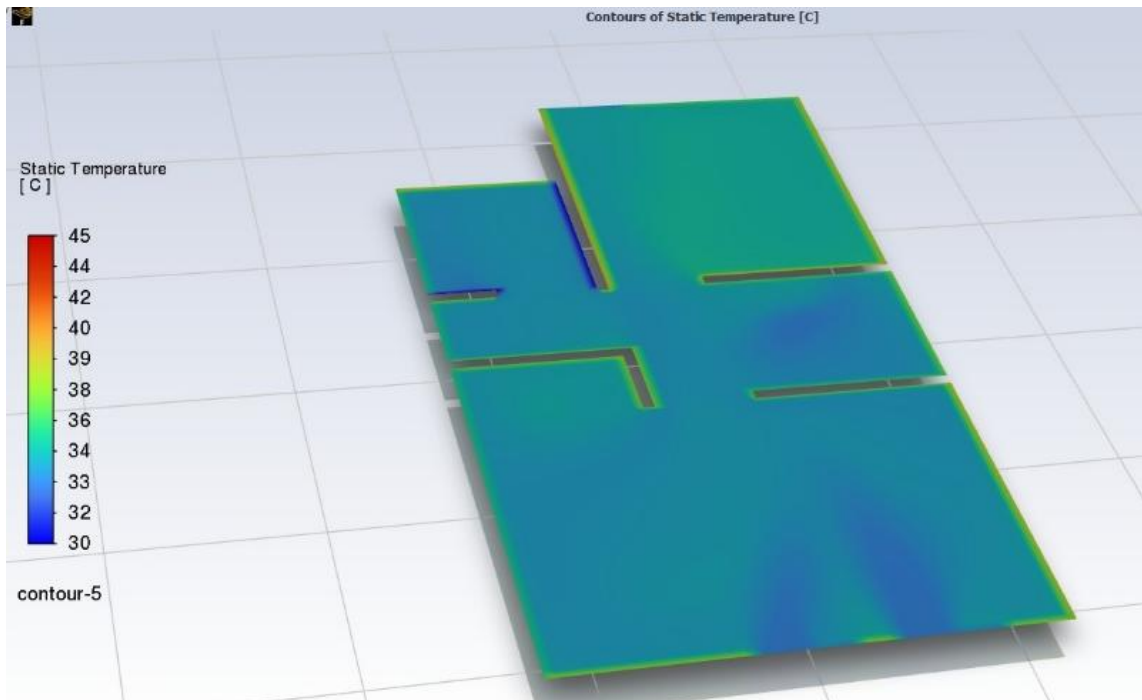


Figura 5. 18. CORTE medio PA. Temperatura de la simulación BASE + Torre de viento. 0.09m.

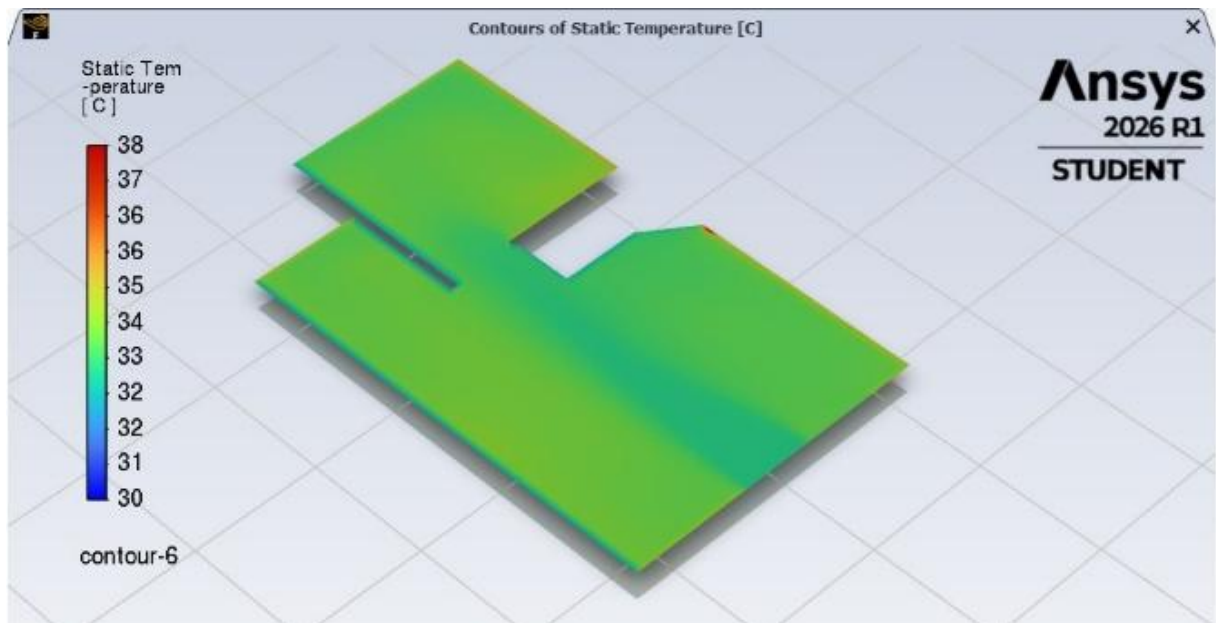


Figura 5. 19. CORTE medio PB. Temperatura de la simulación BASE + Torre de viento. 0.09m.

5.8.2 Campo de velocidad con torre

Las Figura 5. 20; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** presenta los contornos de magnitud de velocidad para el escenario con torre de viento. A diferencia del caso base, el flujo muestra una trayectoria más definida hacia el conducto vertical de la torre, con incrementos de velocidad localizados en la conexión entre los espacios interiores y el elemento de extracción.

El aumento de velocidad se concentra principalmente en la zona de la torre y en las (escaleras) región de comunicación vertical.

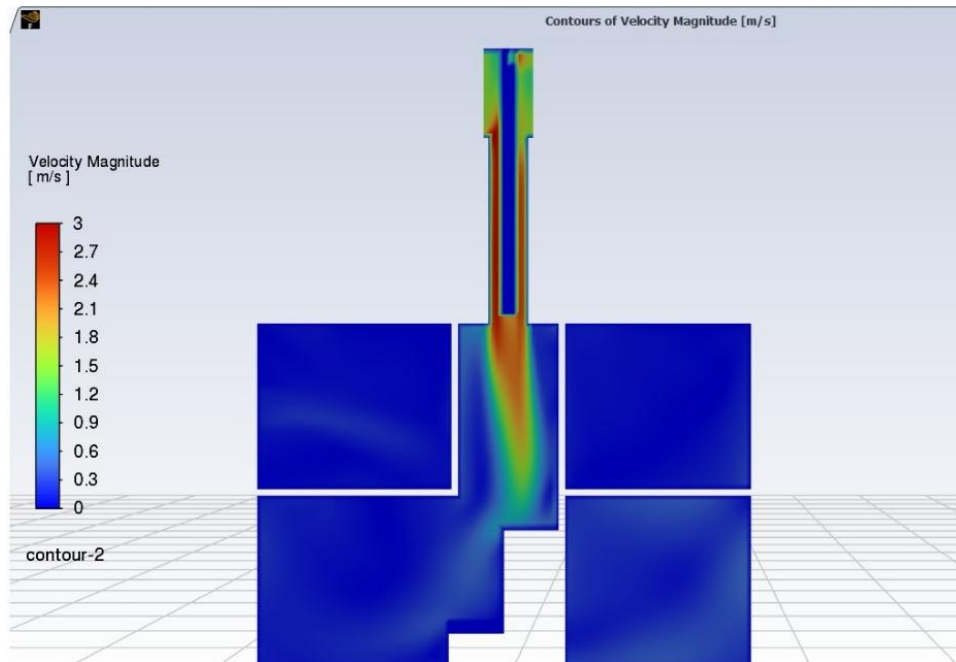


Figura 5. 20. CORTE medio PA-Escaleras. Muro ESTE . Velocidad de la simulación BASE + Torre. 0.09m

Esto indica que el sistema pasivo no genera una ventilación homogénea en todo el dominio, pero sí modifica la ruta del flujo y favorece el movimiento del aire hacia la parte superior. En términos físicos, la torre actúa como un elemento que organiza parcialmente la trayectoria del aire, especialmente en zonas donde el caso base presentaba baja renovación.

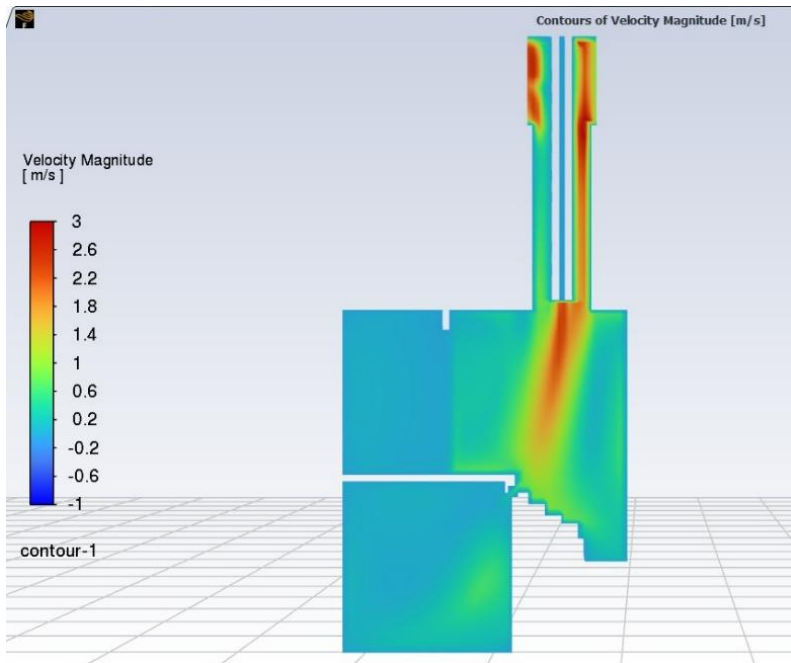


Figura 5. 21. CORTE medio PA-Escaleras . Velocidad de la simulación BASE + Torre. 0.09m

Las zonas alejadas de la trayectoria principal continúan presentando velocidades menores, por lo que la torre no elimina por completo las regiones de baja movilidad. Sin embargo, el cambio en el campo de velocidad ayuda a explicar la reducción térmica observada en planta alta.

