



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo
Tecnológico

Tesis de Maestría

Estudio experimental y simulación numérica del
comportamiento térmico de una vivienda residencial
con techo verde ventilado

presentada por

Ing. Manuel Alejandro Solano Maya

como requisito para la obtención del grado de

**Maestro en Ciencias en Ingeniería
Mecánica**

Director de tesis

Dr. Efraín Simá Moo

Cuernavaca, Morelos, México. Junio de 2022



Cuernavaca, Mor., **13/junio/2022**

No. Oficio: DIM/188/2022

Asunto Aceptación de documento de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial del **SOLANO MAYA MANUEL ALEJANDRO**, con número de control M19CE072, de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecánica le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado "**ESTUDIO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA VIVIENDA RESIDENCIAL CON TECHO VERDE VENTILADO**" 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.

ATENTAMENTE

DR. EFRAÍN SIMÁ MOO
Director De Tesis

Codirector De Tesis

DRA. YVONNE CHÁVEZ CHENA
Revisor 1

DR. JESÚS PERFECTO XAMÁN VILLASEÑOR
Revisor 2

DR. JESÚS ARCE LANDA
Revisor 3

c.c.p. Departamento de Servicios Escolares
c.c.p. Dr. Carlos Manuel Astorga Zaragoza
c.c.p. Expediente
MACJ/RMA



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



2022 Flores
Año de Magón
PREMIOS DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca, Mor.,
No. De Oficio:
Asunto:

17/junio/2022
SAC/91/2022
Autorización de
impresión de tesis

SOLANO MAYA MANUEL ALEJANDRO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA MECÁNICA
PRESENTE

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado "ESTUDIO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA VIVIENDA RESIDENCIAL CON TECHO VERDE VENTILADO", 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®
"Educación Tecnológica al Servicio de México"

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO

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

CMAZ/CHG



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira, C. P. 62490, Cuernavaca, Morelos
Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4104, e-mail: acad_cenidet@tecnm.mx tecnm.mx | cenidet.tecnm.mx



2022 Ricardo Flores
Año de Magón
PRESESION DE LA REVOLUCIÓN MEXICANA



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Departamento de Ingeniería Mecánica

Cuernavaca, Mor., 17/junio/2022
No. Oficio: DIM/199/2022
Asunto: Autorización de impresión de tesis

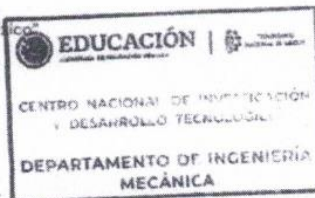
**ING. SOLANO MAYA MANUEL ALEJANDRO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN ING. MECÁNICA
P R E S E N T E.**

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **ESTUDIO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN NUMÉRICA DEL COMPORTAMIENTO TÉRMICO DE UNA VIVIENDA RESIDENCIAL CON TECHO VERDE VENTILADO** han informado, que están de acuerdo con el documento presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su documento 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"



**DR. MARIO ALEJANDRO GÓMEZ JIMÉNEZ
JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

C.c.p. Depto. de Servicios Escolares
Expediente
MAGJ/RMA



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



2022 *Ricardo Flores*
Año de Magón
INICIANDO EN LA REVOLUCIÓN MEXICANA

Agradecimientos

Al Dr. Efraín Simá Moo, gracias por permitirme participar en el proyecto de investigación, y gracias por todo el apoyo, interés y compromiso que me ha brindado durante todo este proyecto.

A mis revisores: Dr. Jesús Perfecto Xamán Villaseñor †, Dra. Yvonne Chávez Chena y Dr. Jesús Arce Landa por todo el interés mostrado y todo el conocimiento recibido a lo largo de toda mi estancia en CENIDET.

Al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), por la oportunidad brindada, gracias por permitirme formar parte del programa de maestría en Ingeniería Mecánica, las herramientas y conocimientos adquiridos son bienes invaluableles que me han permitido ser un mejor profesionista.

Al Consejo Nacional de Ciencia y tecnología (CONACYT), por otorgarme el apoyo económico que me ha permitido llevar a cabo este trabajo de investigación.

A mi familia por brindarme todo el apoyo y todo el amor, gracias por mostrarme el camino y estar conmigo cuando los necesito. A Angie por todo el amor incondicional y por todo el tiempo compartido, gracias por ser una luz en mi camino.

A todos los amigos que he conocido en el CENIDET; Víctor, Josafat, Araceli, Ramiro, Wendy y tantos más que siempre me han apoyado y han hecho que mi estancia sea más agradable.

<i>Índice</i>	Pág.
Lista de Figuras.....	V
Lista de tablas	V
Nomenclatura.....	IX
Resumen.....	X
Abstract	XI
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Techo verde	2
1.2 Techo ventilado.....	3
Desventajas	3
1.3 Propuesta de techo verde ventilado.....	4
1.3.1 Beneficios de la cubierta vegetal	4
1.4 Revisión bibliográfica	5
1.4.1 Comportamiento Térmico de Techos y Fachadas Verdes	5
1.4.2 Comportamiento térmico de fachadas verdes	9
1.4.3 Comportamiento térmico de Techos Ventilados	11
1.5 Conclusiones de la revisión bibliográfica	16
1.6 Objetivos	16
1.6.1 Objetivo general.....	16
1.6.2 Objetivos Particulares	16
1.7 Alcances	16
Capítulo 2 Marco Teórico	17
2.1 Transferencia de calor	17

2.2 Mecanismos de transferencia de calor	17
2.2.1 Conducción	18
2.2.2 Convección	19
2.2.3 Radiación	20
2.3 Consumo energético de edificaciones	21
2.4 Simulación energética de edificaciones	23
2.5 Energy plus	24
2.6 DesignBuilder	25
2.6 Confort térmico.....	26
Capítulo 3 Modelo físico del techo verde ventilado	27
3.1 Balance de energía	27
3.1.1 Radiación	27
3.1.2 Convección	28
3.1.3 Conducción	28
3.1.4 Evapotranspiración vegetal.....	28
3.2 Modelación matemática del techo verde ventilado en DesignBuilder	29
3.2.1 Balance de energía en la losa de concreto	29
Intercambio de calor por convección	30
Intercambio de calor por radiación solar directa y difusa	31
Capítulo 4 Desarrollo experimental	32
4.1 Plantas de estudio.....	32
4.2 Periodo de adaptación	33
4.2.1 Requerimientos de riego	34
4.2.2 Adaptación al ambiente	34
4.2.3 Control biológico	37

4.3	Proceso de selección de plantas.....	38
4.3.1	Monitoreo térmico	38
4.3.2	Instrumentación	39
4.3.3	Resultados del monitoreo térmico.....	41
4.3.4	Conclusiones del monitoreo.....	47
4.3.5	Determinación de la fracción de claros mediante fotografías	48
4.3.6	Planta seleccionada.....	52
4.4	Módulos experimentales	53
4.4.1	Cavidades de madera.....	53
4.4.2	Losas de concreto.....	54
4.4.3	Distribución de módulos experimentales	54
4.4.4	Colocación del techo verde ventilado	56
4.4.5	Instrumentación de los módulos experimentales	57
4.4.6	Monitoreo de los módulos experimentales.....	57
4.4.7	Resultados del monitoreo	60
4.4.8	Conclusiones del monitoreo de los módulos experimentales	60
Capítulo 5	Simulaciones.....	61
5.1	Evaluación de habilidades de usuario.....	61
5.1.1	Estándar ANSI ASHRAE 140/2011.....	61
5.1.2	BESTEST	61
5.1.3	Especificaciones de los BESTEST casos 600's y 900's	61
5.1.4	Resultados BESTEST's 600's y 900's.....	65
5.2	Modelación de las cavidades experimentales.....	67
5.2.3	Geometría de las cavidades experimentales	67
5.2.4	Propiedades termofísicas de los materiales	67

5.2.5 Datos climáticos y datos de sitio	68
5.2.6 Modelado de la cubierta vegetal	69
5.3 Caracterización de la cubierta vegetal	71
5.3.1 Propiedades de la cubierta vegetal.....	74
5.4 Validación	75
5.4.1 Cavidad experimental con techo tradicional	75
5.4.2 Cavidad con techo verde ventilado	76
5.5 Simulación del techo verde ventilado aplicado en una vivienda de referencia	77
5.5.1 Descripción general de la vivienda	77
5.5.2 Propiedades de los materiales.....	78
5.5.3 Vivienda con techo verde ventilado	79
5.5.4 Datos de la simulación.....	80
5.5.5 Datos de sitio y de clima	80
Capítulo 6 Resultados de las simulaciones.....	81
6.1 Vivienda con techo tradicional	82
6.2 Vivienda con techo verde ventilado.....	83
6.3 Vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración.....	84
6.4 Vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración.....	85
6.5 Ganancias térmicas de los techos	86
6.6 Cargas de enfriamiento de las viviendas con sistema de refrigeración.....	86
6.7 Análisis de resultados	87
Capítulo 7 Conclusiones y recomendaciones.....	90
Bibliografía	91

Lista de Figuras

Figura	Descripción	Pág.
1.1	Esquema de un techo verde	2
1.2	Esquema techo ventilado	3
1.3	Esquema techo verde ventilado	4
2.1	Mecanismos de transferencia de calor	17
2.2	Conducción de calor a través de una pared plana	18
2.3	Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección	19
2.4	Porcentaje de consumo y emisiones globales relacionados con la energía en la edificación	21
2.5	Consumo final energético por sector, 2019	22
2.6	Módulos de cálculo de la interfaz DesignBuilder	25
3.1	Modelo físico del techo verde ventilado	27
3.2	Modelo matemático del techo verde ventilado	29
4.1	Plantas sometidas a condiciones de pleno sol	33
4.2	Hojas amarillentas Passiflora	35
4.3	Hojas carcomidas Passiflora	35
4.4	Rama marchita, Santa Elena	36
4.5	Flores de Dipladenia	36
4.6	Flor de Dipladenia	36
4.7	Roya en planta Cissus	37
4.8	Roya en hoja de Cissus	37
4.9	Fungicida	37
4.10	Abono-Insecticida	37
4.11	Vista aérea de los módulos de prueba	38
4.12	Módulos de prueba instalados	38
4.13	Instrumentación de los módulos de prueba	39
4.14	Módulos de prueba instrumentados	39
4.15	Diagrama de conexión de sensores tipo DSB18B20	40
4.16	Fragmento de código para obtención de temperatura mediante Arduino	40
4.17	Fragmento de base de datos	41
4.18	Disposición de los sensores de temperatura	41
4.19	Temperaturas en módulos de prueba	42
4.20	Temperaturas Losa y Vegetación	43
4.21	Temperaturas de losa	44
4.22	Temperaturas en módulos de prueba	45
4.23	Temperaturas losa vs losa blanca	46
4.24	Metodología para la determinación de la fracción de claros	48
4.25	Código desarrollado	49
4.26	Resultados preliminares	50
4.27	Fotografía de una enredadera y su imagen binarizada	50

4.28	Fotografías binarizadas y determinación de la fracción de claro de las cubiertas vegetales	51
4.29	Dipladenia, planta seleccionada	52
4.30	Esquema de las cavidades experimentales	53
4.31	Cavidad experimental construida, A) Exterior y B) Interior	53
4.32	Esquema de la losa de concreto	54
4.33	Molde de madera para la losa y agarraderas de varilla	54
4.34	Losa colada	54
4.35	Colado de losas	54
4.36	Estructura metálica con malacates	55
4.37	Elevación de losa	55
4.38	Distribución de módulos	55
4.39	Acoplamiento losa-cavidad	55
4.40	Soporte metálico cuadrangular	56
4.41	Cavidad con soporte metálico	56
4.42	Macetas colocadas sobre la cavidad experimental	56
4.43	Sujeción de las macetas colocadas sobre la cavidad experimental	56
4.44	Instrumentación de las cavidades experimentales	57
4.45	Sensores instalados al interior de la cavidad	57
4.46	Instrumentación de la cavidad experimental	57
4.47	Temperaturas internas de las losas en diferentes secciones	58
4.48	Temperaturas registradas dentro de las cavidades experimentales a diferentes alturas	59
4.49	Registro de la radiación solar	60
5.1	Geometría BESTEST 600	62
5.2	Geometría BESTEST 610	62
5.3	Geometría BESTEST 620	62
5.4	Geometría BESTEST 630	62
5.5	Geometría de la cavidad experimental, modelada en Design Builder	67
5.6	Variables climáticas	68
5.7	Datos de sitio	68
5.8	Geometría del bloque de componente	69
5.9	Edición del material "Cubierta vegetal"	69
5.10	Propiedades termofísicas del material	70
5.11	Valor R del material	70
5.12	Transmitancia del material	70
5.13	Propiedades superficiales del material	70
5.14	Simulación de la cavidad experimental con techo verde ventilado	71
5.15	Transmisividad de la cubierta vegetal	71
5.16	Modelo físico	72
5.17	Reflectancia de la cubierta vegetal	72
5.18	Esquema de la cubierta vegetal	73
5.19	Valores R calculados	73
5.20	Temperaturas internas de la cavidad con techo tradicional	75
5.21	Temperaturas internas de la cavidad con techo verde ventilado	76

5.22	Vivienda de referencia a) Plano planta baja b) Plano planta alta	77
5.23	Fachada norte vivienda de referencia	77
5.24	Fachada sur vivienda de referencia	77
5.25	Fachada norte del modelo	79
5.26	Fachada sur del modelo	79
5.27	Planta alta del modelo generado	79
5.28	Planta baja del modelo generado	79
5.29	Modelado de la vivienda residencial con techo verde ventilado	79
5.30	Periodo de simulación	80
5.31	Paso de tiempo de simulaciones	80
6.1	Temperaturas mensuales vivienda con techo tradicional	82
6.2	Temperaturas durante la semana más cálida vivienda con techo tradicional	82
6.3	Temperaturas mensuales vivienda con techo verde ventilado	83
6.4	Temperaturas durante la semana más cálida vivienda con techo verde ventilado	83
6.5	Temperaturas mensuales vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración	84
6.6	Temperaturas durante la semana más cálida vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración	84
6.7	Temperaturas mensual vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración	85
6.8	Temperaturas durante la semana más cálida vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración	85
6.9	Ganancias térmicas mensuales de los techos	86
6.10	Carga de enfriamiento anual	86

Lista de Tablas

Tabla	Descripción	Pág.
2.1	Temperaturas de confort Cuernavaca, Morelos	26
4.1	Plantas de estudio	32
4.2	Registro de cuidados y observaciones	33
4.3	Demanda semanal de agua por especie	34
4.4	Adaptación al ambiente en invierno	34
4.5	Adaptación al ambiente en primavera	35
4.6	Criterios de selección	52
5.1	Propiedades termofísicas de los componentes BESTEST 600's	63
5.2	Propiedades de las ventanas BESTEST 600's y 900's	64
5.3	Propiedades de los componentes BESTEST 900's	64
5.4	Resultados BESTEST serie 600	65
5.5	Resultados BESTEST serie 900	66
5.6	Propiedades termofísicas de los materiales	67
5.7	Absortancia capa homogénea	72
5.8	Propiedades de la cubierta	74
5.9	Resultados de la cavidad con techo tradicional	75
5.10	Resultados de la cavidad con techo verde ventilado	76
5.11	Propiedades termofísicas de los materiales	78
5.12	Propiedades del vidrio	78
6.1	Tabla de abreviaturas	81
6.2	Resultados anuales vivienda con techo tradicional y con techo verde ventilado	87
6.3	Resultados durante la semana más cálida, vivienda con techo tradicional y con techo verde ventilado	88
6.4	Ganancias térmicas de los techos	88
6.5	Carga de enfriamiento de las viviendas	89

Nomenclatura

Símbolo	Descripción
A	Área perpendicular a la dirección de transferencia (m^2)
C_p	Calor específico ($J/Kg^\circ C$)
F_{air}	Factor de vista de la superficie externa al aire (Adim.)
F_{gnd}	Factor de vista de la superficie externa a la superficie del suelo (Adim.)
F_{sky}	Factor de vista de la superficie externa al cielo (Adim.)
$h_{convext}$	Coefficiente de conveectivo superficie exterior (W/m^2K)
$h_{r,air}$	Coefficiente radiativo superficie-aire (W/m^2K)
$h_{r,gnd}$	Coefficiente radiativo superficie-suelo (W/m^2K)
$h_{r,sky}$	Coefficiente radiativo superficie-cielo (W/m^2K)
I_b	Intensidad de radiación solar directa (W/m^2)
I_s	Intensidad de radiación difusa (W/m^2)
I_g	Intensidad de radiación difusa proveniente del suelo (W/m^2)
\dot{Q}_{cond}	Flujo de calor conductivo por unidad de área (W/m^2)
\dot{Q}_{conv}	Flujo de calor convectivo por unidad de área (W/m^2)
\dot{Q}_{rad}	Flujo de calor radiativo por unidad de área (W/m^2)
q''_{conv}	Flujo de calor por convección (W/m^2)
q''_{sol}	Flujo de calor por radiación solar directa y difusa (W/m^2)
q''_{LWR}	Flujo de calor por radiación de onda larga (W/m^2)
q''_{ko}	Flujo de calor por conducción a través de la losa (W/m^2)
T_{alred}	Temperatura de los alrededores ($^\circ C$)
T_{air}	Temperatura del aire ($^\circ C$)
T_{atm}	Temperatura atmosférica ($^\circ C$)
$T_{int.}$	Temperatura interna del edificio ($^\circ C$)
$T_{concreto}$	Temperatura de la losa de concreto ($^\circ C$)
T_{sky}	Temperatura de cielo ($^\circ C$)
$T_{vegetal}$	Temperatura de la capa vegetal ($^\circ C$)
Símbolos griegos	
ρ	Densidad (kg/m^3)
λ	Conductividad térmica (W/mK)
σ	Constante de Stefan-Boltzmann (W/m^2K^2)
ρ	Reflectancia (Adim.)
ε	Emitancia (Adim.)
τ	Transmitancia (Adim.)
α	Absortancia (Adim.)