5.8.3 Trayectorias de flujo y energía cinética turbulenta

Las líneas de trayectoria coloreadas por temperatura muestran que el aire caliente tiende a desplazarse hacia la región superior y hacia el conducto de la torre. Este comportamiento sugiere que el sistema favorece la extracción o redistribución del aire caliente acumulado, especialmente en las habitaciones de planta alta.

De manera complementaria, los contornos de energía cinética turbulenta muestran mayores valores en la zona de conexión con la torre y en regiones donde el flujo cambia de dirección. Esto indica mayor actividad de mezcla local, asociada al paso del aire por aberturas, escaleras y conducto vertical. No obstante, esta turbulencia se concentra en zonas específicas, por lo que el efecto de la torre debe interpretarse como una mejora localizada y no como una renovación uniforme de toda la vivienda.

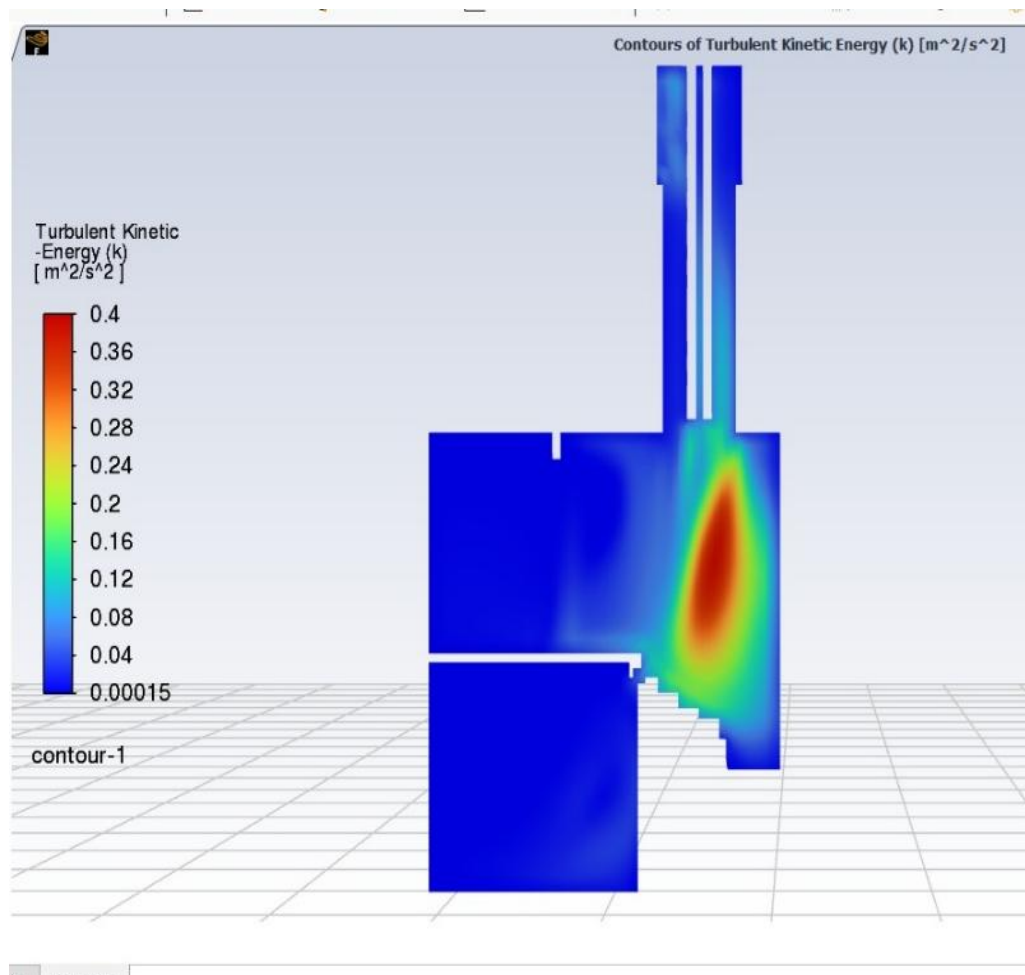


Figura 5. 22. CORTE medio PA. Turbulencia de la simulación BASE + Torre. 0.09m.

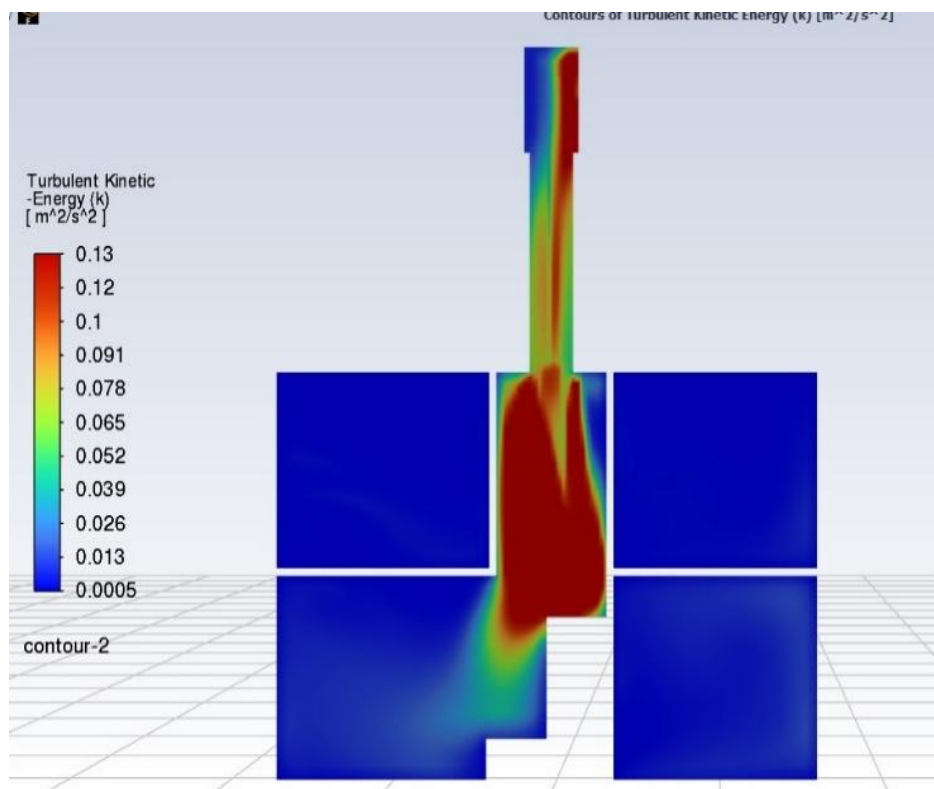


Figura 5. 23. Vista ESTE del perfil de Turbulencia de la simulación BASE + Torre , Malla 0.09.

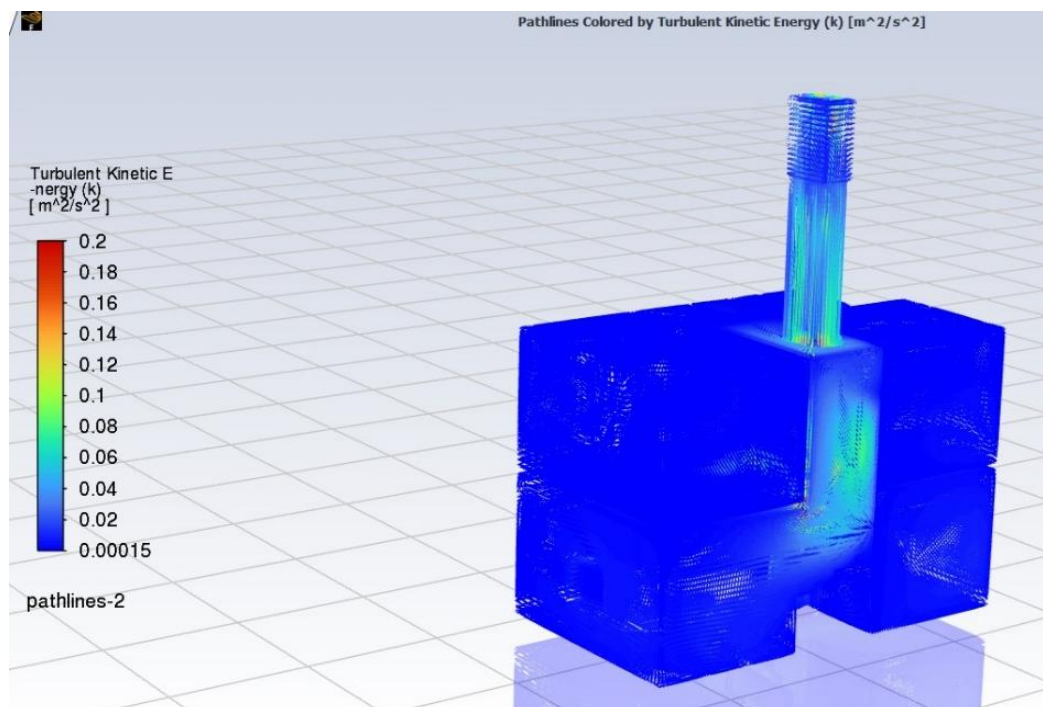


Figura 5. 24. Modelo isométrico de turbulencia del caso BASE + TORRE DE VIENTO.

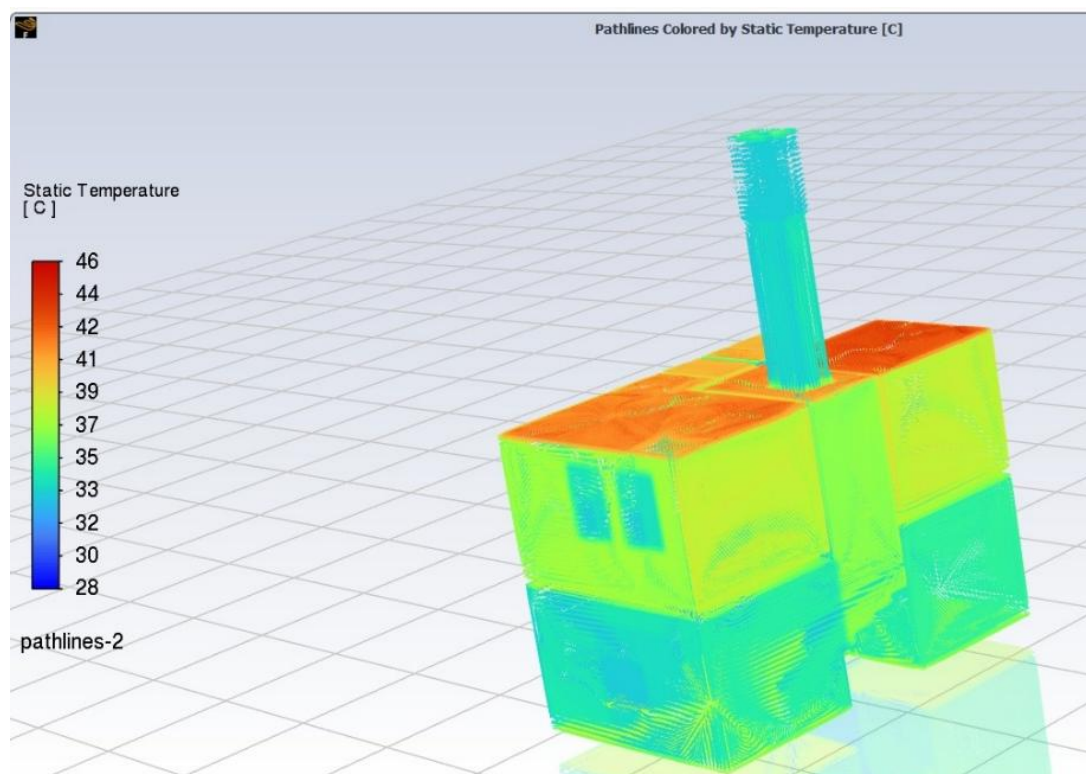


Figura 5. 25. Modelo isométrico de temperatura del caso BASE + TORRE DE VIENTO.

5.9 Alcances y limitaciones del sistema pasivo simulado

Después de comparar térmicamente el caso base y el escenario con torre de viento, se realizó una evaluación complementaria de confort térmico para determinar si la reducción de temperatura obtenida mediante CFD modifica la condición de habitabilidad del punto crítico. Esta evaluación no se limitó a la temperatura del aire, debido a que la sensación térmica de los ocupantes también depende de la temperatura media radiante, la velocidad del aire, la humedad relativa, la tasa metabólica y el aislamiento de la ropa.

Para este análisis se utilizó la herramienta CBE Thermal Comfort Tool, desarrollada por el Center for the Built Environment de la Universidad de California, Berkeley. Esta herramienta permite evaluar condiciones interiores con base en ASHRAE 55 y EN 16798-1, incorporando variables ambientales y personales. Su uso fue pertinente debido a que el caso estudiado presenta superficies interiores con elevada temperatura, por lo que la temperatura media radiante puede influir de manera importante en la sensación térmica del ocupante.

La evaluación se aplicó al punto crítico de planta alta, ya que este espacio presentó las mayores temperaturas en el caso base y la reducción térmica más significativa al incorporar la torre de viento. Para mantener coherencia comparativa, se analizaron dos escenarios bajo criterios equivalentes: caso base sin torre y caso base con torre de viento.

Las variables utilizadas para la evaluación de confort se obtuvieron a partir del monitoreo experimental, los resultados CFD y las condiciones de ocupación consideradas para el análisis. La temperatura del aire y la velocidad interior se tomaron de la simulación CFD; la humedad relativa se obtuvo del monitoreo higrotérmico; y la temperatura media radiante se estimó a partir de las temperaturas superficiales interiores disponibles.

5.9.1 Análisis Bajo estándar ASHRAE 55-2023

La reducción observada en la temperatura operativa indica que la torre de viento modificó favorablemente la condición térmica del punto crítico. Sin embargo, esta disminución no debe interpretarse de forma aislada como cumplimiento automático de confort. La evaluación mediante ASHRAE 55 requiere considerar la interacción entre variables ambientales y personales, especialmente la tasa metabólica y el aislamiento de ropa.

En el caso base sin torre, se utilizó una temperatura operativa de 39.15 °C, velocidad del aire de 0.21 m/s y humedad relativa de 27 %. Bajo estas condiciones, la herramienta indicó que el punto crítico no cumple con ASHRAE 55-2023. El valor de PMV fue de 2.72, correspondiente a una sensación térmica caliente, mientras que el PPD fue de 97 %. Estos valores confirman una condición de alta insatisfacción térmica para el ocupante.

En el escenario con torre de viento, Figura 5. 26, la temperatura operativa se redujo a 34.96 °C, la velocidad del aire aumentó a 0.37 m/s y la humedad relativa fue de 33.2 %. Con estos valores, la herramienta también indicó incumplimiento de ASHRAE 55-2023; sin embargo, el PMV disminuyó a 1.70 y el PPD se redujo a 62 %. Esto muestra que la torre mejora la condición térmica del punto crítico, aunque no es suficiente para alcanzar confort según el estándar.

ASHRAE 55 -CASO REAL	
$TEMPERATURA OPERATIVA = T_{op}$ $T_{op} = \frac{h_r T_r + h_c T_a}{h_r + h_c}$	39.15 °C
$T_r = \text{temperatura media radiante (MRT)}$ $T_{MRT} \approx \frac{\sum A_i T_{s,i}}{\sum A_i}$ donde: $A_i = \text{área de cada superficie}$ $T_{s,i} = \text{temperatura superficial interior}$ $T_a = \text{temperatura del aire}$ % HR Velocidad promedio aire $h_r = \text{coeficiente radiativo}$ $h_c = \text{coeficiente convectivo}$	39.08 °C
	39.2 °C
	27%
	0.21 m/s
	5. $\frac{82 W}{m^2 K}$
	2. $\frac{83 W}{m^2 K}$
ASHRAE 55 – SIMULADO BASE +TORRE DE VIENTO	
$TEMPERATURA OPERATIVA = T_{op}$ $T_{op} = \frac{h_r T_r + h_c T_a}{h_r + h_c}$	34.96 °C
$T_r = \text{temperatura media radiante (MRT)}$ $T_{MRT} \approx \frac{\sum A_i T_{s,i}}{\sum A_i}$ donde: $A_i = \text{área de cada superficie}$ $T_{s,i} = \text{temperatura superficial interior}$ $T_a = \text{temperatura del aire}$ % HR Velocidad promedio aire $h_r = \text{coeficiente radiativo}$ $h_c = \text{coeficiente convectivo}$	35.04 °C
	35.0
	33 %
	0.37 m/s
	5. $\frac{82 W}{m^2 K}$
	2. $\frac{83 W}{m^2 K}$

Tabla 5. 8.

variables necesarias para estimación de confort, mediante ASHRAE 55- CBE Thermal Comfort Tool.