Resumen

Se presenta un estudio teórico-experimental sobre el comportamiento térmico de un tipo de cubierta nombrada “Techo verde ventilado”, este tipo de cubierta se compone de una cubierta vegetal, colocada a una altura de 30 cm sobre la cubierta plana de una edificación formando un canal de aire. Esta propuesta de Techo verde ventilado combina características del techo verde y del techo ventilado, y se ideó para mejorar el desempeño térmico de los espacios residenciales.

La primera etapa del estudio consistió de un proceso para seleccionar la planta más idónea al proyecto, durante este proceso se estudiaron 4 especies de enredadera: 1) *Dipladenia*, 2) *Cissus*, 3) *Passiflora* y 4) *Santa Elena*. La enredadera que mostró el mejor desempeño fue la especie *Dipladenia*, con esta especie seleccionada se procedió a construir el techo verde ventilado.

El techo verde ventilado fue monitoreado experimentalmente en la localidad de Cuernavaca, Morelos, México. El módulo experimental constó de una cavidad de madera, con dimensiones de 0.95m x 0.95m x 0.95m, forrada por el interior con una capa de material aislante y pintada por el exterior de color blanco, sobre la cavidad de madera se colocó una losa experimental de concreto armado, con dimensiones de 1.2m x 1.2m x 0.1m, sobre la losa de concreto se colocó una cubierta vegetal a 30 cm de altura. Con los resultados experimentales se caracterizó la cubierta vegetal, para esto, se consideró a la capa vegetal como una capa homogénea con propiedades homogéneas, las propiedades caracterizadas de la cubierta vegetal fueron *valor R* ($K * m^2/W$), *Transmitancia*, *Reflectancia* y *Absortancia*.

Una vez caracterizado el techo verde ventilado se realizó la simulación, mediante el Software DesignBuilder, del módulo experimental. Las variables de entrada para la simulación fueron: 1) los datos climáticos obtenidos por la estación meteorológica del Cenidet, 2) las características del módulo experimental (geometría y propiedades termofísicas de los materiales) y 3) las características del techo verde ventilado (geometría y propiedades homogéneas). Los resultados de la simulación fueron validados con los resultados experimentales. Posteriormente, se simuló el comportamiento térmico del techo verde ventilado acoplado a una edificación llamada “vivienda de referencia” (utilizada para la elaboración de indicadores de la NOM-020-Ener-2011) compuesta de dos plantas, ambas con una altura de 2.5 m y una envolvente de 160 m², el techo con un área de 54.3 m² y la fachada principal orientada hacia el norte. El periodo de simulación fue de un año bajo las condiciones climáticas y geográficas de la ciudad de Cuernavaca, Morelos.

Los resultados mostraron que, al implementar el techo verde ventilado a la vivienda: 1) la temperatura promedio anual de la vivienda se redujo de 26.3 °C a 25.3 °C, el efecto de disminución de temperatura, solo se percibió en la planta alta de la edificación, en esta zona la temperatura promedio anual se redujo de 28.3 °C a 26.4 °C, 2) la carga de enfriamiento anual se redujo 47% de 4.59 MWh a 2.44 MWh y 3) la ganancia térmica anual del techo se redujo 24% de 5.16 MWh a 3.94 MWh. Se concluye que, bajo las condiciones climáticas de Cuernavaca, el techo verde ventilado tiene la capacidad de mejorar el desempeño térmico al implementarse en una edificación.

Palabras clave: techo verde ventilado, estudio experimental, simulación energética

Abstract

A theoretical-experimental study on the thermal behavior of a type of cover named “Ventilated Green Roof” is presented. This type of roof consists of a vegetal cover, placed at a height of 30 cm on the flat cover of a building forming an air channel. This proposal of “Ventilated Green Roof” combines characteristics of the green roof and the ventilated roof, and it was designed to improve the thermal performance of residential spaces.

The first stage of the study consisted of a process to select the most suitable plant for the project, during this process 4 species of creepers were studied: 1) *Dipladenia*, 2) *Cissus*, 3) *Passiflora* and 4) *Santa Elena*. The creeper that showed the best performance was the species *Dipladenia*, with this selected species the “Ventilated Green Roof” was constructed.

The “Ventilated Green Roof” was experimentally monitored in the city of Cuernavaca, Morelos, Mexico. The experimental module consisted of a wooden cavity, with dimensions of 0.95m x 0.95m x 0.95m, it was lined on the inside with a layer of insulating material and painted on the outside with color white, on the wooden cavity was placed an experimental concrete slab with dimensions of 1.2m x 1.2m x 0.1m and on the concrete slab a vegetal cover was placed 30 cm high. With the results of the monitoring, the thermophysical properties of the vegetation cover were determined, for this, the vegetal layer was considered as a homogeneous layer with homogeneous properties, the properties determined were value R ($K * m^2/W$), *Transmittance*, *Reflectance* and *Absortance*.

Once the ventilated green roof was characterized, the simulation was performed, using the Software DesignBuilder, of the experimental module. The input variables for the simulation were: 1) climate data obtained by the weather station of Cenidet, 2) the characteristics of the experimental module (geometry and thermophysical properties of the materials) and 3) the characteristics of the ventilated green roof (geometry and homogeneous properties). The simulation results were validated with the experimental results. Subsequently, the thermal behavior of the “Ventilated Green Roof” attached to a building called “reference housing” (used for the development of indicators of the NOM-020-Ener-2011) was simulated. That “reference housing” was composed of two floors (both with a height of 2.5 m), a covering of 160 m², a ceiling of 54.3 m² and the main facade facing north. The simulation period was one year under the climatic and geographical conditions of the city of Cuernavaca, Morelos.

The results showed that by implementing the “Ventilated Green Roof” to the house: 1) the average annual temperature of the house was reduced from 26.3 °C to 25.3 °C, the effect of decreasing temperature was only perceived in the upper floor of the building, in this area the average annual temperature was reduced from 28.3 °C to 26.4 °C, 2) annual cooling load was reduced by 47% from 4.59 MWh to 2.44 MWh and 3) the annual thermal gain of the roof was reduced by 24% from 5.16 MWh to 3.94 MWh. It is concluded that, under the climatic conditions of Cuernavaca, the ventilated green roof has the ability to improve thermal performance when implemented in a building.

Keywords: ventilated green roof, experimental study, energy simulation

Capítulo 1.-Introducción

La acelerada urbanización no planificada y no regulada, junto con la falta de vegetación; ha propiciado la aparición del fenómeno “Isla de calor”. Este fenómeno aparece en ciudades densamente construidas y provoca que la temperatura ambiente de las zonas urbanas sea mayor a la temperatura de los alrededores. Entre los factores de mayor influencia se encuentran: la geometría urbana, ausencia de cuerpos de agua, escasez de áreas verdes, la influencia del calor antropogénico y las propiedades termofísicas de los componentes urbanos (Luyando, 2008 y Larsen *et al.*, 2003).

El fenómeno incrementa la temperatura de la zona urbana y a su vez aumenta las temperaturas internas de los espacios residenciales, provocando un aumento en la demanda energética para refrigeración. En verano el efecto se acentúa, generando problemas energéticos y ambientales. Estudios que correlacionan el consumo de energía con el efecto isla de calor, concluyen que, para ciudades con más de 100 000 habitantes, los consumos de energía en horas pico se incrementan entre 1.5 y 2% por cada grado Celsius que aumente la temperatura. Además, mayores temperaturas favorecen el aumento de la contaminación ambiental de dos maneras: directamente, dado que mayores temperaturas urbanas funcionan como catalizador de reacciones en los gases de combustión presentes en la atmósfera, generando mayor cantidad de smog, e indirectamente ya que el aumento de demanda energética provoca que las plantas de generación eléctrica (basadas en combustibles fósiles) liberen mayores cantidades de gases de combustión (CO₂, CO, NO_x, SO_x, vapor de agua y metano), los cuales son responsables del efecto invernadero y de la lluvia ácida (Larsen *et al.*, 2003).

La forma más efectiva de combatir las islas de calor y fomentar mejores condiciones térmicas en espacios residenciales, es aumentar las zonas de vegetación en las ciudades, ya sea en parques, aceras, camellones, paredes o techos. Las áreas verdes tienen la capacidad de transformar el calor sensible en calor latente, disipando la energía térmica mediante la evapotranspiración y disminuyendo el calentamiento del aire (Flocks *et al.*, 2011). Asimismo, las superficies vegetales aportan servicios ambientales (Wong y Yu, 2005; Oke, 1982; Honjo *et al.*, 2003).

Otro factor que influye en las condiciones térmicas de los espacios residenciales es la envolvente térmica, ya que mediante este componente se lleva a cabo el intercambio de calor (ambiente exterior- espacio interior) más significativo (Alpuche, 2008). Por ello, se han venido desarrollando cubiertas exteriores de alto rendimiento, que buscan garantizar el confort térmico (en espacios residenciales) al menor costo energético posible (Zhanga *et al.*, 2008).

Dentro de las cubiertas exteriores desarrolladas, se encuentran los techos ventilados y los techos verdes, estos elementos de construcción ayudan a una mejor integración entre el espacio interior y exterior. Tales estructuras pueden contribuir a la reducción de las demandas energéticas de un edificio. En regiones con altos niveles de radiación solar, las estructuras ventiladas y los techos verdes reducen significativamente las ganancias térmicas hacia el ambiente interior (Dimoudi *et al.*, 2006).

1.1 Techo verde

Un techo verde (Figura 1.1) es una estructura colocada sobre una cubierta plana o inclinada, diseñada para soportar vegetación sobre un edificio. Típicamente se compone de: 1) una capa externa de vegetación; 2) una capa de sustrato para el sostén y nutrición de las plantas; 3) membrana filtradora; 4) capa de drenaje; y 5) una membrana antirraíz, que es la capa en contacto con la losa del edificio (Beltrán *et al.*, 2014 y Oberndorfer *et al.*, 2007).

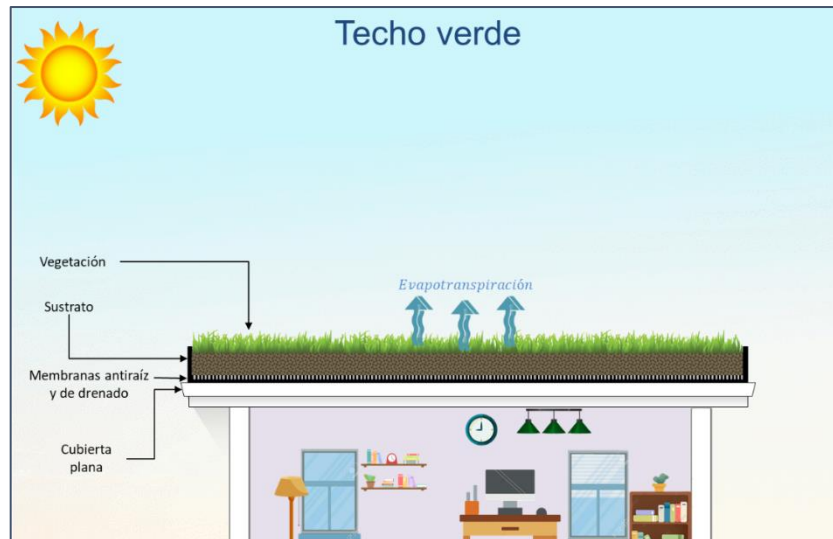


Figura 1. 1. Esquema de un techo verde

Se ha determinado que, con la implementación de un techo verde, en ciudades como Cuernavaca, se podrían obtener disminuciones de temperatura promedio anual de hasta 2.3°C y una reducción en la carga de enfriamiento de hasta el 69% (Ávila, 2019), también se ha concluido que, la efectividad en la reducción de temperaturas está asociada al contenido volumétrico de agua de las capas de sustrato y vegetación (Chagolla, 2017). Los techos verdes representan una alternativa viable para mejorar las condiciones ambientales de zonas urbanas, dentro los beneficios, se enlistan: aislamiento térmico, aislamiento acústico, producción de oxígeno, absorción de partículas nocivas, filtración de partículas de polvo, además de que son estéticos e influyen positivamente en el buen estado de ánimo y la distensión de las personas (Minke, 2014).

Desventajas

Es importante señalar que, ciertas características de los techos verdes, dificultan la implementación de los mismos, dentro de éstas encontramos (Arregui, 2016):

- Son pesados y requieren ciertas capacidades estructurales para su instalación
- De no instalarse correctamente, los techos verdes podrían retener agua y dejar pasar las raíces, dañando la estructura
- Los costos iniciales en materiales e instalación, y los gastos de mantenimiento, pueden ser elevados
- Requieren mantenimiento constante

1.2 Techo ventilado

El techo ventilado (Figura 1.2) consta de una cubierta secundaria colocada sobre la cubierta principal de la edificación, generando una separación donde se encuentra un espacio de aire (abierto o cerrado). El techo secundario protege al techo principal de la radiación solar directa y el espacio de aire actúa como una capa de aislamiento. Un espacio de aire abierto, permite que el flujo de aire lleve el calor de manera efectiva al ambiente exterior y, por lo tanto, se reduce la ganancia de calor hacia el ambiente interior (Zingre *et al.*, 2015).



Figura 1. 2. Esquema techo ventilado

De acuerdo a un estudio desarrollado por Lima (2019), la implementación de techos ventilados, en ciudades como Hermosillo, Sonora y Mérida, Yucatán (con climas cálidos), pueden reducir entre un 49% y un 60% el flujo de calor hacia el interior de las edificaciones (en comparación con los techos de losa convencional). El uso de este tipo de cubierta ventilada ofrece una solución de enfriamiento pasivo, útil para reducir las ganancias térmicas de los edificios, y así, reducir costos energéticos de enfriamiento. (Zingre *et al.*, 2015)

Desventajas

Dadas las características de este tipo de cubiertas, es importante señalar que la mayor desventaja de estos sistemas, es que, implican un redireccionamiento del flujo de calor, es decir, el flujo de calor, que logra reducirse al interior de la edificación, es redireccionado a las zonas circundantes, lo cual incrementa las temperaturas de las zonas aledañas, aportando al fenómeno de islas de calor urbanas.

1.3 Propuesta de techo verde ventilado

En este trabajo se propone, diseñar y construir un techo verde ventilado, que combine características del techo verde y el techo ventilado. En la Figura 1.3 se muestra el esquema del techo propuesto, este sistema constará de una cubierta vegetal, colocada sobre la cubierta plana de la edificación, con una separación que formará un canal de aire, el cual, funcionará como elemento aislante. El propósito del estudio es evaluar experimentalmente el comportamiento térmico del techo verde ventilado, y así, poder simular el impacto que esté tendrá, sobre el comportamiento térmico de una vivienda residencial. Con este tipo de techo se busca ofrecer una tecnología de enfriamiento pasivo, que aporte una solución a la problemática del desempeño térmico en espacios residenciales.



Figura 1. 3. Esquema techo verde ventilado

1.3.1 Beneficios de la cubierta vegetal

Al incorporar un elemento vegetal en la cubierta secundaria, se pretende combinar los beneficios de las cubiertas vegetales con los beneficios de los canales de aire. Los beneficios que se esperan conseguir con el techo verde ventilado son:

- Generar una cubierta secundaria (vegetal) con la capacidad de brindar servicios ambientales
- Aprovechar el fenómeno de la evapotranspiración vegetal, para disipar la energía térmica y disminuir la temperatura del aire circundante
- Aprovechar la capacidad de aislamiento térmico y acústico de las cubiertas vegetales
- Añadir valor estético
- Aprovechar el efecto aislante de los canales de aire

Y en comparación con los techos verdes, ofrecer una alternativa con:

- menores requerimientos de mantenimiento
- estructura más liviana
- menores gastos de instalación (al no ser necesario la implementación de membranas antiraíz, sistema de drenaje, grandes volúmenes de sustrato, etc.)

1.4 Revisión bibliográfica

Se consultaron estudios teóricos y experimentales, referentes al comportamiento térmico de techos verdes, fachadas verdes, y techos ventilados. A continuación, se muestran los aspectos relevantes de cada uno de los trabajos consultados iniciando con los estudios concernientes a techos verdes, continuando con los de fachadas verdes y finalizando con los estudios referentes a techos ventilados:

1.4.1 Comportamiento Térmico de Techos Verdes

Djedjig et al. (2012) realizaron un trabajo teórico para analizar el mecanismo de transferencia de calor y masa a través de un techo verde. El modelo matemático, acopló el balance energético en la capa vegetal con el balance hídrico en el sustrato, que se determinó en función de la evapotranspiración. Las variaciones del balance hídrico a lo largo del tiempo impactaron directamente en las propiedades físicas del sustrato y en la intensidad de la evapotranspiración. Este acoplamiento permitió analizar la influencia del contenido de humedad de sustrato en el efecto de atenuación de flujo de calor, encontrando una diferencia de temperatura superficial de hasta 25°C entre los techos verdes con un medio de cultivo seco y un medio de cultivo saturado. El modelo matemático desarrollado fue validado con datos experimentales de un sistema de techo verde instalado en la Universidad de la Rochelle. Los autores destacaron la importancia de un modelo de evapotranspiración acoplado a la transferencia de calor en la vegetación para obtener una evaluación más precisa del efecto de enfriamiento pasivo de los techos verdes.

Ordoñez et al. (2012) realizaron un estudio de sobrevivencia y cobertura de plantas para techos verdes para el clima de Yucatán. Su trabajo comparó el proceso de propagación y aclimatación de 18 especies vegetales, analizaron las condiciones sustrato requeridas por cada especie, sobrevivencia de especies, tiempo de propagación y área de cobertura para determinar que especies representaban un mejor desempeño y viabilidad económica. El trabajo concluyó que las especies *Kalanchoe gastonis bonnieri*, *Comelina repens*, *Portulaca pilosa*, *Portulaca umbraticola*, *Briophyllum pinnatum*, *Portulaca grandiflora* y *Kalanchoe fedtschenkoi purple* son apropiadas para su uso en techos verdes en Yucatán y los mejores sustratos son los de menor peso seco y menor peso saturado.

Beltrán et al. (2014) llevaron a cabo una investigación del efecto de un techo verde en el confort térmico de una vivienda rural tropical. El prototipo de techo verde que consistía de: 1) una pérgola para el crecimiento del follaje de las plantas; 2) contenedores de sustrato para el crecimiento de las raíces ubicados en los costados de la vivienda; y 3) la planta *Cissus verticillata* especie enredadera nativa. La finalidad de su prototipo fue obtener un diseño más ligero en comparación con los diseños convencionales, y adaptar fácilmente el prototipo a una vivienda rural. La investigación se llevó a cabo en el municipio Paso de Ovejas de Veracruz, México. El trabajo experimental se realizó en tres casas semejantes que se seleccionaron de acuerdo a los siguientes criterios: 1) que tuvieran techos de lámina zinc; 2) orientación de este a oeste; 3) cercanas entre ellas; 4) que dispusieran de dos habitaciones separadas, pero de dimensiones y orientación semejantes. En cada vivienda colocaron un techo verde sobre 1 de las 2 habitaciones y midieron las temperaturas al interior de las 2 habitaciones (habitación con techo verde y habitación sin techo verde). Sus resultados mostraron que en las habitaciones con techo verde hubo una disminución de la temperatura promedio de hasta 4.5 °C en comparación con las habitaciones sin techo verde.

Zhao et al. (2014) realizaron un trabajo teórico-experimental para estudiar el desempeño térmico de un techo verde y la influencia que tienen sus componentes individuales (plantas y sustratos), y las propiedades termofísicas de los mismos, dentro del balance energético. Dentro de su investigación los autores consideraron 7 tipos de planta y 5 tipos de sustrato, a los cuales, de manera experimental, se les determinó su propiedad reflectiva (utilizando un espectrorradiómetro). De igual forma, los 5 sustratos fueron tratados experimentalmente, para determinar sus valores de: conductividad térmica, capacidad calorífica volumétrica y densidad. Una vez obtenidos los parámetros experimentales, los autores realizaron simulaciones, de techos verdes con diferentes combinaciones de plantas y sustratos, considerando el mes de julio de un año típico meteorológico de cuatro ciudades estadounidenses; 1) Austin, TX; 2) Sacramento, CA; 3) Nashville, TN; y 4) Chicago, IL, el modelo matemático utilizado fue el modelo predictivo desarrollado por Tabares-Velasco (2012). Los resultados del trabajo mostraron que la propiedad reflectiva de las plantas influye fuertemente en la radiación neta que incide sobre el techo verde, siendo preferente utilizar plantas con mayor reflectividad, también señalaron que las variaciones en las propiedades térmicas de los diferentes sustratos no tuvo una influencia significativa en el intercambio de calor, sin embargo, señalaron que el sistema de aislamiento y drenaje, propios de los techos verdes, si influyeron notablemente en el rendimiento térmico de estos. Las diferencias de radiación neta, entre las plantas de mayor y menor reflectividad, fueron de hasta un 20%.

Marasco et al., (2015) evaluaron los modelos matemáticos más comunes para predecir la evapotranspiración (ET), incluyeron los modelos de evapotranspiración potencial (PET, por sus siglas en inglés) y los modelos de evapotranspiración real (AET, por sus siglas en inglés). Estos modelos fueron utilizados para predecir la evapotranspiración de dos sistemas de techos verdes (TV) extensivos, ubicados en la ciudad de Nueva York. El primer sistema de TV, denominado W118, estaba conformado por una estera vegetada con una extensión de 600 m^2 y una profundidad de sustrato de 32 mm , mientras que el segundo sistema, denominado USPS, contaba con un área de $10,000\text{ m}^2$ y una profundidad de sustrato de 100 mm . Los modelos PET evaluados fueron: 1) Hargreaves, 2) Priestley-Taylor, 3) Penman y 4) ASC Penman-Monteith. Los modelos AET fueron: 1) Storage model, 2) API model y 3) Advection-Aridity model. Los resultados de las predicciones fueron comparados con 12 000 h de mediciones de ET in situ obtenidas mediante un sistema de cámara dinámica. Los resultados del modelo de Priestley-Taylor, tuvieron la mejor correlación con las medidas de la cámara dinámica ($r^2 = 0,96$ para el sistema W118 y $r^2 = 0,82$ para USPS).

Ordóñez et al. (2015) realizaron un estudio comparativo del desempeño térmico de un techo verde y un techo blanco en un edificio construido con el sistema de vigueta pretensada de concreto y bovedilla (VB). La investigación se realizó en dos salas audiovisuales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán (FIUADY), ambas salas con dimensiones similares y ubicadas en el mismo edificio el cual constaba de una planta con techo de dos aguas, orientado al sur. El techo de la primera sala contaba con una capa de impermeabilizante asfáltico y una segunda capa de impermeabilizante elastomérico blanco depositado sobre la primera capa y unas dimensiones de 13.5 m de largo por 12.3 m de ancho. La segunda sala tenía un techo verde de tipo extensivo y continuo de 160 m^2 , compuesto por una capa de impermeabilizante asfáltico, membrana anti- raíz de polietileno, membrana de drenaje, sustrato (7 cm de espesor) compuesto por una mezcla de 20% de componentes orgánicos y 80% de componentes minerales y con un peso específico en seco de 250 kg/m^3 , y vegetación. Ordóñez y colaboradores monitorearon la humedad relativa, temperatura

ambiente y temperatura superficial en los techos de ambas salas. Los resultados mostraron que los techos verdes tienen una mejor capacidad para reducir las fluctuaciones temporales de temperatura y para favorecer las condiciones de confort térmico hacia el interior del edificio en comparación con los techos blancos.

Chagolla (2017) desarrolló un trabajo teórico-experimental para estudiar la transferencia de calor y masa de un techo verde con la especie vegetal *Aeonium subplanum* la cual presentó la mayor tolerancia a la sequía. De forma experimental y con las condiciones de un clima cálido subhúmedo, monitoreó el comportamiento térmico de 2 cavidades de madera (una con techo verde y la otra con techo de concreto) recubiertas al interior con aislante térmico. Sus resultados mostraron que el techo verde puede disminuir la temperatura exterior máxima con respecto al techo de concreto en la temporada cálida y la fría, en 20.5 y 28.6 °C respectivamente, y en temporada fría, el techo verde puede reducir en 10.3% el consumo de energía eléctrica en comparación con el techo de concreto. En su trabajo el autor destacó el efecto del riego en la reducción de la temperatura del techo verde ya que, durante la temporada cálida, se encontró que después de regar el techo verde, la temperatura máxima de la vegetación, el sustrato, y la losa disminuyeron en 6.0, 13.6 y 1.7 °C, respectivamente, demostrando la influencia del Contenido Volumétrico del Agua (CVA) como regulador de temperatura en los techos verdes.

Imran et al. (2018) desarrollaron un trabajo para evaluar la efectividad de los techos verdes y los techos reflectantes, como posibles estrategias de mitigación del efecto isla de calor urbana (UHI, por sus siglas en inglés) y los impactos de estas estrategias sobre el confort térmico humano, durante uno de los eventos de olas de calor más extremos (27-30 de enero de 2009), en la ciudad de Melbourne en el sureste de Australia. En su trabajo los autores utilizaron el modelo Weather Research and Forecasting, junto con el Modelo de dosel urbano de capa única (Single Layer Urban Canopy) para su investigación. Los resultados mostraron que la temperatura al nivel de superficie de techo, se reduce durante el día entre 1 y 3.8 °C considerando fracciones de techo verde de 30% y 90% respectivamente, mientras que para techos reflectantes la temperatura al nivel del techo se reduce entre 2.2 y 5.2 °C, con un albedo solar de 0.50 y 0.95 respectivamente. En su análisis también incluyeron el efecto de techos verdes y reflectantes, en la reducción del Índice Universal de Confort Térmico (UTCI, por sus siglas en inglés) a nivel peatonal, de esto, se concluyó que los techos verdes reducen el UTCI a nivel peatonal hasta 1.5 °C y los techos reflectantes hasta un 2.4 °C.

Yang et al. (2018) realizaron un estudio comparativo sobre los techos verdes y los techos reflectantes, con el objetivo de determinar las disminuciones de cargas térmicas de ambos techos. Para su estudio realizaron simulaciones a través del software Energy Plus considerando las características de un edificio institucional de 3 pisos (llamado SDE1), ubicado en la Universidad de Singapur y bajo las condiciones climáticas de un día de verano típico de Singapur. Los resultados de su trabajo mostraron que durante los periodos de máxima radiación (de 9 am a 5 pm), los techos reflectantes reducen las ganancias térmicas en aproximadamente $0.14 \text{ kWh}/\text{m}^2$ (8%) y los techos verdes reducen $0.008 \text{ kWh}/\text{m}^2$ (0.4%), y para periodos de días completos los flujos se reducen $15.53 \text{ kWh}/\text{m}^2$ (37%) y $13.14 \text{ kWh}/\text{m}^2$ (31%) para techo reflectante y techo verde respectivamente.

Ávila (2019) realizó un estudio teórico sobre el comportamiento térmico de dos viviendas: 1) La primera una vivienda con las características de la vivienda referida en la NOM-020-ENER-2011 con un área construida de 45.5 m², 2) La segunda una vivienda particular ubicada físicamente en el estado de Morelos con un área de construcción de 28.7 m², ambas viviendas orientadas hacia el norte y con alta masa térmica en sus materiales de construcción. El estudio comparó el comportamiento térmico de ambas viviendas bajo dos escenarios: 1) El primero, la vivienda con un techo tradicional (losa de concreto recubierta de impermeabilizante) y 2) El segundo, la vivienda con un sistema de techo verde compuesto por una capa de antirraíz, sustrato y vegetación. Ávila caracterizó las propiedades termofísicas del techo tradicional y del techo verde, analizando datos experimentales obtenidos previamente y posteriormente realizó simulaciones energéticas de las viviendas utilizando el software *Energy Plus* y *Design Builder*. Sus resultados indicaron que la implementación del techo verde redujo la temperatura promedio anual 1.6°C para la vivienda de referencia y 2.3 °C para la particular, en comparación con el techo tradicional, siendo mayor la reducción en los meses cálidos (abril, mayo y junio).

Carreto (2019) estudió de manera teórico-experimental el impacto que tiene un techo verde al interior de una cavidad en comparación con un techo convencional de losa de concreto (Bajo las condiciones climáticas del estado de Morelos). Para ello analizó el comportamiento térmico de los tres componentes principales de un techo verde (Impermeabilizante, sustrato y vegetación) de manera individual y así determinó cuál de ellos tiene mayor influencia en la reducción del flujo del calor a través del techo. El autor obtuvo de forma experimental: las mediciones de las variables climáticas del lugar, la temperatura al interior de las cavidades, la temperatura de la losa y de cada uno de los componentes del techo verde, seguidamente utilizó los datos experimentales para proveer información a los modelos matemáticos de la simulación subsecuente. El autor realizó las simulaciones del comportamiento térmico de 4 cavidades: 1) Cavidad con losa de concreto, 2) Cavidad con losa de concreto e impermeabilizante, 3) Cavidad con losa de concreto y sustrato y 4) Cavidad con losa de concreto y techo verde). Para ello empleó el software *ANSYS Fluent*. Las simulaciones fueron desarrolladas en estado transitorio con condiciones de frontera de segunda clase. Carreto validó sus simulaciones con datos experimentales, obteniendo un error máximo de 16.4 %. Sus resultados muestran que; en un techo verde el flujo de calor entrante a la cavidad se reduce en un 52.4 % en comparación al techo convencional y durante la noche, la pérdida de calor del interior al exterior se reduce en un 46.5 % mostrando que el techo verde actúa como un aislante térmico.

1.4.2 Comportamiento térmico de fachadas verdes

Larsen et al., (2015) realizaron un trabajo teórico para evaluar el comportamiento térmico de una fachada verde. El objetivo de su trabajo fue presentar un método simplificado para modelar el comportamiento térmico del muro verde, utilizando el software Energy Plus, que carece de un modelo matemático específico para este tipo de elementos vegetados. La propuesta de Larsen y colaboradores fue utilizar el modelo tradicional de muro con acristalamiento y asignarle propiedades termofísicas ficticias (o aparentes), que semejaran el efecto de atenuación de flujo de calor de las plantas. El modelo físico de este trabajo consistió de una habitación de $5 \times 5 \text{ m}$ con una altura de 2.4 m . El techo de la cavidad compuesto de lámina galvanizada y aislante térmico (poliestireno extruido) con 0.05 m de espesor, los muros Norte, Sur y Este, compuestos de tabique con 0.2 m de espesor, el muro Oeste con un área vidriada de 10.56 m^2 , la fachada verde se encontraba frente al vidrio con una separación de 0.3 m . Para la simulación utilizaron las condiciones climáticas de la ciudad de Salta, Argentina. El método simplificado propuesto por Larsen consistió en modificar las propiedades ópticas del elemento vidriado, esta modificación fue calculada a partir de modelos matemáticos de cubiertas vegetales, presentes en la literatura. El trabajo simuló la habitación bajo dos condiciones, con y sin muro verde. Los resultados de ambas simulaciones mostraron que el muro verde significó una reducción en la ganancia de calor (heat gain) de 30% y de 63% en la pérdida de calor (heat loss). Los autores concluyeron que el modelo es aceptable, sin embargo, recomendaron desarrollar un método que permita considerar las propiedades vegetales como propiedades dinámicas.

Suklje et al., (2016) analizaron experimentalmente el comportamiento térmico de una fachada verde (Vertical greenery system), VGS, por sus siglas en inglés. El módulo experimental que utilizaron fue una cavidad de $2.5 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ con altura de 2.45 m . Una de las fachadas con 1.96 m^2 de superficie externa, orientada hacia el sur, fue dividida verticalmente en dos secciones (ambas con la misma área). La sección izquierda funcionó como fachada de referencia, es decir, la superficie de esta sección estaba expuesta sin ningún tipo barrera adicional, la sección derecha de la fachada fue cubierta por un VGS (utilizando la especie *Phaseolus Vulgaris*) formando un canal de aire de 8 cm . La instrumentación del módulo consistió de termopares tipo T para medir la temperatura superficial de ambas secciones de la fachada, también se colocaron estos sensores en la cubierta vegetal, en el canal de aire y dentro de la cavidad. La radiación global que incidía sobre la fachada de referencia y sobre la fachada con cubierta verde fue medida a través de dos piranómetros colocados sobre cada una de las secciones. El experimento se desarrolló en la ciudad de Ljubjana, Eslovenia. Suklje y colaboradores realizaron dos variantes del experimento, la variación fue el número de capas vegetales que conformaban el VGS, primero se utilizó un VGS de una capa vegetal y luego se empleó un VGS de doble capa vegetal (superpuestas), el VGS con doble capa tenía mayor índice de área foliar vertical (LAIV, por sus siglas en inglés). Los resultados experimentales mostraron que durante el día se presentó una diferencia de temperaturas entre la fachada de referencia y la fachada con cubierta vegetal de hasta 29 K para la cubierta vegetal de una capa y de hasta 34 K para la cubierta vegetal de doble capa. Posteriormente desarrollaron un modelo matemático y calcularon el flujo de calor hacia el interior de la cavidad, con y sin cubierta vegetal, estos resultados mostraron que la cubierta vegetal puede reducir hasta un 77% (con el VGS de doble capa) el flujo hacia el interior de la cavidad. El trabajo concluyó que la cubierta vegetal es una estrategia viable para mejorar el rendimiento térmico de un edificio.