Temperaturas y

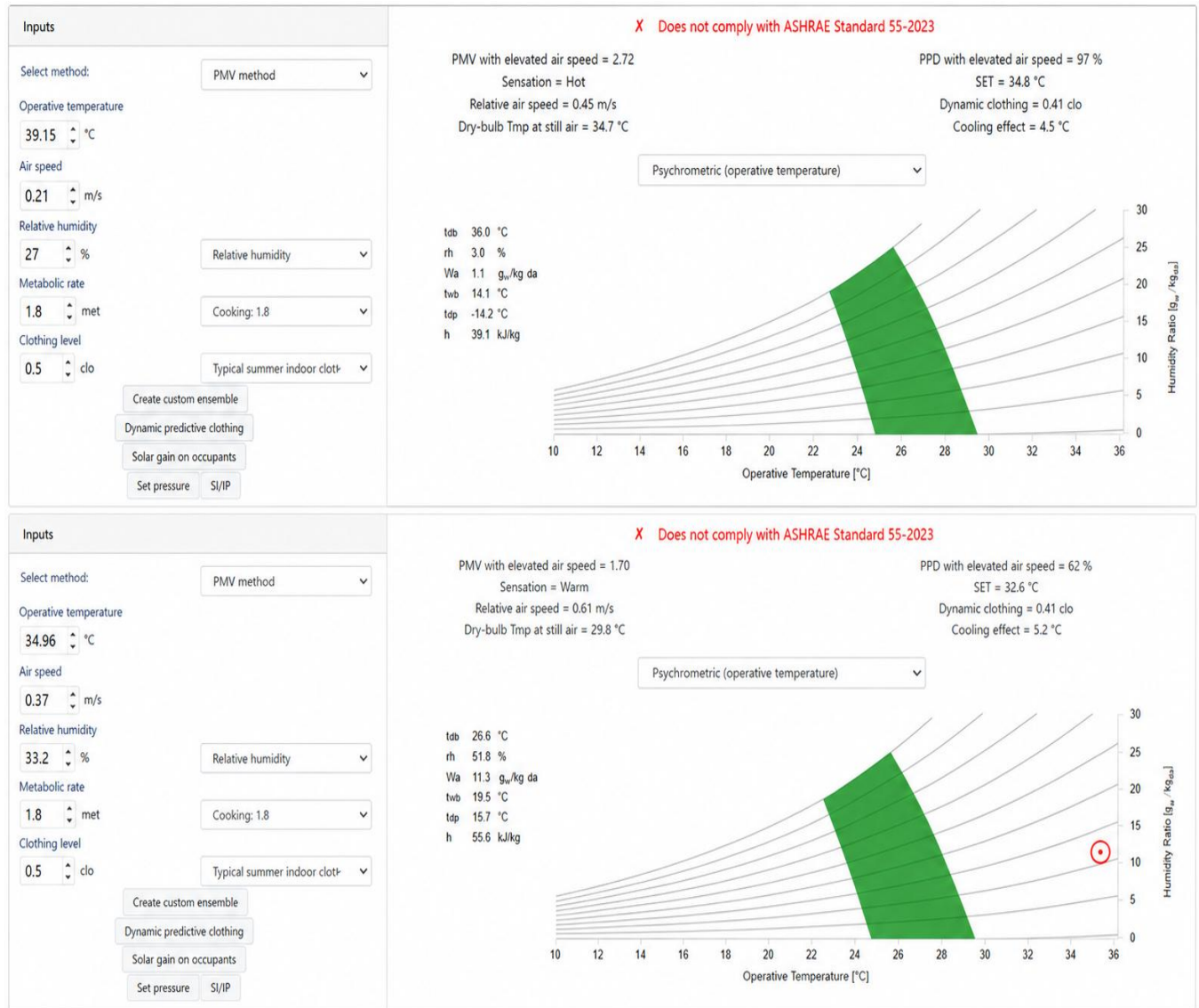


Figura 5. 26. Estimación de confort mediante CBE-Thermal Comfort Tool. 1) Estimación de caso BASE. 2) Estimación de BASE + Torre de viento.

5.9.2 Análisis de reducción térmica bajo criterios bioclimáticos: Carta de Givoni

Con el propósito de complementar la evaluación de confort realizada mediante ASHRAE 55-2023, los resultados del caso base y del escenario con torre de viento fueron proyectados sobre la carta bioclimática de Givoni. Este análisis permitió visualizar el desplazamiento psicrométrico producido por la reducción térmica obtenida en la simulación CFD y evaluar si dicha reducción modifica la condición bioclimática del punto crítico.

La proyección se realizó con base en el procedimiento desarrollado por Vázquez, Ch., H. et al. (2026), en el cual las condiciones higrotérmicas se representan mediante temperatura de bulbo seco y humedad específica para contrastar escenarios reales o simulados frente a zonas bioclimáticas de confort y estrategias pasivas. Este enfoque permitió complementar la lectura numérica de temperatura con una interpretación gráfica del comportamiento higrotérmico interior.

Carta bioclimática de Givoni para estaciones representativas de Morelos

Base de datos: INEGI / SEMARNAT

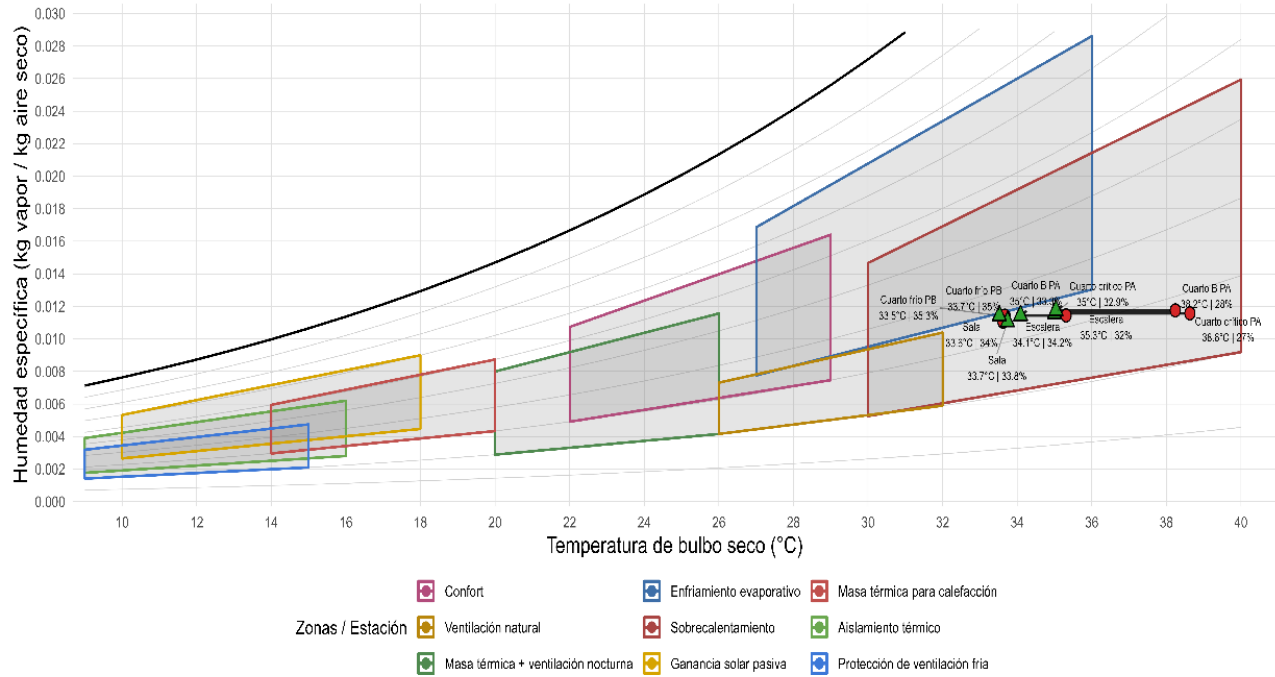
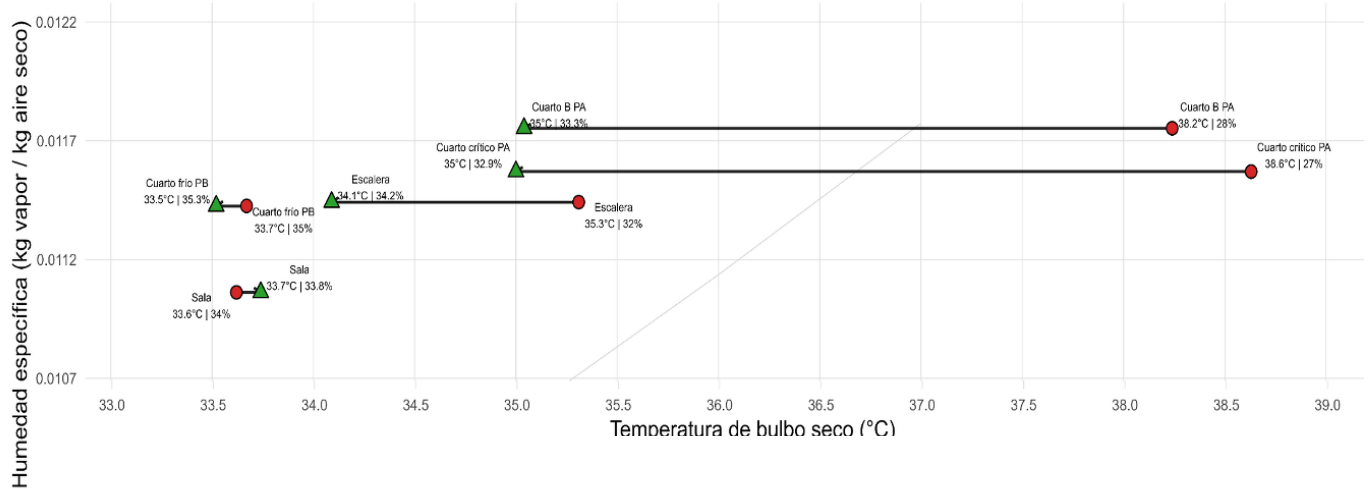


Figura 5. 27. Distribución de condiciones higrotérmicas del caso crítico de análisis, sin torre y con torre de viento

Zoom de desplazamiento psicrométrico CFD

Detalle de los puntos base y torre calibrada en la zona de sobrecalentamiento



Zona	T Base [°C]	HR Base [%]	T Torre [°C]	HR Torre [%]	ΔT [°C]	ΔHR [%]
Sala	33.62	34	33.74	33.77	-0.12	-0.23
Cuarto frío PB	33.67	35	33.52	35.29	0.15	0.29
Escalera	35.31	32	34.09	34.24	1.22	2.24
Cuarto crítico PA	38.63	27	35.00	32.91	3.63	5.91
Cuarto B PA	38.24	28	35.04	33.35	3.20	5.35

Figura 5. 28. Acercamiento de figura 5.27 - Comportamiento higrotérmicas Modelo BASE y Torre de viento.