Suklje et al., (2019) desarrollaron un enfoque de modelación inversa, para evaluar el comportamiento térmico de una fachada verde. Este estudio consideró los resultados experimentales obtenidos en su trabajo previo (Suklje et al., 2016). El modelo físico del problema consistió de una cubierta vegetal vertical y una envolvente (muro tradicional) de edificio, separadas por una capa de aire. Para la modelación de este sistema los autores consideraron la capa vegetal y la capa de aire como una capa homogénea con propiedades termofísicas aparentes, que fueron calculadas mediante el modelado térmico inverso (modeling thermal inverse). Los autores señalaron que aplicaron algoritmos genéticos (GA, por sus siglas en inglés) para aplicar el método inverso y mencionaron que estos algoritmos son preferibles cuando el modelo matemático (en este caso, conducción de calor) no corresponde al fenómeno físico real que se presenta en la envolvente del edificio. Las propiedades termofísicas-aparentes de la capa homogénea que fueron calculadas mediante el método inverso fueron; conductividad (λ'), densidad (ρ'), calor específico (C_p'), absorptancia (α') y transmitancia (τ'). El enfoque de modelación inversa permitió simplificar el modelado del sistema, los valores obtenidos por el método simplificado fueron comparados con los valores experimentales obtenidos en su trabajo previo y mostraron una variación máxima de $\pm 1,3$ °C para los valores de temperatura y de $\pm 0,3$ W/m². El trabajo concluyó que el modelo simplificado mediante el método inverso puede ofrecer una solución al modelado de fenómenos físicos complejos como es el caso de la transferencia de calor a través de las fachadas vegetales, cuyo uso arquitectónico va en aumento. Este tipo de simplificaciones pueden integrarse fácilmente a las herramientas de simulación energética de edificios (por ejemplo, TRNSYS, Energy Plus, IDA-ICE etc.).

1.4.3 Comportamiento térmico de Techos Ventilados

Ciampi et al. (2005) investigaron de manera teórica, el efecto en la reducción de ganancias térmicas que proporcionan los techos ventilados (con ductos de ventilación de entre 10 y 15 cm) y los techos microventilados (con ductos de 4-6 cm), durante la temporada de verano. El modelo físico estudiado consistió de un techo inclinado con una capa superior y una inferior, soportadas por una estructura de madera y separadas por un ducto de aire. El trabajo contempló variaciones en la altura del ducto y en la cubierta superior, comparando dos tipos de cubierta, 1) tejas de terracota y 2) panel de madera con recubrimiento de cobre (este tipo de cubierta fue seleccionado debido a su creciente uso en la arquitectura moderna). Los autores desarrollaron un modelo matemático basado en la analogía de termorresistencias. Los resultados del trabajo concluyeron que: 1) la cubierta de terracota presentó mayor reducción de carga térmica que el techo con recubrimiento de cobre, 2) a medida que aumenta el espesor del conducto de aire aumenta la reducción del flujo de calor al interior, 3) en el caso de la cubierta de terracota con un ducto de ventilación de 15 cm se tuvo una reducción de flujo de calor de 30%, mientras que con un ducto de microventilación de 5 cm se tuvo una reducción de 15% , 4) a medida que aumenta la longitud del techo ventilado la reducción de carga térmica disminuye y 5) a medida que aumenta el ángulo de inclinación del techo aumenta el porcentaje de reducción de carga térmica. Los autores señalaron finalmente, la importancia de incluir una capa de material aislante dentro del techo ventilado mencionando que se tiene un mejor desempeño térmico si el aislante se coloca cerca de la capa inferior del techo.

Dimoudi et al. (2006) generaron un estudio experimental a gran escala del comportamiento térmico de un techo ventilado bajo las condiciones climáticas de verano en Grecia. Para ello compararon el rendimiento térmico de una estructura con techo ventilado y una estructura con techo convencional realizando mediciones simultáneas de los componentes de ambas estructuras instalados en la misma área. Los autores realizaron las pruebas en las celdas de prueba del CRES, en Grecia. Las celdas de prueba fueron cajas aisladas con dimensiones de 8.4 m, 3.8 m, 3.6 m, ubicadas en un ambiente al aire libre, las dimensiones totales del techo en la celda de prueba fueron de 2.715 m ancho 4.970 m de largo, el cual dividieron en dos áreas iguales: una mitad con techo convencional o techo típico, (de acuerdo con las pautas actuales para la construcción de Grecia), y la otra mitad con un techo ventilado. El techo convencional consistía de: 1) Losa de hormigón armado de 12 cm de espesor que estaba en contacto directo con el interior de la sala; 2) Capa de poliestireno extruido de 5 cm de grosor colocada en la parte superior del forjado; 3) Losa prefabricada de hormigón armado de 2,5 cm de espesor, expuesta al ambiente externo, mientras que, el techo ventilado consistía de: 1) Losa de hormigón armado de 12 cm de espesor en contacto directo con el interior de la sala; 2) Capa de poliestireno extruido de 5 cm de grosor colocada en la parte superior del forjado; 3) distancia entrehierro (canal de ventilación) con alturas de separación de 6 y 8 cm; 4) Losa prefabricada de hormigón armado de 2,5 cm de espesor y expuesto al ambiente externo. Los autores establecieron 4 escenarios experimentales: 1) Techo típico, 2) Techo típico con barrera radiante, 3) Techo ventilado y 4) Techo ventilado con barrera radiante. Los resultados mostraron que el uso de una barrera radiante mejora el rendimiento del techo ventilado durante el día de verano ya que se mantiene hasta 5 °C más frío que un techo sin barrera radiante. También se demostró que la barrera radiante tiene un mejor rendimiento térmico durante el verano y es favorable para ambos espacios de aire (6 y 8 cm). Otro aspecto importante es que los techos ventilados resultan ser mejores que los techos no ventilados debido a que éste mostró mejor

desempeño en términos de demanda de enfriamiento pudiendo contribuir significativamente a la conservación de energía de un edificio durante los periodos de verano.

Lee et al. (2009) evaluaron el comportamiento térmico de un techo ventilado y lo compararon con el comportamiento de un techo no ventilado. Para ello y de forma experimental midieron el flujo de calor de una cavidad con techo ventilado. Lee y colaboradores realizaron las pruebas experimentales en las instalaciones de prueba AEPRC de la Universidad Nacional de Seúl, Corea. Para ello diseñaron un simulador de techos que permitía simular techos con diferentes configuraciones. El simulador de techos consistía de 4 partes: 1) Panel de calefacción (que simulaba la ganancia de calor solar), 2) panel de techo (el objeto de evaluación), 3) cámara (que simulaba la habitación debajo del techo) y 4) una unidad de calefacción y refrigeración (que mantenía la temperatura de la cámara constante). En el desarrollo experimental tomaron medidas de temperatura y velocidad del aire. Es importante mencionar que para las pruebas utilizaron diversos materiales para los paneles del techo cómo: tejas de asfalto, arcilla y concreto, baldosas, pizarra, tejas metálicas, productos sintéticos, sistemas de techo de paneles y productos de fibrocemento, etc. También se probaron diferentes ángulos de inclinación, y formas y tamaños de las cavidades. Los resultados de su trabajo mostraron que un techo ventilado puede evitar la acumulación térmica en el techo y se puede disminuir la carga de enfriamiento. El techo ventilado presentó una diferencia de temperatura de 37 °C en la cavidad con respecto al no ventilado. En cuanto al ángulo de inclinación del techo, se observó que, si éste es mayor, menor será la temperatura en la cavidad y que para determinar el ángulo adecuado se debe considerar la orientación del techo y la región donde se encuentre el edificio.

Liberati et al. (2009) desarrollaron un estudio teórico-experimental sobre el comportamiento térmico de una cubierta ventilada diseñada específicamente para establos ganaderos. El objetivo de la investigación fue proponer una cubierta ventilada capaz de minimizar las ganancias térmicas durante el día y maximizar las pérdidas térmicas durante la noche. Para ello, los autores idearon una cubierta que favoreciera una alta resistencia térmica a la radiación solar y una baja resistencia térmica al flujo de calor del interior al exterior. La propuesta de cubierta ventilada consistió de 4 capas: 1) capa superior de lámina ondulada de fibrocemento, 2) un panel subyacente de material aislante, 3) un canal de aire y 4) una lámina plana de fibrocemento como capa inferior. Los autores desarrollaron un modelo matemático para calcular la transferencia de calor en el sistema, para ello hicieron 3 consideraciones: 1) el aire dentro del canal es un fluido newtoniano, 2) bajo régimen de flujo laminar y 3) con convección forzada. A la par del trabajo teórico, los autores desarrollaron el trabajo experimental acoplado el techo ventilado (con longitud de 6 m, 1 m de ancho y una pendiente del 20%) a una cavidad con paredes de poliuretano expandido de 0.1 m de grosor y considerando diferentes alturas de canal. Para simular el calor metabólico de los animales, introdujeron lámparas incandescentes con una potencia total de 100 W. Los parámetros monitoreados fueron: temperaturas superficiales y de fluido (aire entrante y saliente), velocidad y dirección del viento, e intensidad de radiación. Los resultados mostraron que la reducción del flujo de calor se relacionaba con la altura de canal, y que la altura óptima era una función de la longitud de canal y la velocidad del viento, concluyendo que la optimización del techo ventilado debe considerar las condiciones anemológicas del sitio donde se pretenda utilizar este tipo de tecnología.

Gagliano et al. 2012 realizaron un análisis del comportamiento térmico de techos ventilados, para ello realizó simulaciones con el software FLUENT. Las características del sistema consistían en dos losas con una longitud de 6 m separadas por un canal de aire de 10 cm (aunque también se estudiaron con canales de aire de 5 y 20 cm) y una capa de aislante, se estudiaron dos posiciones diferentes del aislante respecto al canal de aire (debajo del canal de aire y encima del canal de aire). El estudio se centró en analizar el comportamiento térmico del flujo de aire y su efecto en la disminución de las cargas térmicas. Las condiciones climáticas consideradas fueron las de un día de verano (latitud 37 °C) a las 12:00 h, esto es una radiación solar de 800 W/m^2 y una temperatura de 301 K. Los resultados del estudio mostraron que la ventilación de los techos puede reducir significativamente los flujos de calor (hasta un 50%) durante la temporada de verano.

Zingre et al. (2015) desarrollaron un trabajo para modelar el comportamiento térmico de un techo de doble capa (Techo ventilado) combinado con un techo fresco (con película reflectiva), para ello propusieron un modelo de transferencia de calor, bajo condiciones climáticas tropicales. El modelo físico del techo ventilado estaba compuesto por dos techos sólidos (un techo secundario en la parte superior y un techo primario en la parte inferior) separados por un espacio de aire. Zingre y colaboradores consideraron 4 configuraciones: 1) Techo ventilado con película reflectiva, 2) Techo ventilado sin película reflectiva, 3) Techo convencional (Techo sólido sin espacio de aire) con película reflectiva y 4) Techo convencional con película reflectiva. El modelo matemático del sistema en 1D con condiciones de frontera transitorias se resolvió mediante un método de aproximación espectral. Las predicciones del modelo mostraron que agregar una película reflectiva en el techo de doble capa (Techo ventilado) reduce la temperatura máxima del techo secundario hasta 14.7 °C y en el techo primario hasta 4.7°C, reduciendo así el aumento de calor diario hasta un 51% en comparación con el techo de doble capa sin película reflectiva. La comparación de las 4 configuraciones mostró que el techo doble capa con película reflectiva es el más eficaz en la reducción de las ganancias térmicas, seguido del techo de doble capa sin película reflectiva. El menos eficaz fue el techo convencional sin película reflectiva. Los autores destacaron que el techo ventilado con película reflejante proporciona un buen aislamiento durante el día, pero disminuye el efecto de pérdidas de calor durante la noche, lo cual no es tan deseable en zonas tropicales, pero puede ser ventajoso en temporada fría.

Li et al. (2016) realizaron una investigación numérica sobre el comportamiento térmico de un techo ventilado para la zona noreste de China, con la finalidad de conocer la influencia que tienen los diferentes parámetros en el comportamiento del sistema. El trabajo consideró las condiciones climáticas de la ciudad de Daqing, China, con un clima típico de zona fría, con un máximo histórico (de temperaturas medias en verano) de 303 k y un mínimo de 296 k, y con una intensidad de radiación anual de 491.4 kJ/cm². El modelo físico del estudio con dimensiones de 3m de largo por 3m de ancho; se dividió en 4 capas: 1) La primera capa (techo base) de concreto reforzado, 2) La segunda de concreto agregado fino, 3) la tercera capa el canal de aire y 4) la cuarta capa una placa de aleación de aluminio. Los autores plantearon el modelo matemático del sistema en 3D y posteriormente lo discretizaron a través de la técnica de Volumen Finito, el sistema de ecuaciones resultantes fue resuelto mediante un proceso iterativo, los cálculos fueron realizados mediante el software FLUENT adoptando un esquema implícito con precisión de segundo orden y un criterio de convergencia de 1×10^{-6} . Los resultados del estudio mostraron que para mejorar la velocidad del flujo de aire es recomendable un espesor de canal de 100 mm. La inclinación del techo influye en la velocidad del aire y la diferencia de presión, ya que al aumentar la pendiente aumentan ambos

parámetros provocando que el calor exhausto se vuelve alto debido a las fuerzas de flotación, por ello recomendaron un ángulo mínimo de 33-40% para producir una fuerza de flotabilidad en un techo ventilado.

Beltrán (2018) realizó un estudio numérico sobre la transferencia de calor de un techo ventilado, bajo las condiciones climáticas del año 2014 en tres ciudades de la república mexicana; Ciudad de México, Ciudad Juárez y Mérida. El autor utilizó el método de volumen finito con el algoritmo de acople SIMPLE para modelar el techo ventilado y un techo de losa convencional. Beltrán consideró la transferencia de calor por conducción y convección en un sistema bidimensional en estado pseudo transitorio. El techo ventilado consistió de una losa de concreto de 12 cm de espesor por 1 m de largo y un techo de lámina galvanizada, ambos techos separados por un canal de aire. El techo convencional consistió de una losa de concreto de 12 cm de espesor por 1 metro de largo. Para su análisis Beltrán consideró las variables climáticas de velocidad del viento, temperatura ambiente, y radiación solar de los días más cálidos y más fríos de cada mes (del año 2014). Los resultados del techo ventilado fueron comparados con los del techo de losa convencional, y mostraron una reducción de flujos de calor de 77% para la ciudad de Mérida, 76% para la ciudad de México y 56.3% para ciudad Juárez. En su trabajo también analizó la relación entre la disminución del flujo de calor y la altura del canal de aire, con la finalidad de identificar el espacio óptimo de canal de aire, de este análisis se concluyó que la altura óptima para un día frío es de 11 cm y de 10 cm para un día cálido.

Lima (2019) desarrolló un trabajo para evaluar el comportamiento térmico de un techo ventilado y su efecto en el ahorro de energía en edificaciones, en su estudio la autora consideró las condiciones climáticas de dos ciudades con climas cálidos típicos en México: Hermosillo Sonora y Mérida Yucatán las cuales presentan un clima cálido seco y cálido subhúmedo, respectivamente. Lima simuló el comportamiento térmico de un techo ventilado y un techo convencional de concreto y posteriormente realizó un análisis comparativo. Para ello desarrolló un modelo matemático basado en balances termodinámicos globales. Para el modelo del techo ventilado consideró una losa de concreto de 12 cm de espesor y una cubierta de lámina galvanizada entre las cuales se encontraba un canal de aire de 10 cm donde circulaba una corriente de aire. Su simulación se realizó en estado transitorio a un paso de tiempo de 60 s considerando el día más cálido y el más frío de cada mes del año 2014 de ambas ciudades (Hermosillo Sonora y Mérida Yucatán). Los resultados de Lima mostraron que para el día más cálido de la ciudad de Hermosillo el techo ventilado presentó una reducción del flujo de calor al interior de 49 % comparado con el techo convencional, mientras que, para el clima de la ciudad de Mérida, se tuvo una reducción de 60 % del flujo de calor, al implementar el techo ventilado. Por otra parte, hubo una reducción total de la carga térmica de 49 % para Hermosillo y de 60% para la ciudad de Mérida para los días más cálidos y más fríos de cada mes de ambas ciudades.

Tzuc et al. (2019) utilizaron un modelo predictivo MGGP (programación genética multigénica o multi-gene genetic programming en inglés) para predecir las ganancias térmicas de un techo plano ventilado, el trabajo que realizaron fue Teórico-Experimental. La parte experimental se llevó a cabo en la ciudad de Cuernavaca Morelos, donde se tiene un clima templado. En dicha área de estudio se construyó e instrumentó un módulo que consistía de una cavidad de 1.0m, 1.0 m y 1.0 m de largo, ancho y alto. El techo ventilado consistía de una losa de concreto como techo primario y una delgada capa de acero (con ancho de canal ajustable) como techo secundario, y estaba instrumentado para medir la temperatura de la superficie del canal ventilado y la superficie interior de la cavidad. Las

variables climáticas como irradiancia solar, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento fueron monitoreadas con una estación meteorológica Vaisala Maws100 ubicada en el sitio del experimento, luego con los datos experimentales alimentaron el modelo predictivo. Los resultados del trabajo mostraron que de acuerdo a los estudios estadísticos (RMSE = 3.7861 y $R^2 = 0.9452$) el MGGP es un modelo que proporciona predicciones con alta correlación. Representando una alternativa adecuada para la estimación de las ganancias térmicas de sistemas con interacciones ambientales complejas. Además, el análisis de sensibilidad del modelo reveló que el ancho del canal y el clima ambiental son las variables con mayor influencia en el modelado.