Las Figura 5. 27Figura 5. 28, presenta la ubicación de los puntos CFD correspondientes al caso base y al escenario con torre de viento. Los puntos del caso base se localizaron en la zona de sobrecalentamiento, principalmente aquellos correspondientes al cuarto crítico de planta alta y al cuarto B de planta alta. Al incorporar la torre de viento, los puntos se desplazaron hacia menores temperaturas de bulbo seco, lo que refleja la reducción térmica observada previamente en la comparación CFD.

El desplazamiento más evidente se presentó en los espacios superiores. El cuarto crítico de planta alta pasó de aproximadamente 38.6 °C en el caso base a 35.0 °C en el escenario con torre. De manera similar, el cuarto B de planta alta disminuyó de aproximadamente 38.2 °C a 35.0 °C. La zona de escaleras también presentó una reducción, aunque de menor magnitud, al pasar de 35.3 °C a 34.1 °C. En planta baja, los cambios fueron más reducidos, lo cual coincide con la comparación térmica puntual entre escenarios.

Estos desplazamientos indican que la torre de viento modifica parcialmente el comportamiento térmico interior, principalmente en las zonas donde el caso base presentaba mayor acumulación de calor. Este cambio puede asociarse con una disminución parcial de la estratificación térmica, una modificación de las trayectorias internas de flujo y una posible remoción parcial del aire caliente acumulado en la planta alta.

No obstante, aunque los puntos con torre se desplazan hacia una condición menos severa que el caso base, no ingresan completamente a la zona de confort de la carta de Givoni. Por lo tanto, la estrategia pasiva simulada no debe interpretarse como una solución suficiente para alcanzar confort térmico bajo las condiciones analizadas. Su efecto se limita a reducir la severidad térmica y a modificar parcialmente el estado higrotérmico del punto crítico.

Esta lectura es consistente con la evaluación mediante CBE Thermal Comfort Tool bajo ASHRAE 55-2023, donde el escenario con torre redujo la temperatura operativa, el PMV y el PPD respecto al caso base, pero sin alcanzar cumplimiento normativo. En conjunto, ambos análisis muestran que la torre puede contribuir a reducir el sobrecalentamiento y alterar el patrón de flujo interior; sin embargo, para alcanzar condiciones de confort sería necesario complementar el sistema con estrategias orientadas a disminuir la carga térmica de la envolvente y mejorar la ventilación efectiva.

CAPÍTULO 6. DISCUSIONES DE RESULTADOS

6.1 Relación entre la capa límite atmosférica y el comportamiento térmico de la vivienda

Uno de los hallazgos más relevantes del presente trabajo fue identificar que el desempeño de la vivienda no puede interpretarse únicamente a partir de las condiciones térmicas exteriores o de las características geométricas aberturas para ingreso de aire. Los resultados experimentales mostraron que el comportamiento del sistema está condicionado por procesos que se originan a escalas superiores, particularmente dentro de la capa límite atmosférica urbana y su interacción con la rugosidad urbana.

El monitoreo mediante vehículo aéreo no tripulado permitió observar una marcada variabilidad de velocidad y dirección del viento en los primeros metros sobre el nivel del suelo. Esta condición evidenció la existencia de una zona de flujo altamente perturbado asociada a edificaciones, vegetación y obstáculos urbanos cercanos. En contraste, a mayores alturas el flujo presentó un comportamiento más uniforme y estable.

Desde una perspectiva física, esta diferencia implica que la vivienda opera dentro de una región donde la disponibilidad de viento útil se encuentra limitada por los efectos de la capa urbana rugosa. Como consecuencia, la energía cinética disponible para impulsar procesos de ventilación natural resulta considerablemente menor que la observada en regiones donde tradicionalmente se han desarrollado y aplicado torres de viento.

Estos resultados sugieren que la respuesta térmica del sistema estudiado no depende exclusivamente del diseño arquitectónico de la torre, sino también de la capacidad del entorno atmosférico para suministrar viento aprovechable. En este sentido, la capa límite atmosférica emerge como un elemento condicionante del desempeño pasivo de la vivienda.

6.2 Influencia de la envolvente en la acumulación térmica interior

Los resultados experimentales mostraron que las mayores temperaturas superficiales se localizaron en la cubierta y en los elementos más expuestos a la radiación solar directa. La termografía infrarroja permitió identificar temperaturas superficiales superiores a 60 °C durante los periodos de máxima carga térmica, evidenciando una importante capacidad de almacenamiento energético de la envolvente.

La memoria de carga térmica indicó que gran parte de la energía que ingresa al recinto se encuentra asociada al intercambio de calor entre las superficies interiores y el aire del espacio habitable. Este comportamiento explica por qué las temperaturas interiores permanecen elevadas incluso después de que disminuye la radiación solar incidente.

Bajo estas condiciones, la problemática térmica observada no puede atribuirse únicamente a una falta de ventilación. El sistema presenta simultáneamente una elevada carga térmica interna originada por la envolvente y una disponibilidad limitada de mecanismos naturales para remover dicha energía.

En consecuencia, la temperatura interior observada durante el monitoreo representa la interacción entre almacenamiento térmico, transferencia de calor superficial y ventilación disponible, más que el efecto aislado de cualquiera de estos fenómenos.

6.3 Interpretación física del efecto de la torre de viento

La simulación CFD permitió analizar la respuesta del flujo interior al incorporar una torre de viento bajo condiciones derivadas del monitoreo experimental.

Los resultados mostraron una reducción de temperatura principalmente en las zonas superiores de la vivienda, donde previamente se identificaron los mayores niveles de acumulación térmica. Este comportamiento sugiere que la torre modifica parcialmente las trayectorias internas del flujo, favoreciendo procesos de mezcla y remoción de aire caliente acumulado.

Sin embargo, la magnitud de la reducción obtenida fue menor a la reportada en numerosos estudios desarrollados en regiones áridas y semiáridas del Medio Oriente. Esta diferencia resulta consistente con las condiciones de viento disponibles en cada contexto. Mientras diversos trabajos internacionales analizan velocidades exteriores significativamente mayores, el presente estudio se desarrolló bajo condiciones reales de una vivienda inmersa en un entorno urbano que limita el acceso a corrientes de aire más energéticas.

Por lo tanto, los resultados obtenidos no indican una falla de la tecnología, sino una respuesta coherente con las condiciones atmosféricas y urbanas donde se pretende implementar.

Esta observación es particularmente relevante debido a que evidencia la necesidad de contextualizar el desempeño de las torres de viento en función del clima, la rugosidad urbana y la disponibilidad real de viento, evitando extrapolar directamente resultados obtenidos en otras regiones climáticas.

6.4 Alcances reales de la estrategia pasiva evaluada

Tanto la evaluación mediante ASHRAE 55 como la interpretación bioclimática basada en la carta de Givoni mostraron que la incorporación de la torre de viento modifica la condición térmica interior, desplazando los puntos analizados hacia escenarios menos severos. No obstante, los resultados también evidenciaron que dicha reducción no fue suficiente para alcanzar condiciones de confort bajo los criterios considerados.

Este hallazgo permite distinguir dos aspectos diferentes. El primero corresponde a la capacidad de la torre para generar cambios medibles en el comportamiento térmico interior. El segundo corresponde a la magnitud de dichos cambios frente a una carga térmica elevada originada por la envolvente y por las condiciones climáticas del sitio.

Bajo esta perspectiva, la estrategia evaluada debe interpretarse como un mecanismo de mitigación térmica y no necesariamente como una solución única de confort. Su principal aportación consiste en reducir parcialmente la severidad térmica del espacio habitable y modificar el patrón de circulación del aire interior.

La evidencia obtenida indica que alcanzar condiciones de confort requeriría una intervención más amplia sobre el sistema edificio-entorno, incorporando medidas destinadas a disminuir las ganancias térmicas de la envolvente, considerar las mejoras o rediseños de sistemas pasivos para aumentar la captación y distribución del viento y mejorar la eficiencia de la ventilación natural disponible.

6.5 Implicaciones para vivienda social en clima cálido subhúmedo

Los resultados obtenidos poseen implicaciones relevantes para la aplicación de estrategias pasivas en vivienda social localizada en regiones cálidas de México.

Con frecuencia, las soluciones pasivas son evaluadas a partir de su desempeño teórico o mediante experiencias desarrolladas en contextos climáticos distintos. Sin embargo, los hallazgos del presente trabajo muestran que el comportamiento real de estas tecnologías depende de la interacción entre clima local, características urbanas, envolvente constructiva y disponibilidad de viento.

Desde esta perspectiva, la incorporación de torres de viento en vivienda social no debería analizarse como una estrategia aislada, sino como parte de un conjunto de medidas complementarias orientadas a reducir la carga térmica total del edificio.

La reducción de ganancias solares en cubierta y muros, el uso de materiales con mejor desempeño térmico, la incorporación de aislamiento, el aprovechamiento de ventilación nocturna y la optimización de aperturas podrían incrementar significativamente la efectividad de sistemas pasivos basados en ventilación natural.

En consecuencia, el desempeño observado en este estudio refuerza la necesidad de adoptar enfoques integrales que consideren simultáneamente la envolvente, el microclima y la ventilación como componentes de un mismo sistema energético.