Lima et al. (2022) realizaron un estudio teórico sobre el comportamiento térmico anual de un techo ventilado aplicado a un espacio residencial. El trabajo consideró las condiciones climáticas de dos ciudades mexicanas con clima cálido. Para su estudio Lima y colaboradores desarrollaron un código numérico basado en el método del balance energético global para predecir el comportamiento térmico del techo ventilado. El código mostró una buena concordancia con los datos reportados en la literatura. Los datos meteorológicos de los días más fríos y cálidos de cada mes fueron ingresados al código numérico como condiciones de contorno para realizar sus simulaciones. Los autores estudiaron los beneficios de utilizar un techo ventilado en comparación con un techo convencional. Sus resultados mostraron que la implementación de techo ventilado puede reducir significativamente la ganancia de calor total anual hasta en un 50 y 60%. Además, los autores concluyeron que para al aplicar el techo ventilado a una habitación de 9 m², el periodo de recuperación de la inversión es de un año y medio, y esto demuestra que el techo ventilado es una tecnología pasiva con alto potencial para reducir el consumo de energía para el confort térmico en edificios a un costo relativamente bajo.

1.5 Conclusiones de la revisión bibliográfica

En concordancia con la información consultada durante esta revisión bibliográfica, se puede concluir que:

- Los techos verdes tienen la capacidad de reducir las ganancias térmicas en edificaciones.
- Los techos ventilados tienen la capacidad de reducir las ganancias térmicas en edificaciones.
- Las cubiertas vegetales poseen propiedades termofísicas dinámicas.
- Las propiedades termofísicas de las fachadas verdes, pueden determinarse mediante modelos simplificados.
- Aun no existe información disponible sobre el desempeño térmico de techos verdes ventilados.

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo general

Simular el comportamiento térmico de una vivienda residencial con techo verde ventilado

1.6.2 Objetivos Particulares

1. Construir e instrumentar un módulo de techo verde ventilado acoplado a una cavidad.
2. Evaluar experimentalmente el comportamiento térmico de la cavidad con techo verde ventilado.
3. Simular el comportamiento térmico de una vivienda residencial con techo verde ventilado.

1.7 Alcances

El sistema fue evaluado bajo las condiciones climatológicas de la localidad de Cuernavaca, Morelos. La cavidad de prueba (Fabricada en madera y con una capa de aislante térmico al interior) tuvo unas dimensiones internas de 0.9 m de alto por 0.9 m de ancho y 0.9 m de largo. La simulación del sistema se realizó mediante el software Energy Plus-Design Builder, para un año típico de condiciones climatológicas de la región y se utilizaron especies vegetales disponibles en Cuernavaca.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Transferencia de calor

La transferencia de calor es la ciencia que estudia la razón de intercambio de calor entre cuerpos calientes y fríos (Kern, 1999). Una definición sencilla pero útil es la siguiente (Incropera, 1999):

“Transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas”

De acuerdo a lo anterior, siempre que exista una diferencia de temperaturas entre cuerpos debe ocurrir una transferencia de calor, y no puede haber transferencia neta de calor entre dos medios que estén a la misma temperatura. El estudio de esta ciencia permite desarrollar relaciones matemáticas, con las cuales, es posible calcular las velocidades de transferencia de calor de un sistema a otro, y determinar los tiempos de enfriamiento o de calentamiento, así como las variaciones de temperatura en un sistema (Kern, 1999 e Incropera, 1999). La cantidad de calor transferido durante un proceso se denota por Q y la cantidad de calor transferido por unidad de tiempo se llama **razón de transferencia de calor** y se denota por \dot{Q} y tiene la unidad de J/s, lo cual es equivalente a W (Cengel, 2007). Cuando se cuenta con la razón de transferencia de calor, \dot{Q} , entonces se puede determinar la cantidad total de transferencia de calor Q durante un intervalo de tiempo Δt a partir de:

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt$$

2.2 Mecanismos de transferencia de calor

Existen diferentes tipos de procesos de transferencia de calor. Cuando existe un gradiente de temperatura en un medio estacionario, la transferencia de calor que se producirá a través de ese medio, se denominará *conducción*. En cambio, se denominará *convección* cuando la transferencia de calor ocurra entre una superficie y un fluido en movimiento que estén a diferentes temperaturas. El tercer modo de transferencia de calor se denomina radiación térmica. Todas las superficies con temperatura finita emiten energía en forma de ondas electromagnéticas. Por tanto, en ausencia de un medio, existirá una transferencia neta de calor por radiación entre dos superficies que se encuentren a diferentes temperaturas (Incropera, 1999).

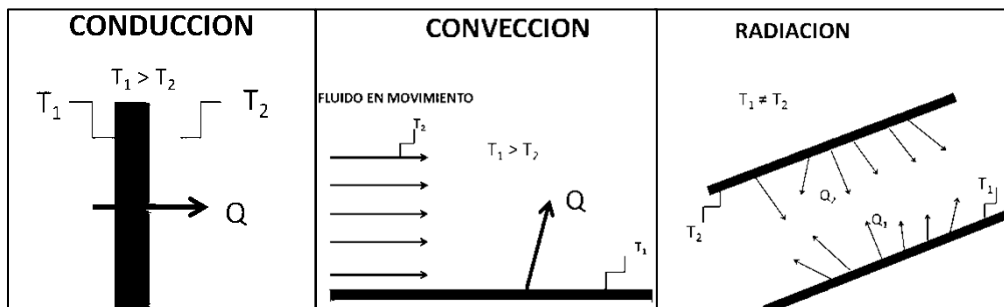


Figura 2. 1. Mecanismos de transferencia de calor

2.2.1 Conducción

La conducción se considera como la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. El nivel energético de una partícula está relacionado con el movimiento traslacional aleatorio, así como con los movimientos internos de rotación y vibración de las moléculas. Las temperaturas más altas se asocian con energías moleculares más altas y, cuando las moléculas vecinas chocan entre sí, ocurre una transferencia de energía de las moléculas más energéticas a las menos energéticas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las *colisiones* y a la *difusión* de las moléculas durante su movimiento molecular aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las *vibraciones* de las moléculas en una red y al transporte de energía por parte de los *electrones libres*. Es posible cuantificar los procesos de transferencia de calor en términos de las ecuaciones o modelos matemáticos. Estas ecuaciones o modelos sirven para calcular la cantidad de energía que se transfiere por unidad de tiempo. Para la conducción de calor, la ecuación o modelo se conoce como *ley de Fourier*:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx}$$

en donde \dot{Q}_{cond} (W/m^2) es el flujo de calor por unidad de área que se transfiere en la dirección x a través del área unitaria (A) perpendicular a la dirección de transferencia, y es proporcional al gradiente de temperatura, dT/dx . La constante de proporcionalidad k ($W/m \cdot K$) es la conductividad térmica del material, que es una medida de la capacidad de un material para conducir calor (Incropera, 1999 y Cengel, 2007).

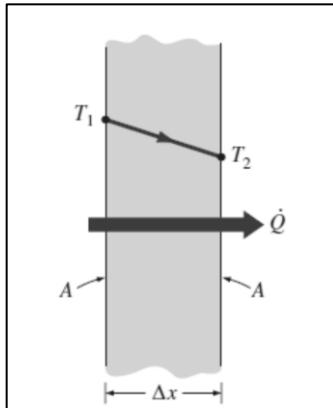


Figura 2. 2. Conducción de calor a través de una pared plana de espesor Δx y área A

En condiciones de estado estable, con una distribución de temperaturas lineal, como se muestra en la Figura 2.2, el gradiente de temperaturas se puede expresar como

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{\Delta x}$$

Y el flujo de calor por unidad de área entonces sería

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

2.2.2 Convección

La convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y un fluido adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la *conducción* y el *movimiento de fluidos*. Entre más rápido es el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección. En ausencia de cualquier movimiento masivo de fluido, la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido adyacente es por conducción pura. La presencia de movimiento masivo del fluido acrecienta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, pero también complica la determinación de las razones de esa transferencia. La rapidez de la transferencia de calor por convección se puede expresar mediante la *ley de enfriamiento de Newton* como

$$\dot{Q}_{conv} = hA(T_s - T_\infty)$$

en donde \dot{Q}_{conv} (W/m^2) es el flujo de calor convectivo por unidad de área, h es el *coeficiente de transferencia de calor por convección* ($W/m^2 \cdot ^\circ C$), A es el área superficial a través de la cual se da la transferencia convectiva, T_s es a temperatura de la superficie y T_∞ es la temperatura del fluido.

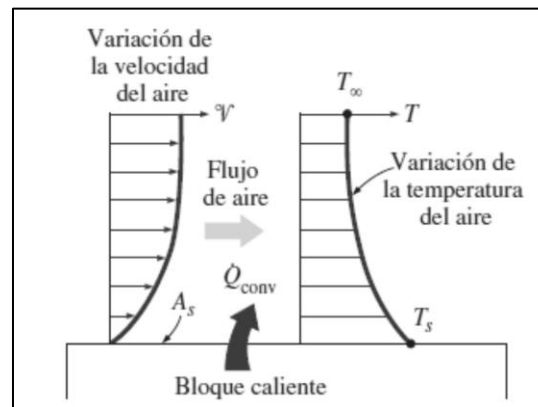


Figura 2. 3. Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección

Considerando un intercambio de calor convectivo entre una superficie caliente y un flujo de aire frío (Figura 2.3), donde $T_s > T_\infty$, primero habrá una transferencia de calor por conducción entre la superficie caliente y la capa de aire adyacente a la superficie, posteriormente esta energía será acarreada alejándola de la superficie, por convección; es decir, por los efectos combinados de la conducción dentro del aire, que se debe al movimiento aleatorio molecular de éste, y del movimiento masivo o macroscópico de ese aire que remueve el aire calentado cercano a la superficie y lo reemplaza por otro más frío.

La convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba o viento atmosférico. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido. Los procesos de transferencia de calor que comprenden *cambio de fase* de un fluido también se consideran como convección a causa del movimiento de ese fluido inducido durante el proceso (Cengel, 2007).

2.2.3 Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. La energía del campo de radiación es emitida por la materia en forma de *ondas electromagnéticas* (o *fotones*) como resultado de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de calor por radiación no requiere la presencia de un *medio interventor*.

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s es expresada por la *ley de Stefan-Boltzmann* como

$$\dot{Q}_{emitida,máx} = \sigma A_s T_s^4$$

donde σ es la constante de Stefan-Boltzman. La superficie idealizada que emite radiación a esta razón máxima se llama cuerpo negro, sin embargo, la radiación emitida por todas las superficies reales es menor que la emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura y se expresa como

$$\dot{Q}_{emitida,máx} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4$$

donde ε es la emisividad de la superficie, cuyo valor está en el intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$. Otra importante propiedad relativa a la radiación de una superficie es su absorptividad α , la cual es la fracción de la energía de radiación incidente sobre una superficie que es absorbida por ésta, su valor está en el intervalo $0 \leq \alpha \leq 1$, la razón a la cual una superficie absorbe la radiación se determina a partir de

$$\dot{Q}_{absorbida} = \alpha \dot{Q}_{incidente}$$

donde $\dot{Q}_{incidente}$ es la razón a la cual la radiación incide sobre la superficie y α es la absorptividad de la superficie. La diferencia entre las razones de la radiación emitida por la superficie y la radiación absorbida es la transferencia neta de calor por radiación. Cuando una superficie de emisividad ε y área superficial A_s , a una temperatura T_s , está por completo encerrada por una superficie mucho más grande, a una temperatura T_{alred} , y separada por un gas (como el aire) que no interfiere con la radiación, la razón neta de la transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se da por

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4)$$

por sencillez y conveniencia la ecuación suele reducirse mediante la definición de un coeficiente radiativo h_{rad}

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^2 + T_{alred}^2)(T_s^2 - T_{alred}^2)$$

$$\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^2 + T_{alred}^2)(T_s - T_{alred})(T_s + T_{alred})$$

$$\dot{Q}_{rad} = h_{rad} A_s (T_s - T_{alred})$$

donde el coeficiente radiativo h_{rad} es

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_s^2 + T_{alred}^2)(T_s + T_{alred})$$

nótese, que el coeficiente radiativo h_{rad} , el cual incluye los efectos de la radiación y depende marcadamente de las temperaturas superficiales (Incropera, 1999 y Cengel, 2007).

2.3 Consumo energético de edificaciones

Global

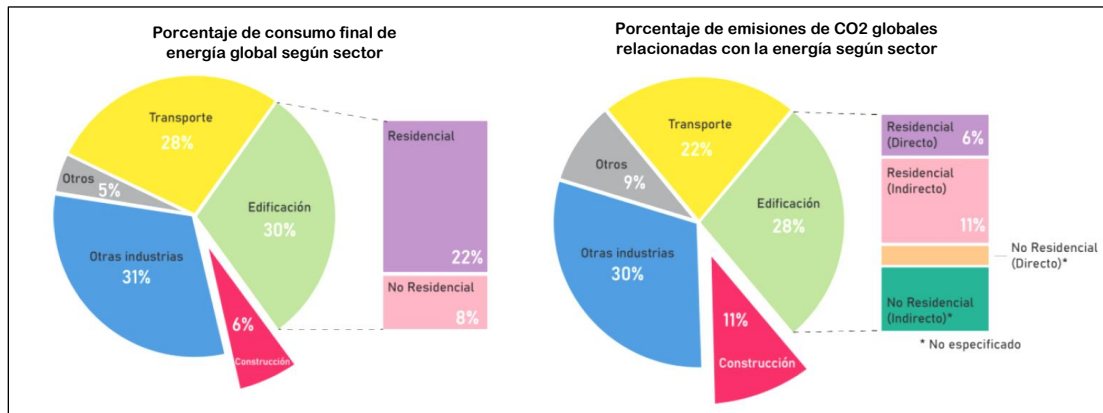


Figura 2. 4. Porcentaje de consumo y emisiones globales relacionados con la energía en la edificación

Actualmente a nivel global, el sector de la edificación representa casi un tercio del consumo total de energía final y más del 15% de las emisiones directas de CO₂, y su participación en las emisiones aumenta a alrededor del 28% si se incluyen las emisiones indirectas de la electricidad y el calor utilizados en los edificios (IEA, 2021). Hasta el 2015, el 82% del consumo final de energía en la edificación era suministrado por combustibles fósiles. Factores como el crecimiento poblacional, la migración del campo a la ciudad, el crecimiento del PIB, cambio en los estilos de vida, entre otros, aumentarán significativamente el uso energético de los edificios para el 2050 (Celaya, 2020).

Según la IEA, la intensidad energética por metro cuadrado (m²) del sector global de edificación, necesita mejorar en promedio en un 30% para el 2030 (en comparación con el 2015) para cumplir las ambiciones hacia el Acuerdo de París. En el acuerdo, los países firmantes se comprometen a reducir las emisiones, y con ello evitar que la temperatura global media supere los 2°C respecto a la época preindustrial. Este propósito implica la transición hacia sociedades bajas en carbono, donde el sector de la edificación puede realizar importantes contribuciones (IEA, 2021 y Celaya, 2020).

Dentro del sector de la edificación, la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero pertenecen a las emisiones indirectas generadas por la electricidad utilizada en los edificios. Actividades y servicios como la calefacción o refrigeración, iluminación, cocción de alimentos y calentamiento de agua, representaron valores significativos en el consumo final de energía. El establecimiento de medidas aplicadas al sector de la edificación, dirigidas al ahorro y eficiencia energética, podría contribuir significativamente a la disminución del consumo energético y las emisiones generadas por este sector (Celaya, 2020).

México

El sector residencial en México ocupa el tercer lugar entre los sectores de mayor consumo de energía final, después del sector transporte e industrial. En 2019, el sector residencial representó el 16% del total del consumo energético final (Figura 2.5). El sector residencial se considera el responsable de poco menos del 4% del total de las emisiones de GEI en el país.

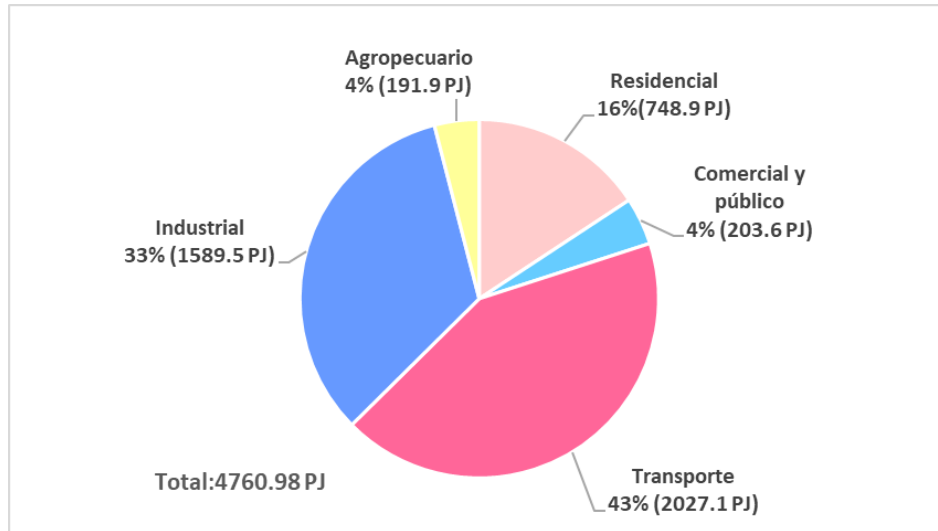


Figura 2. 5. Consumo final energético por sector, 2019
 Fuente: Elaboración propia con datos del SIE, SENER

Consumo de energía para climatización

Un estudio realizado por Calixto (2018) mostró que, las edificaciones en México consumen en promedio 63 kWh/m². En edificios con sistema de aire acondicionado el consumo de energía es de 73 kWh/ m² y en aquellos que no cuentan con sistema de aire acondicionado es de 41 kWh/m². Esto indica que en promedio el consumo de energía asociado a la climatización de espacios en un edificio es de 32 kWh/m², lo que representa el 44% del consumo total de energía de un edificio.