6.6 Síntesis general de la discusión

La evidencia experimental y numérica obtenida permitió establecer que el comportamiento térmico de la vivienda es resultado de un fenómeno multiescala que inicia en la capa límite atmosférica, continúa con la interacción del flujo con la rugosidad urbana y finalmente se manifiesta mediante procesos de acumulación térmica y ventilación en el interior del edificio.

Dentro de este sistema, la torre de viento mostró capacidad para modificar parcialmente el flujo interno y reducir la severidad térmica de los espacios más afectados por el sobrecalentamiento. Sin embargo, su desempeño estuvo condicionado por la disponibilidad real de viento y por la elevada carga térmica impuesta por la envolvente.

Por ello, los resultados sugieren que las torres de viento mantienen potencial como estrategia pasiva de acondicionamiento ambiental, aunque su aplicación en climas cálidos subhúmedos debe evaluarse considerando las condiciones específicas del entorno urbano y su integración con otras medidas de control térmico. Esta interpretación permite vincular los resultados experimentales, bioclimáticos y numéricos obtenidos a lo largo de la investigación, y proporciona la base para las conclusiones generales presentadas en el capítulo siguiente.

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 Conclusiones generales

SOBRE LA CAPA LÍMITE Y EL VIENTO DISPONIBLE

La capa límite atmosférica influye mediante más de un mecanismo a los sistemas de ventilación natural. No solo reduce o incrementa la velocidad del viento sino también modifica la dirección, la estabilidad del flujo, su perfil vertical y su frecuencia.

Los resultados del monitoreo corroboran las limitaciones de la modelación CFD, cuando se consideran condiciones de frontera idealizadas. Por ejemplo, simulaciones con viento constante y dirección normal a las ventanas.

Durante la noche se presentó el mayor desacoplamiento direccional entre niveles. La dirección media fue aproximadamente 140.5° sureste a 11 m, 246.1° oeste-suroeste a 4.5 m y 115.9° sureste a 1.2 m. Esto significa que la torre y las ventanas pueden recibir flujos provenientes de sectores muy diferentes en relación a la rosa de los vientos.

Los resultados de los monitoreos de perfil de viento respecto a la altura no replican el comportamiento idealizado de perfiles logarítmicos.

La corrección por altura puede estimar cambios medios de magnitud, pero no reproduce la rotación direccional, las calmas, las estelas ni el desacoplamiento entre niveles observado experimentalmente.

A 11 m se identificaron tres condiciones promedio claramente diferenciados: una condición de viento débil con velocidad media de 0.67 m/s a las 7:00 am, otra de mayor intensidad con 2.10 m/s a las 2:00 pm y una condición intermedia con 1.47 m/s a las 7 pm.

A 11 m, la dirección media fue aproximadamente 52.3° noreste; a 4.5 y 1.2 m, fue cercana a 166° sursureste. Es decir, el flujo rotó alrededor de 114° entre la altura de la torre y los niveles inferiores. No existe una única condición de viento representativa del sitio. La disponibilidad del viento cambia significativamente durante el ciclo diario. Por lo cual el dispositivo de torre de viento de 4 ventanas es el adecuado para el área estudiada.

SOBRE LA TORRE DE VIENTO

La torre redujo la temperatura de la habitación crítica en 3.63 °C y la de la habitación secundaria de planta alta en 3.2 °C.

La temperatura operativa del punto crítico disminuyó de 39.15 a 34.96 °C; sin embargo, esto no fue suficiente para lograr confort térmico.

El PMV disminuyó de +2.72 a +1.70 y el PPD de 97 a 62 %. La torre redujo la severidad térmica, pero todavía dejó a la mayoría de los ocupantes potencialmente insatisfechos.

El desempeño calculado corresponde a una condición CFD estacionaria, con viento constante y dirección favorable. No representa las calmas, cambios de dirección ni la intermitencia observada mediante UAV.

La torre no debe descartarse como dispositivo de ventilación, pero tampoco puede considerarse una solución autónoma de enfriamiento para el caso analizado.

SOBRE LA RESPUESTA TÉRMICA DE LA VIVIENDA

La cubierta alcanzó temperaturas superficiales exteriores superiores a 60 °C y aproximadamente 46 °C en su superficie interior durante la condición crítica; por tanto, constituyó la principal fuente de calor en la planta alta.

El sobrecalentamiento interior no fue una percepción aislada. El cuarto crítico alcanzó una temperatura media de 39.4 °C, mientras que el medio ambiente exterior presentó un máximo de 36.2 °C, evidenciando acumulación de energía dentro de la vivienda, a las 7 pm.

La envolvente presentó una respuesta térmica desacoplada del ambiente exterior: se identificó un desfase aproximado de 4 h y una liberación diferida de calor que prolongó el discomfort hacia la tarde y la noche.

La carga sensible estimada para mantener el recinto en la condición de referencia fue de aproximadamente 6,499.56 W, en el cuarto crítico, dominada por la envolvente y especialmente por la cubierta.

SOBRE ESTRATIFICACIÓN E HIGROTHERMIA

Se detectó el fenómeno de estratificación térmica. La planta alta presentó una diferencia media aproximada de 1.90 °C respecto a la planta baja y máximos superiores a 4 °C durante la tarde.

La humedad relativa de la planta alta fue, en promedio, aproximadamente 3.86 puntos porcentuales menor que en la planta baja, mostrando una condición simultánea de mayor temperatura y menor humedad relativa.

Las correlaciones entre temperatura y humedad relativa fueron negativas, con valores entre $r = -0.42$ y -0.59 . La menor correlación de los espacios interiores respecto al exterior del Domicio evidencia el almacenamiento térmico y el desacoplamiento parcial provocado por la envolvente.

SOBRE EL ENFOQUE METODOLÓGICO

La integración de UAV, monitoreo higrotérmico, termografía cuantitativa, carta de Givoni, balance térmico y CFD permitió reducir la idealización habitual de las condiciones de frontera.

La termografía permitió representar la temperatura promedio de cada superficie completa, en lugar de asumir una única temperatura puntual o utilizar exclusivamente valores normativos.

De manera general, los resultados demuestran que el comportamiento térmico de la vivienda constituye un fenómeno multiescala que inicia en la atmósfera, continúa con la interacción del flujo con la rugosidad urbana y culmina en procesos de transferencia de calor y ventilación dentro del recinto. Esta visión integral representa la principal conclusión científica del presente trabajo.

7.2 Aportaciones científicas

Las principales aportaciones derivadas de esta investigación son las siguientes:

Se desarrolló una metodología multiescala que integra monitoreo ambiental, caracterización térmica, análisis bioclimático, mediciones mediante UAV y modelación CFD para evaluar sistemas pasivos de ventilación natural.

Se generó evidencia experimental sobre la influencia de la capa límite atmosférica y la rugosidad urbana en la disponibilidad de viento útil para aplicaciones de ventilación pasiva en vivienda.

Se documentó el comportamiento higrotérmico de una vivienda social en clima cálido subhúmedo mediante monitoreo continuo, análisis psicrométrico y termografía infrarroja cuantitativa.

Se estableció una relación física entre disponibilidad de viento, acumulación térmica de la envolvente y desempeño de una torre de viento bajo condiciones reales de operación.

Se demostró que la evaluación de tecnologías pasivas requiere considerar simultáneamente procesos atmosféricos, urbanos y constructivos, evitando interpretar el desempeño únicamente desde la escala del edificio.

Se generó una base experimental y numérica que puede utilizarse para futuras investigaciones orientadas al diseño de estrategias pasivas adaptadas a climas cálidos de México.

7.3 Limitaciones del estudio

El presente trabajo presenta algunas limitaciones que deben considerarse para la interpretación de los resultados.

La investigación se desarrolló en una vivienda específica ubicada en un contexto urbano particular, por lo que los resultados obtenidos no deben extrapolarse de forma directa a otros entornos climáticos o urbanos.

La estructura arquitectónica mostraba una apertura de domo de un tamaño ya establecido por lo que la geometría de la torre debió ajustarse a dicha abertura.

El monitoreo atmosférico mediante UAV estuvo limitado a alturas y periodos de vuelo compatibles con las condiciones operativas, técnicas y normativas aplicables.

7.4 Recomendaciones a trabajos futuros

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda que futuras investigaciones analicen con mayor detalle el comportamiento térmico estacional de la envolvente. El monitoreo durante distintas épocas del año permitiría identificar la acumulación energética, el retardo térmico, la velocidad de enfriamiento nocturno y la recuperación higrotérmica de la vivienda bajo condiciones reales de operación.

También se recomienda profundizar en el monitoreo nocturno, ya que este periodo puede ser clave para la descarga térmica de muros, techo y piso mediante ventilación natural. Para ello, resulta necesario caracterizar simultáneamente temperatura superficial, temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento.

Asimismo, se considera importante mantener el uso de UAV para caracterizar el viento local a diferentes alturas, debido a que los resultados mostraron que el flujo disponible cerca de la vivienda puede diferir de los valores meteorológicos generales.

Otra línea futura consiste en evaluar modificaciones controladas de la envolvente mediante recubrimientos reflectivos, aislamiento ligero o materiales avanzados. Esto permitiría analizar si la reducción de carga térmica mejora la efectividad de la ventilación natural y acerca el ambiente interior a condiciones de equilibrio con el exterior.

También se recomienda incorporar el monitoreo de la calidad de las renovaciones de aire dentro del recinto. Además de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire, futuros estudios podrían considerar el uso de indicadores ambientales y de partículas, edad media del aire, tasa de renovación, eficiencia de ventilación o trazadores de intercambio de aire. Esto permitiría evaluar no solo si existe movimiento de aire, sino si dicho movimiento realmente mejora la renovación interior, la extracción de aire caliente y la calidad ambiental del espacio habitado.

En climas cálidos y zonas urbanas, el aire disponible para ventilar puede encontrarse a temperaturas elevadas debido al efecto de isla de calor urbana, la radiación acumulada en superficies pavimentadas. Se propone desarrollar estudios futuros orientados a la generación de microclimas exteriores más favorables alrededor de la vivienda. La incorporación de vegetación, árboles, superficies permeables, zonas sombreadas y elementos que favorezcan la retención de humedad relativa podría contribuir a reducir la temperatura del aire cercano, disminuir la radiación incidente sobre muros y cubierta, y reducir la carga térmica absorbida por la envolvente. Este enfoque permitiría a cualquier sistema de ventilación pasiva trabajar con aire exterior térmicamente más favorable, en lugar de introducir aire caliente proveniente de un entorno urbano sobrecalentado.

Finalmente, se recomienda estudiar tecnologías complementarias a la ventilación natural, sin perder el principio pasivo del sistema. La incorporación de humidificación, aspersión, filtros, mallas o elementos auxiliares deberá evaluarse cuidadosamente, ya que puede modificar la humedad interior, reducir el flujo disponible o generar nuevas problemáticas de operación y mantenimiento.

REFERENCIAS

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. *Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- [2] United Nations Environment Programme. (2024). *Global Status Report for Buildings and Construction: Beyond foundations: Mainstreaming sustainable solutions to cut emissions from the buildings sector*. United Nations Environment Programme.
- [3] International Energy Agency. (2022). The global energy crisis. In *World energy outlook 2022*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022/the-global-energy-crisis>
- [4] Pérez-Lombard, L., Ortiz, J., & Pout, C. (2008). A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings*, 40(3), 394-398. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>
- [5] Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203407219>
- [6] Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review of turbulence, exchanges of energy and water, and the urban heat island. *International Journal of Climatology*, 23(1), 1-26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- [7] Oke, T. R. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1-24. <https://doi.org/10.1002/qj.49710845502>
- [8] Santamouris, M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat island- A review of the actual developments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 26, 224-240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.05.047>
- [9] Velasco, E., & Roth, M. (2010). Cities as net sources of CO₂: Review of atmospheric CO₂ exchange in urban environments measured by eddy covariance techniques. *Geography Compass*, 4(9), 1238-1259. <https://doi.org/10.1111/j.1749-8198.2010.00384.x>
- [10] Santamouris, M. (2015). Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions. *Science of the Total Environment*, 512-513, 582-598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>
- [11] Givoni, B. (1998). *Climate considerations in building and urban design*. Van Nostrand Reinhold.
- [12] Olgyay, V. (2015). *Design with climate: Bioclimatic approach to architectural regionalism* (Updated ed.). Princeton University Press.
- [13] Nicol, J. F., & Humphreys, M. A. (2002). Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. *Energy and Buildings*, 34(6), 563-572. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00006-3)
- [14] de Dear, R. J., & Brager, G. S. (2002). Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. *Energy and Buildings*, 34(6), 549-561. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00005-1](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00005-1)
- [15] ASHRAE. (2021). 2021 ASHRAE Handbook-Fundamentals (SI ed.). ASHRAE.
- [16] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6th ed.). Wiley.
- [17] Akbari, H., Pomerantz, M., & Taha, H. (2001). Cool surfaces and shade trees to reduce energy use and improve air quality in urban areas. *Solar Energy*, 70(3), 295-310. [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(00\)00089-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(00)00089-X)
- [18] Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions. *Energy and Buildings*, 39(11), 1167-1174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>

- [19] World Health Organization. (2021). *Heat and health*. World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/climate-change-heat-and-health>
- [20] Awbi, H. B. (2003). *Ventilation of buildings* (2nd ed.). Spon Press. <https://doi.org/10.4324/9780203634479>
- [21] Linden, P. F. (1999). The fluid mechanics of natural ventilation. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 31, 201-238. <https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.31.1.201>
- [22] Etheridge, D. (2012). *Natural ventilation of buildings: Theory, measurement and design*. John Wiley & Sons.
- [23] Bahadori, M. N. (1985). An improved design of wind towers for natural ventilation and passive cooling. *Solar Energy*, 35(2), 119-129. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(85\)90002-7](https://doi.org/10.1016/0038-092X(85)90002-7)
- [24] Calautit, J. K., & Hughes, B. R. (2014). Measurement and prediction of the indoor airflow in a room ventilated with a commercial wind tower. *Energy and Buildings*, 84, 367-377. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.08.015>
- [25] Calautit, J. K., & Hughes, B. R. (2014). Wind tunnel and CFD study of the natural ventilation performance of a commercial multi-directional wind tower. *Building and Environment*, 80, 71-83. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.05.022>
- [26] Li, J., Calautit, J., Jimenez-Bescos, C., Song, W., Riffat, S., & Chen, Q. (2025). Climate-adaptive windcatcher natural ventilation integrated with passive and low-energy technologies: A review of current and future developments. *Building and Environment*, 284, 113436. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113436>
- [27] Reyes Herrera, V. A. (2015). Determinación de la capacidad de las torres de viento para producir confort térmico en el interior de edificaciones de zonas áridas y semiáridas de México [Tesis doctoral, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico].
- [28] Carreto Hernández, L. G. (2023). Estudios de convección natural y forzada en un sistema caseta-torre de viento sin/con humidificación [Tesis doctoral, Tecnológico Nacional de México/CENIDET]. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5589>
- [29] Morales Morales, X. (2025). Determinación teórica-experimental del efecto de la humidificación del aire en una torre de viento para satisfacer condiciones de confort térmico en casas de Monterrey N.L. mediante enfriamiento evaporativo [Tesis doctoral, Tecnológico Nacional de México/CENIDET]. Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/10840>
- [30] Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3027-8>
- [31] Garratt, J. R. (1992). *The atmospheric boundary layer*. Cambridge University Press.
- [32] Grimmond, C. S. B., & Oke, T. R. (1999). Aerodynamic properties of urban areas derived from analysis of surface form. *Journal of Applied Meteorology*, 38(9), 1262-1292. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1999\)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1999)038<1262:APOUAD>2.0.CO;2)
- [33] Barlow, J. F. (2014). Progress in observing and modelling the urban boundary layer. *Urban Climate*, 10, 216-240. <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2014.03.011>
- [34] Maldague, X. P. V. (2001). *Theory and practice of infrared technology for nondestructive testing*. Wiley-Interscience.
- [35] Morón, C., Saiz, P., Ferrández, D., & Felices, R. (2018). Comparative analysis of infrared thermography and CFD modelling for assessing the thermal performance of buildings. *Energies*, 11(3), 638. <https://doi.org/10.3390/en11030638>
- [36] Patankar, S. V. (1980). *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing.
- [37] Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method* (2nd ed.). Pearson Education.
- [38] Chen, Q. (1995). Comparison of different k-epsilon models for indoor air flow computations. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 28(3), 353-369. <https://doi.org/10.1080/10407799508928838>

- [39] Ansys, Inc. (2024a). *Ansys Fluent Theory Guide*. Ansys, Inc.
- [40] Ansys, Inc. (2024b). *Ansys Fluent User's Guide*. Ansys, Inc.
- [41] International Energy Agency. (2018). The future of cooling: Opportunities for energy-efficient air conditioning. *International Energy Agency*.
- [42] Statista. (2023, July 12). Demanda energética global asociada al acondicionamiento térmico de edificaciones [Datos de International Energy Agency]. Statista.
- [43] Lemmen, D. S., & Warren, F. J. (Eds.). (2004). Climate change impacts and adaptation: A Canadian perspective. Government of Canada.
- [44] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2013). Continuo Nacional del Conjunto de Datos Geográficos de la Carta de Climas, escala 1:1 000 000, serie I. INEGI.
- [45] CINPRO. (s. f.). Tipo de clima en el estado de Morelos: Base histórica con información de INEGI (2013) [Mapa]. CINPRO.
- [46] Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). Atmospheric science: An introductory survey (2nd ed.). *Elsevier Academic Press*.
- [47] Arya, S. P. (2001). Introduction to micrometeorology (2nd ed.). *Academic Press*.
- [48] World Meteorological Organization. (2008). Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8; 7th ed.). *World Meteorological Organization*.
- [49] ASHRAE. (2023). ANSI/ASHRAE Standard 55-2023: Thermal environmental conditions for human occupancy. ASHRAE.
- [50] Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and Buildings*, 18(1), 11-23. [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)
- [51] de Dear, R. J., & Brager, G. S. (1998). Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. *ASHRAE Transactions*, 104(1), 145-167.
- [53] International Organization for Standardization. (2025). ISO 7726:2025: Ergonomics of the thermal environment - Instruments for measuring and monitoring physical quantities. *International Organization for Standardization*.
- [54] Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2018). Fundamentals of engineering thermodynamics (9th ed.). *Wiley*.
- [55] Chartered Institution of Building Services Engineers. (2013). The limits of thermal comfort: Avoiding overheating in European buildings (TM52). *CIBSE*. <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/tm52-the-limits-of-thermal-comfort-avoiding-overheating-in-european-buildings>
- [56] Chartered Institution of Building Services Engineers. (2015). CIBSE Guide A: Environmental design (8th ed.). *CIBSE*. <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/guide-a-environmental-design-2015-updated-2021-pdf/>
- [57] Chartered Institution of Building Services Engineers. (2017). Design methodology for the assessment of overheating risk in homes (TM59). *CIBSE*.
- [59] Bastide, A., Lauret, P., Garde, F., & Boyer, H. (2006). Building energy efficiency and thermal comfort in tropical climates: Presentation of a numerical approach for predicting the percentage of well-ventilated living spaces in buildings using natural ventilation. *Energy and Buildings*, 38(9), 1093-1103. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2005.12.005>
- [60] Etheridge, D. W., & Sandberg, M. (1996). Building ventilation: Theory and measurement. *John Wiley & Sons*.
- [61] ASTM International. (2023). ASTM C805/C805M-23: Standard test method for rebound number of hardened concrete. ASTM International.
- [62] Meola, C., & Carlomagno, G. M. (2004). Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology*, 15(9), R27-R58. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/9/R01>
- [63] Usamentiaga, R., Venegas, P., Guerediaga, J., Vega, L., Molleda, J., & Bulnes, F. G. (2014). Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing. *Sensors*, 14(7), 12305-12348. <https://doi.org/10.3390/s140712305>