2.4 Simulación energética de edificaciones

La simulación energética es la modelización de un edificio y su entorno con el objetivo de analizar su comportamiento energético teórico. Se efectúa con programas de simulación, como LIDER, CALENER, TRNSYS, EnergyPlus, etc. La simulación energética tiene en cuenta tanto la geometría y los materiales que componen el edificio como, las condiciones climatológicas del exterior, además del uso del edificio (niveles de ocupación y horarios de funcionamiento, etc.) (Gavilán, 2015).

Importancia de la simulación energética

La simulación energética, puede ser una herramienta útil para mejorar la eficiencia energética de las edificaciones. Durante la etapa de diseño una simulación puede proveer información anticipada sobre el comportamiento térmico de un edificio en desarrollo, con lo cual, se podría conocer el consumo energético y el desempeño térmico de cualquier edificio y se podrían hacer mejoras de diseño en una etapa temprana. En edificaciones ya construidas, una simulación permitiría evaluar cualquier propuesta de mejoramiento energético, y permitiría hacer una mejor toma de decisiones.

Actualmente algunas certificaciones ambientales y energéticas, requieren datos obtenidos en una simulación previa, como consumo de energía o emisiones de CO₂, para realizar su evaluación energética y/o ambiental.

Tipo de simulaciones

Existen diversas metodologías para el cálculo del consumo de energía en edificios. Se puede hacer una distinción entre 2 tipos de métodos: 1) métodos directos y 2) métodos inversos. Los métodos directos parten del conocimiento detallado de los fenómenos físicos que determinan el comportamiento del sistema (ecuaciones de transferencia de masa y energía en el edificio) para predecir su respuesta frente a variables de entrada: geometría del edificio, clima, características ocupacionales y funcionales, instalaciones lumínicas y térmicas, sistema de control, etc. Este enfoque directo no necesita que el edificio esté construido para predecir su comportamiento, resultando aplicable tanto a edificios nuevos como existentes. Por el contrario, los métodos inversos describen matemáticamente el sistema a partir del conocimiento de las variables de entrada y salida y sólo pueden aplicarse a edificios existentes (Gavilán, 2015).

2.5 Energy plus

Es un software de estudio energético gestionado por el Departamento de la Energía de Estados Unidos (U.S. Department of Energy). Tiene sus raíces tanto en el programa BLAST como en DOE-2. BLAST (Building Loads Analysis and System Thermodynamics) y DOE-2 fueron desarrollados y puestos a disposición de sus usuarios entre finales de 1970 y principios de 1980, como herramientas de simulación energética. Al igual que BLAST Y DOE-2, EnergyPlus es un programa de análisis energético y simulación de carga térmica. Basándose en la descripción del edificio desde un punto de vista de sus elementos constructivos, sistemas energéticos asociados, etc., EnergyPlus calcula las cargas de calefacción y refrigeración necesarias para mantener las condiciones de confort térmico, condiciones de refrigeración del sistema secundario de climatización, y el consumo de energía en los equipos de generación, así como muchos otros detalles.

Algunas de las características de la primera versión de EnergyPlus son:

- El espacio de tiempo usado como paso de iteración para el cálculo de la interacción entre las zonas térmicas y el medio ambiente es definido por el usuario.
- Los pasos de tiempo para las interacciones entre las zonas térmicas y los sistemas de HVAC se varían automáticamente para garantizar la estabilidad de las soluciones.
- Utiliza ficheros de texto ASCII para la climatología, entrada y salida, que incluyen por hora o sub-horas las condiciones ambientales, y los informes estándar definidos por el usuario.
- Solución basada en el balance de calor para las cargas térmicas del edificio que permite el cálculo simultáneo de los efectos radiantes y convectivos, tanto en el interior como en la superficie exterior durante cada iteración de tiempo.
- Mejora del modelado de transferencia de calor a través del suelo mediante llamadas a análisis en modelos 3D de suelo y técnicas de análisis simplificadas.
- Modelo de transferencia de calor y masa combinados para el estudio de la adsorción o desorción de humedad, ya sea como una integración capa a capa en la función de transferencia por conducción o como un modelo de penetración efectiva de la humedad (EMPD).
- Modelos de confort térmico basados en la actividad, temperatura de bulbo seco en el interior, humedad, etc.
- Modelo anisotrópico de cielo para mejorar el cálculo de la energía solar difusa en las superficies inclinadas.
- Cálculo avanzado de las aperturas incluyendo persianas controlables, acristalamientos electrocrómicos, balances térmicos capa a capa que permiten la asignación adecuada de la energía solar absorbida por los cristales de las ventanas, y una biblioteca de rendimientos para numerosas ventanas disponibles comercialmente.
- Controles de iluminación natural, incluyendo cálculos de iluminancia interior, la simulación y control de deslumbramiento, controles de luminarias, y el efecto de la reducción de la iluminación artificial en calefacción y refrigeración.
- Sistemas HVAC con recirculación (convencionales y radiantes) que permiten a los usuarios a modelar sistemas típicos y sistemas ligeramente modificados.
- Cálculos que predicen la contaminación atmosférica de CO₂, SO_x, NO_x, CO, partículas, y producción de hidrocarburos, tanto en el lugar como la conversión de energía a distancia.
- Enlaces a otros entornos de simulación populares y componentes como WINDOW5, WINDOW6 y dellIGHT para permitir un análisis más detallado de los componentes constructivos.

Sin embargo, es importante aclarar que EnergyPlus no es una interfaz de usuario. Está destinado a ser el motor de simulación, en torno a la que una interfaz de terceros pueda ser utilizada. Las entradas y salidas son de texto ASCII, sencillo, descifrado, en formato IDF (Input Data File). Por tanto, se requiere el uso de una interfaz gráfica para el manejo de EnergyPlus, algunas de las interfaces gráficas que utilizan Energy Plus como motor de cálculo son: Design Builder, CYPE y OpenStudio (Gavilán, 2015).

2.6 DesignBuilder

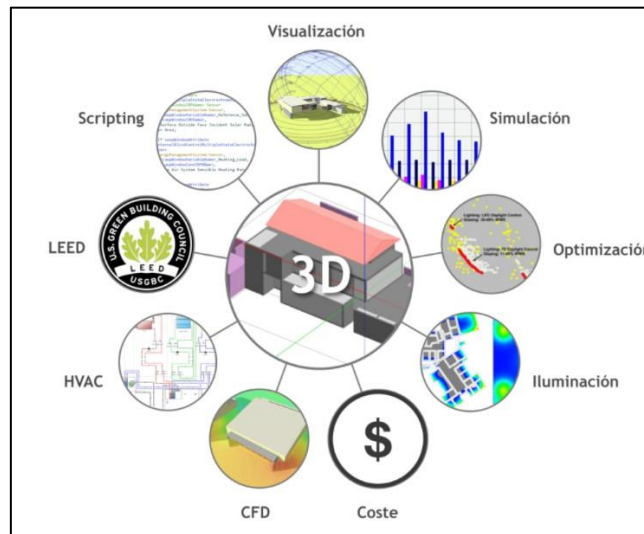


Figura 2. 6. Módulos de cálculo de la interfaz DesignBuilder

DesignBuilder es una interfaz gráfica que utiliza el motor de simulación energética EnergyPlus. DesignBuilder tiene una estructura modular, con un avanzado modelador 3D que funciona como núcleo y un conjunto de módulos de análisis acoplados a él. Actualmente el programa cuenta con 9 módulos Figura 2.6.

Simulación DesignBuilder

El módulo simulación de la interfaz permite:

- Evaluar el desempeño ambiental y energético de edificios, mediante simulaciones dinámicas en tiempo real con base en archivos de datos climáticos horarios.
- Calcular las demandas y consumos energéticos, así como las emisiones de carbono, asociados a los sistemas de climatización, iluminación y agua caliente sanitaria.
- Evaluar diversas estrategias de climatización pasiva, como la ventilación natural, el aprovechamiento de las ganancias solares, el sombreado y el uso de masa térmica.
- Evaluar el nivel de aprovechamiento de la iluminación natural en el edificio y la correspondiente disminución del uso de la iluminación artificial.
- Calcular el dimensionado de los sistemas de calefacción y refrigeración, a partir de condiciones climáticas de diseño.

2.6 Confort térmico

De acuerdo al estándar ASHRAE 55 el confort térmico se puede definir como: “Aquella condición de la mente que proporciona satisfacción con el ambiente térmico”. Sin embargo, esta definición se puede considerar ambigua ya que se deja abierto tanto el significado de condición de la mente, como el de satisfacción, pero lo que sí se deduce correctamente es que el juicio del confort es un proceso cognitivo influido por distintos tipos de procesos, por ejemplo, físicos, fisiológicos o incluso psicológicos. Las expectativas de confort dependen de varias circunstancias como, por ejemplo, el lugar donde se encuentre el ser humano, los motivos que hacen que se encuentre en dicho lugar, la época del año, etc. Sin embargo, según diversos estudios, aunque los climas, las condiciones de vida y las culturas difieran bastante a lo largo del mundo, la temperatura que la gente elige para el confort bajo condiciones similares de vestimenta, actividad, humedad y velocidad de aire es muy parecida (Castilla, 2010 y Ashrae, 2013).

Índices de confort térmico

Han sido muchos los autores que han abordado el problema del cálculo de las condiciones de confort térmico en un determinado entorno, existiendo varios índices y modelos en la bibliografía. Para los fines de esta investigación, se ha decidido utilizar el modelo propuesto por Nicol, (2004), en su trabajo el autor desarrolló un método adaptativo para determinar las condiciones de confort en regiones con clima cálido-húmedo basándose en los resultados de su estudio de campo, en el cual, se realizaron encuestas de comodidad. El método adaptativo determina la temperatura optima o de confort de la siguiente manera:

$$T_n = 0.534T_{amb} + 12.9$$

Donde T_n es la temperatura neutra o de confort y T_{amb} es el promedio mensual de la temperatura ambiente exterior. El rango de temperatura de la zona de confort (Z_c) se obtiene sumando o restando 2 °C a la temperatura neutra, de la siguiente manera:

$$Z_c = T_n \pm 2^\circ\text{C}$$

En la Tabla 2.1. Se muestra el intervalo de confort calculado con las temperaturas promedio de Cuernavaca, Morelos, México.

Tabla 2. 1. Temperaturas de confort Cuernavaca, Morelos

Mes	T ambiente	Temperaturas de confort		
		Mínima	Optima	Máxima
Enero	18.47	20.76	22.76	24.76
Febrero	20.74	21.97	23.97	25.97
Marzo	22.00	22.65	24.65	26.65
Abril	25.11	24.31	26.31	28.31
Mayo	25.71	24.63	26.63	28.63
Junio	22.05	22.68	24.68	26.68
Julio	21.94	22.62	24.62	26.62
Agosto	21.75	22.51	24.51	26.51
Septiembre	21.08	22.16	24.16	26.16
Octubre	21.38	22.31	24.31	26.31
Noviembre	19.94	21.55	23.55	25.55
Diciembre	20.72	21.96	23.96	25.96

Capítulo 3

Modelo físico del techo verde ventilado

El techo verde ventilado propuesto en este trabajo se compone de un techo primario de concreto, un techo secundario con cubierta vegetal y un canal de aire que separa ambos techos. En la Figura 3.1 se muestra el modelo físico y los flujos de calor involucrados en el sistema, posteriormente se describe el balance de energía del mismo.

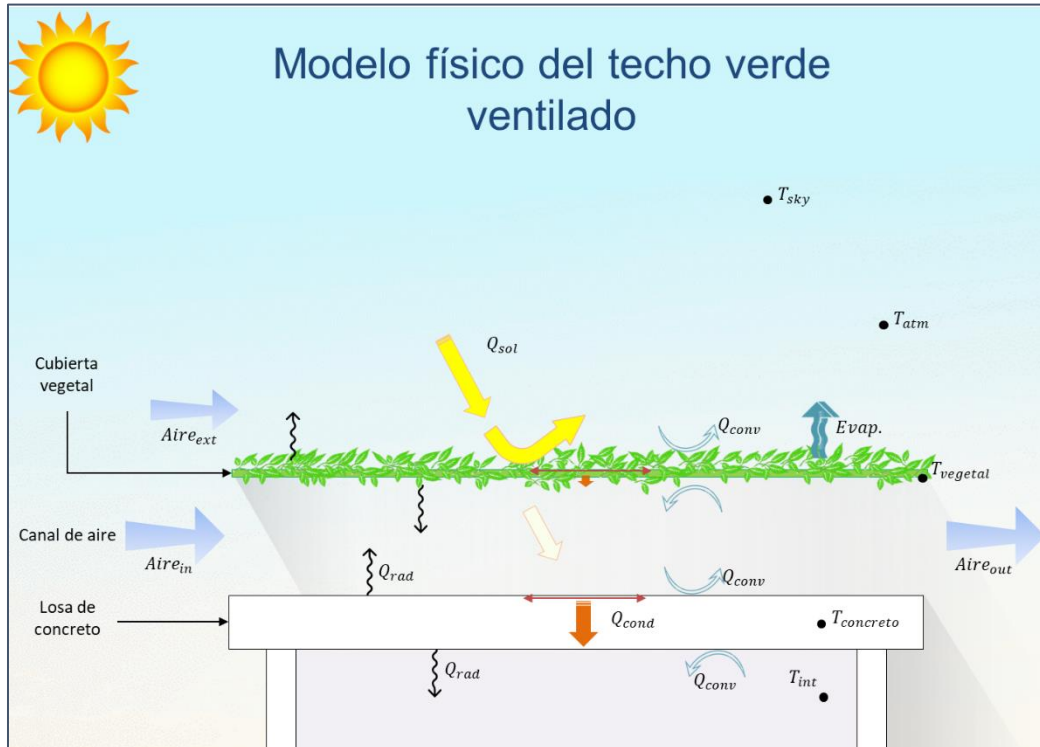


Figura 3. 1. Modelo físico del techo verde ventilado

3.1 Balance de energía

Para este trabajo se consideran los tres mecanismos de transferencia de calor y nos interesa conocer las temperaturas T_{sky} , T_{atm} , $T_{vegetal}$, $T_{concreto}$, T_{int} .

3.1.1 Radiación

En nuestro balance de energía se considera un flujo de radiación solar directa Q_{sol} y un flujo de radiación solar difusa Q_{rad} que impacta sobre la cubierta vegetal, estos flujos de calor dependerán del gradiente térmico entre la temperatura de la bóveda celeste T_{sky} y la temperatura de la cubierta vegetal $T_{vegetal}$, ambos flujos serán en cierta proporción, transmitidos, absorbidos, reflejados y emitidos por la cubierta vegetal, una porción del flujo radiativo llegará al techo de concreto, el cuál

emitirá radiación difusa hacia el interior de la edificación. Es importante mencionar que la radiación solar influiría en un proceso denominado evapotranspiración vegetal, que se describe más adelante.

3.1.2 Convección

Habrà transferencia de calor convectiva debido a los flujos de aire sobre la cubierta vegetal, dentro del canal y dentro de la edificación, los 3 flujos convectivos son:

- 1) Convección sobre la superficie vegetal: en esta región el flujo convectivo depende del gradiente térmico entre la temperatura atmosférica T_{atm} y la temperatura de la cubierta vegetal $T_{vegetal}$ y el coeficiente convectivo depende entre otros factores de la velocidad del flujo de aire exterior, la rugosidad de la cubierta y el proceso de evapotranspiración vegetal.
- 2) Convección dentro del canal de aire: en esta región el gradiente de temperatura se presenta por la diferencia entre la temperatura de la cubierta vegetal y la temperatura del concreto y el coeficiente convectivo depende entre otros factores de la velocidad del flujo del aire interior y la rugosidad del concreto.
- 3) Convección al interior de la edificación: el gradiente térmico entre la temperatura del concreto $T_{concreto}$ y la temperatura interna del edificio T_{int} , el coeficiente convectivo interno depende entre otros factores de la velocidad del viento al interior y de la rugosidad del concreto.

3.1.3 Conducción

El fenómeno de conducción al igual que la convección se presenta en dos regiones del sistema:

- 1) Conducción en la cubierta vegetal: este proceso se presenta debido al gradiente térmico en la cubierta vegetal, este flujo considera el espesor, calor específico, densidad y conductividad térmica de la especie vegetal.
- 2) Conducción en la losa de concreto: este proceso se presenta debido al gradiente térmico entre temperatura de la superficie exterior de la losa de concreto y la temperatura de la superficie interior de la misma, en este flujo se considera el espesor, calor específico, densidad y conductividad térmica del concreto.