- [64] Vollmer, M., & Möllmann, K.-P. (2018). Infrared thermal imaging: Fundamentals, research and applications (2nd ed.). Wiley-VCH.
- [65] International Organization for Standardization. (2023). ISO 6781-1:2023: Performance of buildings - Detection of heat, air and moisture irregularities in buildings by infrared methods - Part 1: General procedures. International Organization for Standardization.
- [66] ASTM International. (2023). ASTM C1060-23: Standard practice for thermographic inspection of insulation installations in envelope cavities of frame buildings. ASTM International.
- [67] Teledyne FLIR. (2023). FLIR Ex series: User's manual. Teledyne FLIR.
- [68] Li, H., Feng, G., Pu, Y., & Wang, H. (2024). Assessing the application effects and operating conditions on three different insulation capacity walls using internal quantitative infrared thermography in China. *Buildings*, 14(12), 3727. <https://doi.org/10.3390/buildings14123727>
- [69] Ruiz Torres, R. P., Castañeda Nolasco, G., González García, E., & Godínez Domínguez, E. A. (2019). Evaluación por termografía infrarroja de componentes prefabricados no convencionales para techo en clima cálido subhúmedo. *Academia XXII*, 10(20), 107-120. <https://doi.org/10.22201/fa.2007252Xp.2019.20.72316> & Jupp, P. E. (2000). Directional statistics. John Wiley & Sons.
- [76] Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences (3rd ed.). Academic Press.
- [77] Pearson, K. (1895). Notes on regression and inheritance in the case of two parents. *Proceedings of the Royal Society of London*, 58, 240-242.
- [78] Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2014). Applied statistics and probability for engineers (6th ed.). Wiley.
- [79] Rothfusz, L. P. (1990). The heat index equation (or, more than you ever wanted to know about heat index) (Technical Attachment SR 90-23). National Weather Service.
- [80] National Weather Service. (2023). What is the heat index? National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.weather.gov/ama/heatindex>
- [81] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- [82] Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (2013). Principles of environmental physics: Plants, animals, and the atmosphere (4th ed.). Academic Press.
- [83] Vellei, M., Herrera, M., Fosas, D., & Natarajan, S. (2017). The influence of relative humidity on adaptive thermal comfort. *Building and Environment*, 124, 171-185. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.005>
- [84] Baborska-Narożny, M., Stevenson, F., & Chatterton, P. (2016). Temperature in housing: Stratification and contextual factors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 169(4), 125-137. <https://doi.org/10.1680/ensu.14.00054>
- [85] Palomaki, R. T., Rose, N. T., van den Bossche, M., Sherman, T. J., & De Wekker, S. F. J. (2017). Wind estimation in the lower atmosphere using multi-rotor aircraft. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(5), 1183-1191. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0177.1>
- [86] Barbieri, L., Kral, S. T., Bailey, S. C. C., Frazier, A. E., Jacob, J. D., Reuder, J., Brus, D., Chilson, P. B., Crick, C., Detweiler, C., Dodd, A., Elston, J., Foroutan, H., González-Rocha, J., Greene, B. R., Guzman, M. I., Houston, A. L., Islam, A., Kemppinen, O., & Lawrence, D. (2019). Intercomparison of small unmanned aircraft system (sUAS) measurements for atmospheric science during the LAPSE-RATE campaign. *Sensors*, 19(9), 2179. <https://doi.org/10.3390/s19092179>
- [87] Segales, A. R., Greene, B. R., Bell, T. M., Doyle, W., Martin, J. J., Pillar-Little, E. A., & Chilson, P. B. (2020). The CopterSonde: An insight into the development of a smart unmanned aircraft system for atmospheric boundary layer research. *Atmospheric Measurement Techniques*, 13, 2833-2848. <https://doi.org/10.5194/amt-13-2833-2020>

- [88] Wetz, T., Wildmann, N., & Beyrich, F. (2021). Distributed wind measurements with multiple quadrotor unmanned aerial vehicles in the atmospheric boundary layer. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14, 3795-3814. <https://doi.org/10.5194/amt-14-3795-2021>
- [89] Meier, K., Hann, R., Wenz, A., & Johansen, T. A. (2022). Wind estimation with multirotor UAVs. *Atmosphere*, 13(4), 551. <https://doi.org/10.3390/atmos13040551>
- [90] Shih, T. H., Liou, W. W., Shabbir, A., Yang, Z., & Zhu, J. (1995). A new k-epsilon eddy viscosity model for high Reynolds number turbulent flows - Model development and validation. *Computers & Fluids*, 24(3), 227-238. [https://doi.org/10.1016/0045-7930\(94\)00032-T](https://doi.org/10.1016/0045-7930(94)00032-T)
- [92] Hedayat, Z., Belmans, B., Ayatollahi, M. H., Wouters, I., & Descamps, F. (2015). Performance assessment of ancient wind catchers - An experimental and analytical study. *Energy Procedia*, 78, 2578-2583. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.292>
- [93] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2011). Fundamentals of heat and mass transfer (7th ed.). Wiley.
- [97] Vázquez Ch., H., Pachecano, L., Moya, S. L., Ascencio, J. A., & Cruz-Sandoval, M. (2026a). Micro-scale wind assessment with commercial UAVs and IoT sensors for comfort and environmental management. *Revista Digital Tecnología, Ciencia Aplicada (CITCA)*, 8(2).
- [98] Vázquez Ch., H., Pachecano, L., Moya, S. L., Ascencio, J. A., & Cruz-Sandoval, M. (2026b). Thermal comfort assessment in social housing in a warm subhumid climate: Integration of occupant perception and instrumental monitoring. *Revista Digital Tecnología, Ciencia Aplicada (CITCA)*, 9(1). Artículo aceptado para publicación.
- [99] Vázquez Ch., H., Pachecano, L., Moya, S. L., Ascencio, J. A., & Cruz-Sandoval, M. (2026c). Bioclimatic evaluation of thermal comfort in a warm sub-humid climate: Givoni chart analysis using historical government climate data and validation with in-situ monitoring in an urban area of Morelos, Mexico. *Revista Digital Tecnología, Ciencia Aplicada (CITCA)*, 9(1). Artículo aceptado para publicación.
- [100] Martínez-Arroyo, A., Altamirano, M., Estrada, F., & Calderón, O. (2015). Identificación de la isla de calor urbana en ciudades de la Megalópolis del Valle de México. En C. Gay y García, J. C. Rueda Abad, & B. Martínez-López (Coords.), *Universidad Nacional Autónoma de México/Programa de Investigación en Cambio Climático*.
- [101] Copernicus Climate Change Service. (2025). ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present. *Climate Data Store*. <https://doi.org/10.24381/cds.adbb2d47>
- [103] Autodesk. (2025). Autodesk Forma: Environmental impact analysis for architects [Software/documentación técnica]. Autodesk. <https://www.autodesk.com/products/forma/environmental-impact-analysis>
- [104] AirData UAV. (2025). AirData UAV flight data management and analysis platform [Software/plataforma web]. *AirData UAV*. <https://airdata.com/>
- [105] DJI. (2024). Mavic Air 2 user manual v1.6 [Manual de usuario]. DJI. <https://www.dji.com/downloads/products/mavic-air-2>
- [106] Mendoza Uribe, Indalecio. (2018). ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA EÓLICA EN EL ESTADO DE MORELOS. Conference: *CONGRESO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN ACADEMIA JOURNALS MORELIA 2018*. At: Morelia, Michoacán, México Volume: 10(3), 2218-2223, ISSN: 1946-5351
- [107] Mirnezami, S. R., & Mohseni Cheraghlou, A. (2022). Wind Power in Iran: Technical, Policy, and Financial Aspects for Better *Energy Resource Management*. *Energies*, 15(9), 3230. <https://doi.org/10.3390/en15093230>
- [108] Sámano Tirado, D. A., & Sen, M. (2009). *Mecánica de fluidos*. Ecología y Energía / Universidad de Notre Dame. Versión del 15 de julio de 2009.
- [109] Flores Salas, Luis Alberto (2023). Estudios del Flujo de Aire en el Edificio del CIICAp y Viabilidad de Incorporación de Torre(s) de Viento [*Tesis de Maestría, Tecnológico Nacional de México/CENIDET*]. *Repositorio Institucional del Tecnológico Nacional de México*. <https://rinacional.tecnm.mx/jspui/handle/TecNM/5962>