3.1.4 Evapotranspiración vegetal

La evapotranspiración se define como la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa, junto con la pérdida de agua por transpiración de la vegetación. Este fenómeno depende de factores físicos (radiación solar, temperatura ambiente, velocidad del viento y humedad) y de factores biológicos (cobertura vegetal y conductancia estomática) (Domingo, 2002). La evapotranspiración influye en el balance de energía e involucra un proceso de cambio de fase.

3.2 Modelación matemática del techo verde ventilado en DesignBuilder

En la Figura 3.2 se muestra la modelación matemática del techo verde ventilado mediante las herramientas de cálculo que ofrece el software Energy Plus-DesignBuilder. A continuación, se detalla el modelo matemático utilizado para realizar el balance de energía en la losa de concreto, así como el modelo matemático para calcular la temperatura de cielo (T_{sky}). Toda la información de los modelos matemáticos fue obtenida del documento Engineering Reference Energy Plus publicado por el U.S. Department of Energy (2019).

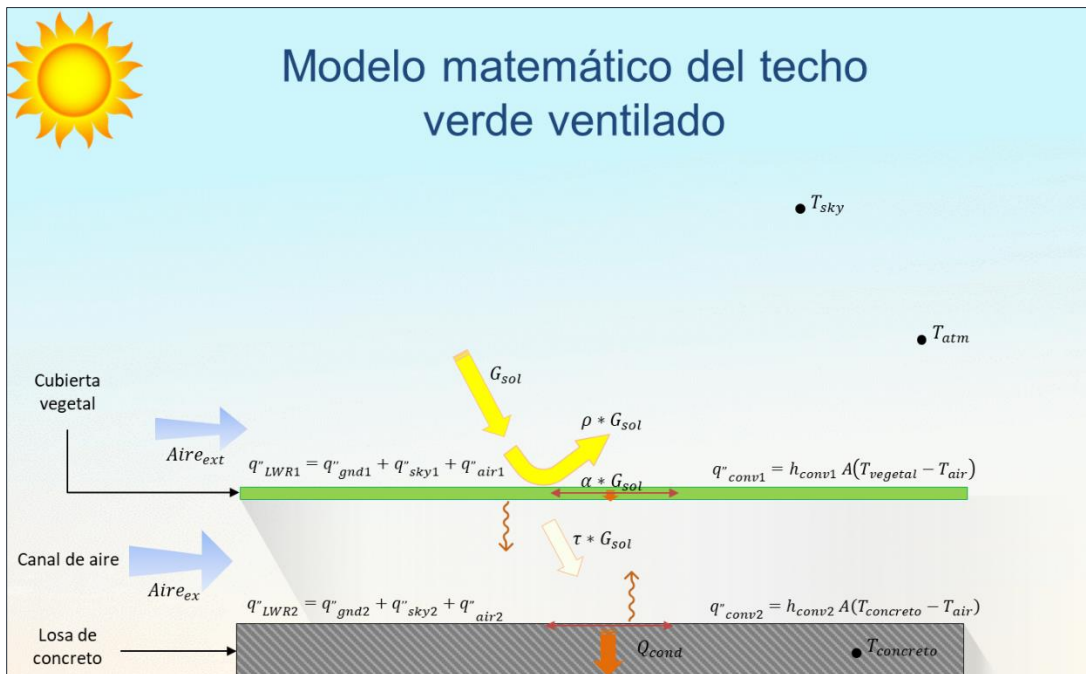


Figura 3. 2. Modelo matemático del techo verde ventilado

3.2.1 Balance de energía en la losa de concreto

El balance de energía en la losa de concreto considera intercambios de calor por convección (q''_{conv}), radiación de onda larga (q''_{LWR}), radiación solar directa y difusa ($q''_{\alpha sol}$), y flujo de calor por conducción a través de la losa (q''_{ko}). El balance queda establecido por la siguiente ecuación:

$$q''_{conv} + q''_{LWR} + q''_{\alpha sol} - q''_{ko} = 0$$

donde:

q''_{conv} = flujo de calor por convección

q''_{LWR} = flujo de calor por radiación de onda larga

$q''_{\alpha sol}$ = flujo de calor por radiación solar directa y difusa

q''_{ko} = flujo de calor por conducción a través de la losa

Intercambio de calor por convección

La transferencia de calor por convección superficial se modela utilizando la fórmula clásica:

$$q''_{conv} = h_{convext} A(T_{surf} - T_{air})$$

donde:

q''_{conv} = flujo de calor por convección exterior

$h_{convext}$ = coeficiente de convección exterior

A = área de superficie

T_{surf} = temperatura de la superficie

T_{air} = temperatura del aire exterior

Se ha realizado una investigación numerosa sobre la estimación del coeficiente de convección en superficies exteriores. Energy Plus, ofrece una amplia selección de métodos para determinar los valores del coeficiente de convección exterior ($h_{convext}$). Dentro de éstos se encuentran los modelos 1) Simple combinado, 2) TARP, 3) MoWITT, 4) DOE-2 y 5) Algoritmo adaptativo.

Intercambio de calor por radiación de onda larga

Este flujo de calor por radiación de onda larga se calcula a partir de la absorptancia de la superficie, las temperaturas superficiales, las temperaturas del cielo y del suelo y los factores de vista del cielo y del suelo. El flujo de calor radiativo de onda larga total es la suma de los componentes debido al intercambio de radiación con el suelo, el cielo y el aire. La ecuación que describe el flujo de calor total por radiación de onda largas es la siguiente:

$$q''_{LWR} = q''_{gnd} + q''_{sky} + q''_{air}$$

donde:

q''_{sky} = intercambio radiativo con el suelo

q''_{sky} = intercambio radiativo con el cielo

q''_{sky} = intercambio radiativo con el aire

Aplicando la ley de Stefan -Boltzmann a cada componente se obtiene:

$$q''_{LWR} = \varepsilon\sigma F_{gnd}(T_{gnd}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon\sigma F_{sky}(T_{sky}^4 - T_{surf}^4) + \varepsilon\sigma F_{air}(T_{air}^4 - T_{surf}^4)$$

donde:

ε = emisividad de la superficie

σ = constante de Stefan – Boltzmann

F_{gnd} = Factor de vista de la superficie externa a la superficie del suelo

F_{sky} = Factor de vista de la superficie externa al cielo

F_{air} = Factor de vista de la superficie externa al aire

T_{surf} = temperatura de la superficie externa

T_{gnd} = temperatura de la superficie del suelo

T_{sky} = temperatura del cielo

T_{air} = temperatura del aire

Mediante coeficientes de transferencia de calor se linealiza la ecuación anterior, quedando la siguiente expresión:

$$q''_{LWR} = h_{r,gnd}(T_{gnd} - T_{surf}) + h_{r,sky}(T_{sky} - T_{surf}) + h_{r,air}(T_{air} - T_{surf})$$

Donde:

$$h_{r,gnd} = \frac{\varepsilon\sigma F_{gnd}(T_{surf}^4 - T_{gnd}^4)}{T_{surf} - T_{gnd}}$$

$$h_{r,sky} = \frac{\varepsilon\sigma F_{sky}(T_{surf}^4 - T_{sky}^4)}{T_{surf} - T_{sky}}$$

$$h_{r,air} = \frac{\varepsilon\sigma F_{air}(T_{surf}^4 - T_{air}^4)}{T_{surf} - T_{air}}$$

Intercambio de calor por radiación solar directa y difusa

La ganancia solar total de la superficie exterior es una combinación de la radiación directa y difusa absorbida por la superficie. Esta ganancia térmica está influenciada por la ubicación, el ángulo de orientación e inclinación de la superficie, las propiedades del material, condiciones climáticas, etc. La ganancia solar total está definida por la siguiente ecuación:

$$q''_{sol} = \alpha \cdot (I_b \cdot \cos A \frac{S_s}{S} + I_s \cdot F_{ss} + I_g \cdot F_{sg})$$

donde:

α = absorptancia solar de la superficie

A = ángulo de incidencia de los rayos del sol

S = área de la superficie

S_s = área soleada de la superficie

I_b = intensidad de la radiación solar directa

I_s = intensidad de la radiación difusa

I_g = intensidad de la radiación difusa reflejada por el suelo

F_{ss} = factor de vista entre la superficie y el cielo

F_{sg} = factor de vista entre la superficie y el suelo

Capítulo 4





Desarrollo experimental

En este capítulo se presentan a detalle las 4 etapas experimentales del proyecto; 1) Periodo de adaptación de las plantas, 2) Proceso de selección de plantas, 3) Construcción e instrumentación de las cavidades experimentales y 4) Monitoreo térmico del techo verde ventilado acoplado a una cavidad experimental.

4.1 Plantas de estudio

Se seleccionaron 4 plantas tipo enredadera (con disponibilidad en el estado de Morelos) que cumplieron la característica de ser tolerantes a la luz directa del sol, en la Tabla 4.1 se enlistan las 4 especies de estudio:

Tabla 4. 1. Plantas de estudio

Nombre de la especie	Familia	Origen	Apariencia
Dipladenia (<i>Mandevilla sanderi</i>)	<i>Apocynaceae</i>	Centroamérica y Sudamérica	
Santa Elena (<i>Thunbergia grandiflora</i>)	<i>Acanthaceae</i>	Sur de Asia: Indochina, Myanmar, China, Nepal.	
Mburucuyá (<i>Passiflora alliacea</i>)	<i>Passifloraceae</i>	México	
Cissus	<i>Vitaceae</i>	Sur de Asia, Australia y Nueva Guinea	

4.2 Periodo de adaptación

Durante el periodo noviembre 2020–abril 2021, se evaluó el comportamiento de las 4 plantas de estudio, con el objetivo de seleccionar la especie más apta para el proyecto. La primera etapa del proceso consistió de un periodo de adaptación en el cual las plantas fueron sometidas a condiciones de pleno sol, para ello, las plantas fueron colocadas en la azotea del edificio mecánica Cenidet recibiendo más de 8 horas de radiación solar al día (Figuras 4.1 A y 4.1 B).



Figura 4. 1. Plantas sometidas a condiciones de pleno sol

Durante el proceso de adaptación, se llevó registro de los cuidados y los cambios físicos que presentaron cada una de las plantas, en la Tabla 4.2 se puede apreciar dicho formato de registro. La información recopilada fue utilizada para aportar información sobre los cuidados especiales y ritmo de crecimiento de cada planta.

Tabla 4. 2.-Registro de cuidados y observaciones

Fecha: <i>Miércoles 02/Diciembre/2020</i>		Clima: <i>Despejado</i>	
Descripción del cuidado: <i>se regaron las plantas aproximadamente a las 11:30 am se aplicó insecticida a la especie Passiflora</i>			
Especie	#	Estado	Observaciones
Passiflora	1	Regular	<i>Las plantas 1 y 2 se ven en estado regular, sin embargo las hojas se ven decaídas, no ha florecido ninguna de las 3, se observan varias hojas carcomidas</i>
	2	Regular	
	3	Regular	
Santa Elena	1	Buena	<i>Planta 1 algunas hojas secas, planta 2 presenta algunas hojas amarillas. En general se observan en buen estado</i>
	2	Buena	
	3	Buena	
Dipladenia	1	Buena	<i>Buen estado las 4 plantas, la planta 3 y 4 presenta algunas hojas secas</i>
	2	Buena	
	3	Buena	
	4	Buena	
Cissus	1	Buena	<i>Buen estado, plantas 1 y 2 presentan muchas hojas con puntos rojos, plantas 3 y 4 también presentan hojas con puntos rojos pero en menor cantidad</i>
	2	Buena	
	3	Buena	
	4	Buena	

4.2.1 Requerimientos de riego

Con la información recopilada se realizó una tabla con los requerimientos de riego de cada una de las plantas. Es importante mencionar que las plantas presentaron diferentes comportamientos durante la temporada de invierno y durante la temporada de primavera, se destaca que las condiciones climatológicas de cada una de las temporadas son altamente influyentes en el desarrollo de las plantas.

Tabla 4. 3.Demanda semanal de agua por especie

Especie	Demanda semanal de agua (l)	
	Invierno	Primavera
<i>Passiflora</i>	4.5	6
<i>Santa Elena</i>	3.75	5
<i>Dipladenia</i>	3	4
<i>Cissus</i>	3	4

En la Tabla 4.3 se muestra la demanda semanal de agua que requirió cada especie durante la temporada de invierno y primavera, se puede observar, que las especies *Cissus* y *Dipladenia* tuvieron la menor demanda hídrica tanto en invierno como en verano, mientras que, por el contrario, la especie *Passiflora* requirió hasta un 50% más de agua en comparación con éstas. La especie Santa Elena requirió un 25% más de agua respecto a las especies de menor consumo. Es importante destacar que con el cambio de estación invierno-primavera las plantas aumentaron la demanda de agua hasta en un 33%.

4.2.2 Adaptación al ambiente

Cada especie mostró una respuesta diferente a las condiciones ambientales y factores biológicos presentes en la zona de estudio. La Tabla 4.4 muestra los síntomas observados durante el periodo Noviembre-Febrero y en la Tabla 4.5 los observados durante el periodo Marzo-Abril.

Tabla 4. 4.Adaptación al ambiente en invierno

Especie	Síntomas observados		
	Factores Ambientales	Factores Biológicos	*Crecimiento
<i>Passiflora</i>	Adelgazamiento y tono amarillento en hojas	Presencia de hojas carcomidas	Bueno
<i>Santa Elena</i>	En una planta, ramas marchitas	----	Regular
<i>Dipladenia</i>	Interrupción temporal de floración	----	Poco
<i>Cissus</i>	----	Presencia del hongo de la Roya	Muy poco

Tabla 4. 5. Adaptación al ambiente en primavera

Adaptación al ambiente primavera			
Especie	Síntomas observados		
	Factores Ambientales	Factores Biológicos	*Crecimiento
Passiflora	Tono amarillento y ramas marchitas y secas en un 80%	----	Muy poco
Santa Elena	Aparición de floración	----	Regular
Dipladenia	Aumento de floración	----	Muy bueno
Cissus	---	----	Bueno

Como se observa en las Tablas 4.4 y 4.5, las condiciones estacionales influyen notablemente en el desarrollo de las plantas. Durante el periodo de invierno la especie Passiflora fue la de mayor crecimiento, mientras que, durante la primavera fue la que menor crecimiento presentó. Además, las especies Cissus, Santa Elena y Dipladenia tuvieron un mayor crecimiento durante la temporada de primavera e incluso las especies Santa Elena y Dipladenia aumentaron su floración durante dicha temporada. A continuación, se describen a detalle los síntomas observados en cada una de las plantas.

Passiflora

En esta especie se apreciaron cambios físicos en las hojas, éstas tomaron un tono ligeramente amarillento, como se aprecia en la Figura 4.2, y un ligero adelgazamiento (percibible al tacto). De acuerdo a la literatura, estos síntomas aparecen habitualmente en condiciones de exceso de sol. Otro síntoma notorio, fue la aparición de agujeros en las hojas (Figura 4.3), estos agujeros evidenciaron la presencia de insectos come-hojas en el ambiente.



Figura 4. 2.Hojas amarillentas Passiflora

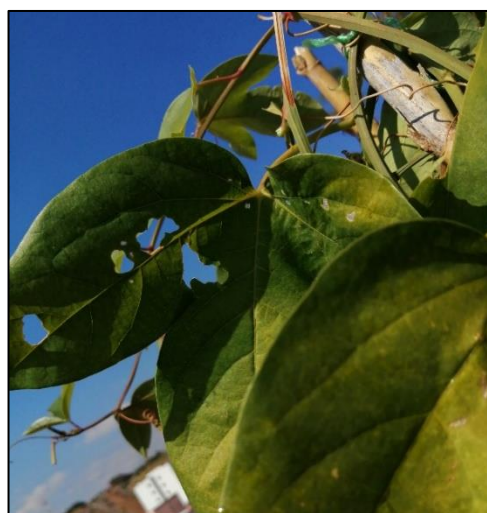


Figura 4. 3.Hojas carcomidas Passiflora

Santa Elena

En esta especie no se apreció ningún síntoma de importancia durante el proceso de adaptación, tampoco se notó la aparición de hojas carcomidas, lo que sugirió una excelente adaptación a las condiciones ambientales. Sin embargo, más adelante, durante la temporada de primavera, las ramas de una planta se secaron Figura 4.4, tal vez, debido al cambio de ubicación de la misma.



Figura 4. 2.Rama marchita, Santa Elena

Dipladenia

El cambio más perceptible en esta especie, fue la ausencia de floración durante la temporada invernal, sin embargo, después de ese lapso comenzaron a aparecer nuevamente flores, como se muestra en las Figuras 4.5 y 4.6. La especie tuvo un crecimiento lento durante la temporada de invierno, sin embargo, en temporada de primavera mostró un crecimiento acelerado.



Figura 4. 5.Flores de Dipladenia



Figura 4. 6.Flor de Dipladenia

Cissus

La especie *Cissus* fue la de menor crecimiento durante el periodo de adaptación, esto se debió, quizás, a la aparición de un hongo conocido como Roya. Este hongo produjo manchas rojizas en el 70% (aprox.) de las hojas de las 4 plantas como se observa en la Figuras 4.7 y 4.8.



Figura 4. 7.Roya en planta *Cissus*

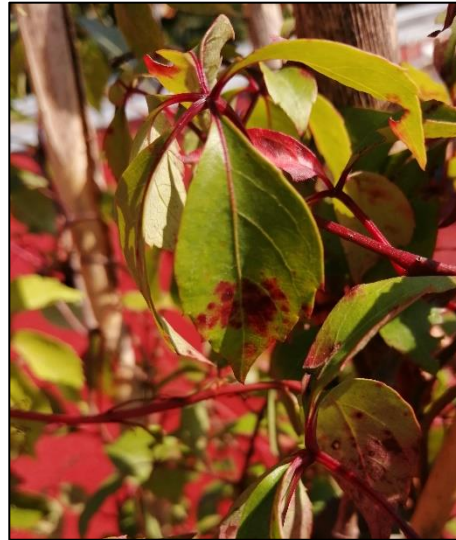


Figura 4. 8.Roya en hoja de *Cissus*

4.2.3 Control biológico

Para controlar la propagación de los insectos come hoja y el hongo de la Roya, fue necesario la aplicación periódica de insecticidas y fungicidas, éstos se muestran en las Figuras 4.9 y 4.10, dichos productos fueron aplicados en todas las plantas para evitar que el hongo se propagara entre especies y que los insectos come-hojas migraran de planta. Con estos productos se frenó la propagación de las plagas y se evitaron mayores repercusiones a las plantas.



Figura 4. 9.Fungicida



Figura 4. 10.Abono-Insecticida

4.3 Proceso de selección de plantas

A continuación, se detalla el proceso de selección de plantas, el cual estuvo ideado para evaluar el comportamiento térmico y la capacidad de adaptación y resistencia de las plantas bajo condiciones de pleno sol (más de 8 horas de radiación solar directa). Durante este proceso se realizaron dos periodos de monitoreo térmico, el primero durante el mes de enero (invierno), el segundo en el mes de marzo (primavera), y también, se realizó un proceso de determinación de fracción de claros mediante fotografías. En los siguientes apartados se detallan la metodología, instrumentación y parámetros considerados durante este proceso.

4.3.1 Monitoreo térmico

Durante el monitoreo térmico las 4 especies de enredaderas fueron colocadas en módulos de prueba, para ello, se colocaron 4 macetas (de cada especie) distribuidas bajo las 4 esquinas de un soporte metálico cuadrangular (1.20m x 1.20m) como se aprecia en las Figuras 4.11 y 4.12.

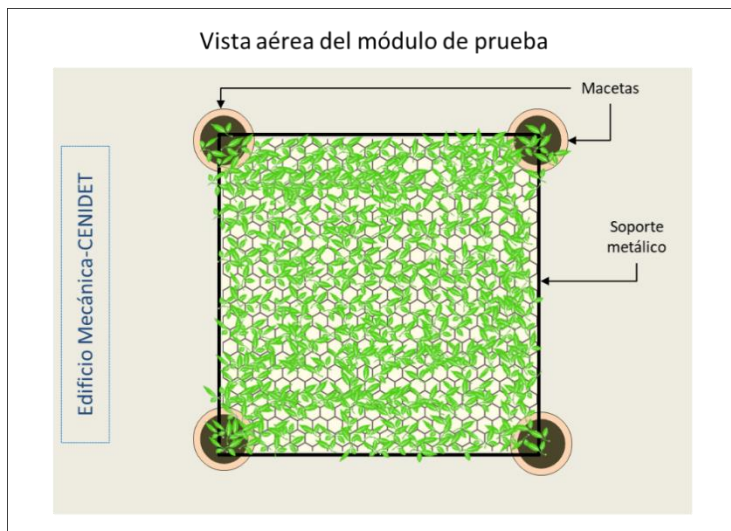


Figura 4. 11. Vista aérea de los módulos de prueba



Figura 4. 12. Módulos de prueba instalados

Parámetros monitoreados

Los parámetros considerados durante el monitoreo térmico fueron:

- Temperaturas del módulo de prueba

y las variables ambientales obtenidas de la estación meteorológica Vaisala Maws100 (ubicada en el sitio de prueba):

- Temperatura y humedad del aire
- Velocidad del viento
- Radiación solar

4.3.2 Instrumentación

Para la instrumentación de los módulos de prueba, se utilizaron termopares tipo T conectados a un adquisidor de datos Agilent y sensores de temperaturas tipo DSB18B20 conectados a una placa Arduino Mega. En las Figuras 4.13 y 4.14 se aprecia la disposición de los sensores, se colocó un sensor a ras de la losa, otro sensor a 15 cm de altura respecto a la losa, para medir la temperatura del canal de aire, un tercer sensor colocado en la cubierta vegetal y un sensor colocado a 35 cm de altura por encima de la cubierta vegetal. En el siguiente apartado se detalla el diagrama de conexión y la programación de los sensores tipo DSB18B20 con la placa Arduino Mega.

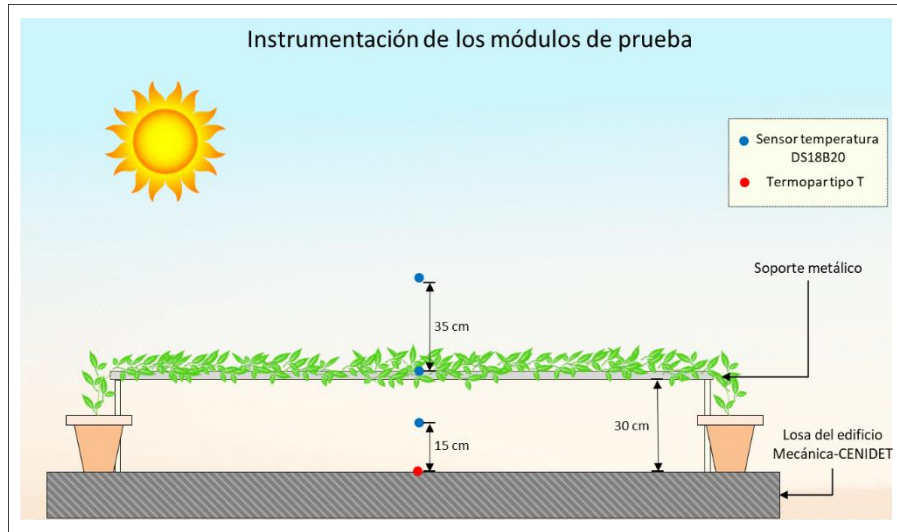


Figura 4. 3. Instrumentación de los módulos de prueba



Figura 4. 4. Módulos de prueba instrumentados

Sensores DSB18B20

La colocación de los sensores DSB18B20 se realizó utilizando una placa Arduino Mega para esto se construyó un circuito eléctrico basado en el diagrama eléctrico de la Figura 4.15 y se programó un código para registrar y almacenar los datos de temperatura cada dos minutos. En la Figura 4.16 se aprecia un fragmento del código programado mediante la plataforma de código abierto Arduino.

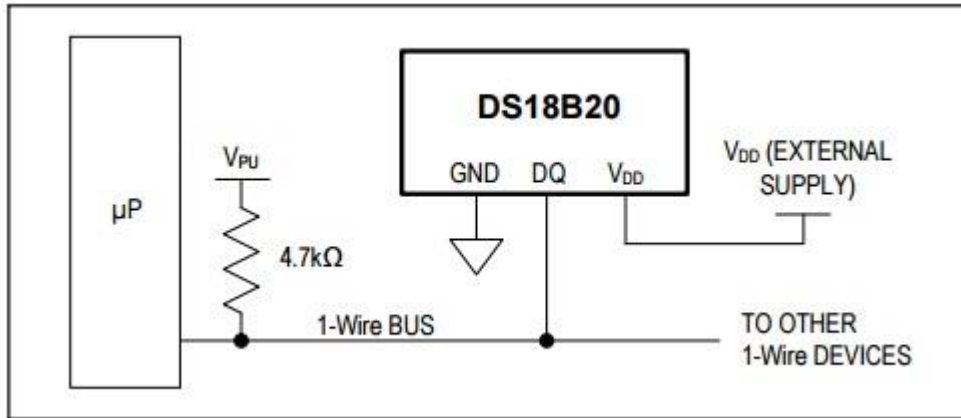


Figura 4. 15.Diagrama de conexión de sensores tipo DSB18B20

```

Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
TempTestOneWirememoria1
#include <OneWire.h>
#include <DallasTemperature.h>
#include <SPI.h> // incluye libreria interfaz SPI
#include <SD.h> // incluye libreria para tarjetas SD

#define SSpin 53 // Slave Select en pin digital 53
File archivo; // objeto archivo del tipo File

OneWire ourWire1(22); //Se establece el pin 22 como bus OneWire sensores 2-6
OneWire ourWire2(23); //Se establece el pin 23 como bus OneWire sensores 7-14

DallasTemperature sensors1(&ourWire1); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor
DallasTemperature sensors2(&ourWire2); //Se declara una variable u objeto para nuestro sensor

DeviceAddress address2 = {0x28, 0x8E, 0xF4, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0x6C}; //dirección del sensor 2
DeviceAddress address3 = {0x28, 0xAD, 0xBF, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0x1A}; //dirección del sensor 3
DeviceAddress address4 = {0x28, 0x53, 0xDB, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0x75}; //dirección del sensor 4
DeviceAddress address5 = {0x28, 0x8B, 0xF0, 0x79, 0x97, 0x10, 0x3, 0xCD}; //dirección del sensor 5
DeviceAddress address6 = {0x28, 0xDF, 0xA4, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0xE0}; //dirección del sensor 6
DeviceAddress address7 = {0x28, 0x68, 0xA9, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0x8E}; //dirección del sensor 7
DeviceAddress address8 = {0x28, 0xB8, 0x75, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0x35}; //dirección del sensor 8
DeviceAddress address9 = {0x28, 0xCA, 0x5D, 0x79, 0x97, 0x20, 0x3, 0x7D}; //dirección del sensor 9
DeviceAddress address10 = {0x28, 0x86, 0x9D, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0x2F}; //dirección del sensor 10
DeviceAddress address11 = {0x28, 0x46, 0xDF, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0xDA}; //dirección del sensor 11
DeviceAddress address12 = {0x28, 0x36, 0xDF, 0x79, 0x97, 0x20, 0x3, 0x3A}; //dirección del sensor 12
DeviceAddress address13 = {0x28, 0x7E, 0x60, 0x79, 0x97, 0x11, 0x3, 0x27}; //dirección del sensor 13
DeviceAddress address14 = {0x28, 0xBC, 0xA0, 0x7, 0xB6, 0x1, 0x3C, 0x65}; //dirección del sensor 14

void setup() {
//delay(1000);
Serial.begin(9600);
sensors1.begin(); //Se inician los sensores 1-6
    
```

Figura 4. 16.Fragmento de código para obtención de temperatura mediante Arduino

4.3.3 Resultados del monitoreo térmico

En la Figura 4.17 se observa la disposición de los sensores, los valores de temperatura se tomaron en 4 zonas diferentes: 1) Temperatura de losa (tomada al ras de la azotea), 2) Temperatura de canal (tomada justo a media altura del canal de aire), 3) Temperatura de vegetación (tomada justo entremedio de las hojas y ramas de la cubierta vegetal) y 4) Temperatura sobre la cubierta (tomada a 35 cm de altura respecto a la cubierta vegetal).

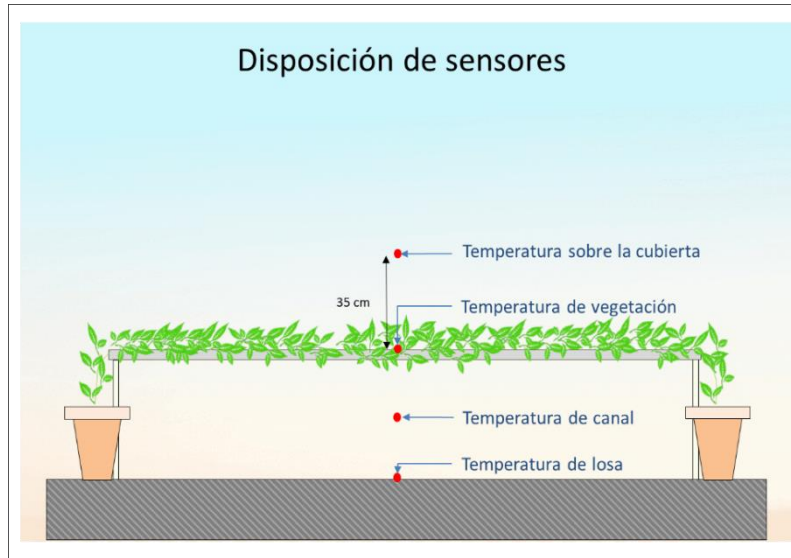


Figura 4. 5. Disposición de los sensores de temperatura

El primer monitoreo térmico abarcó del día 8 al 15 de enero y el segundo monitoreo se realizó en la semana del 11 al 18 de marzo del 2021, todos los registros de temperaturas fueron archivados y analizados mediante una hoja de cálculos Excel, como se observa en la Figura 4.18. En el siguiente apartado se presentan los resultados del primer y segundo monitoreo térmico.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Número de test:	Semanal			# Datos*	5071											
2	Inicio de la prueba:	08/01/2021 14:00															
3	Final de la prueba:	15/01/2021 16:46															
6		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12	A	B	C	D
7	01/08/2021 14:00:36:837	29.8	32.88	29.62	35.13	30.69	29.5	30.06	32.5	31	34.31	32.75	30.56	36.4	29.9	32	29.5
8	01/08/2021 14:02:36:837	29.6	32.81	30.31	31.25	32.13	30.56	30.06	33.38	32.06	33.19	33.44	30.94	36.5	29.3	31.6	29.7
9	01/08/2021 14:04:36:837	30.4	32.56	29.69	29.37	31.94	29.31	29.56	30.81	30.37	31.87	33.06	29.94	37	29.9	32.5	30.2
10	01/08/2021 14:06:36:837	31.1	34.06	31.25	30.19	33.25	31.12	30.75	31.94	32.63	33.5	34.44	31.69	37.6	30.2	33.1	30.3
11	01/08/2021 14:08:36:837	30.5	34.5	30.06	29.94	34.25	30.69	29.69	30.56	31.56	32.13	34.25	30.75	36.9	29.9	33	30
12	01/08/2021 14:10:36:837	30.3	34.19	31.62	30.06	33.69	30.94	30.62	30.75	32.5	32.69	34.19	31.56	36.7	29.6	33.1	29.5
5065	01/15/2021 14:36:34:654	29.30	34.81	33.19	31.75	40.81	33.69	33.56	33.38	41.63	33.31	35.81	33.44	31.40	31.00	33.60	30.91
5066	01/15/2021 14:38:34:654	28.40	34.94	33.13	31.62	41.38	34.56	33	32.81	40.06	33.88	36.63	33	31.10	30.50	32.90	30.44
5067	01/15/2021 14:40:34:654	28.50	34.25	33.19	31.44	40.88	33.63	32.75	32.88	40.19	33.13	35.56	32.38	30.70	29.40	32.50	29.71
5068	01/15/2021 14:42:34:654	29.90	34.31	33.44	31.25	40.75	33.19	33.25	40.69	34.13	35.56	33.13	32.10	30.40	35.00	31.00	
5069	01/15/2021 14:44:34:654	30.60	33	31.81	30.06	41	32.69	32.75	33.31	40.06	33.81	36.13	32.88	33.40	31.20	37.30	32.11
5070	01/15/2021 14:46:34:654	31.10	33.19	31.5	29.56	41.56	32.56	32.06	31.75	40.56	31	34.63	30.5	33.80	32.10	40.20	35.01
5071	01/15/2021 14:48:34:654	30.70	32.69	31.19	30.37	39.88	32.06	31.56	30.87	40.63	30.44	34.38	30.44	33.20	31.90	38.50	34.91
5072	01/15/2021 14:50:34:654	30.10	31.87	31.37	30.81	37.25	31.37	31.75	31.62	39.25	31.94	34.75	31.69	34.50	31.90	38.70	34.61
5073	01/15/2021 14:52:34:654	29.20	30.94	30.31	29.94	34.63	30.19	30.94	30.56	36.31	31	33.44	30.5	31.70	31.40	37.90	35.11
5074	01/15/2021 14:54:34:654	32.40	30.31	29.94	29.19	35.13	30.44	30.06	29.94	34.69	30.19	32.25	29.69	34.60	32.60	39.60	37.01
5075	01/15/2021 14:56:34:654	30.90	30.44	30.94	29.69	35.81	31.12	29.69	29.94	35.25	29.31	31.94	29.44	34.30	32.20	40.20	35.41
5076	01/15/2021 14:58:34:654	30.40	31.56	32.25	30.25	37	32.63	30.31	30.25	36.25	29.5	31.94	29.87	33.90	32.40	40.00	36.71
5077	01/15/2021 15:00:34:654	30.30	32.81	33.81	31.44	39.31	33.56	31.12	31.56	38.56	30.69	32.88	31	34.30	32.90	41.30	37.11
5078																	

Figura 4. 6. Fragmento de base de datos

Resultados del primer monitoreo

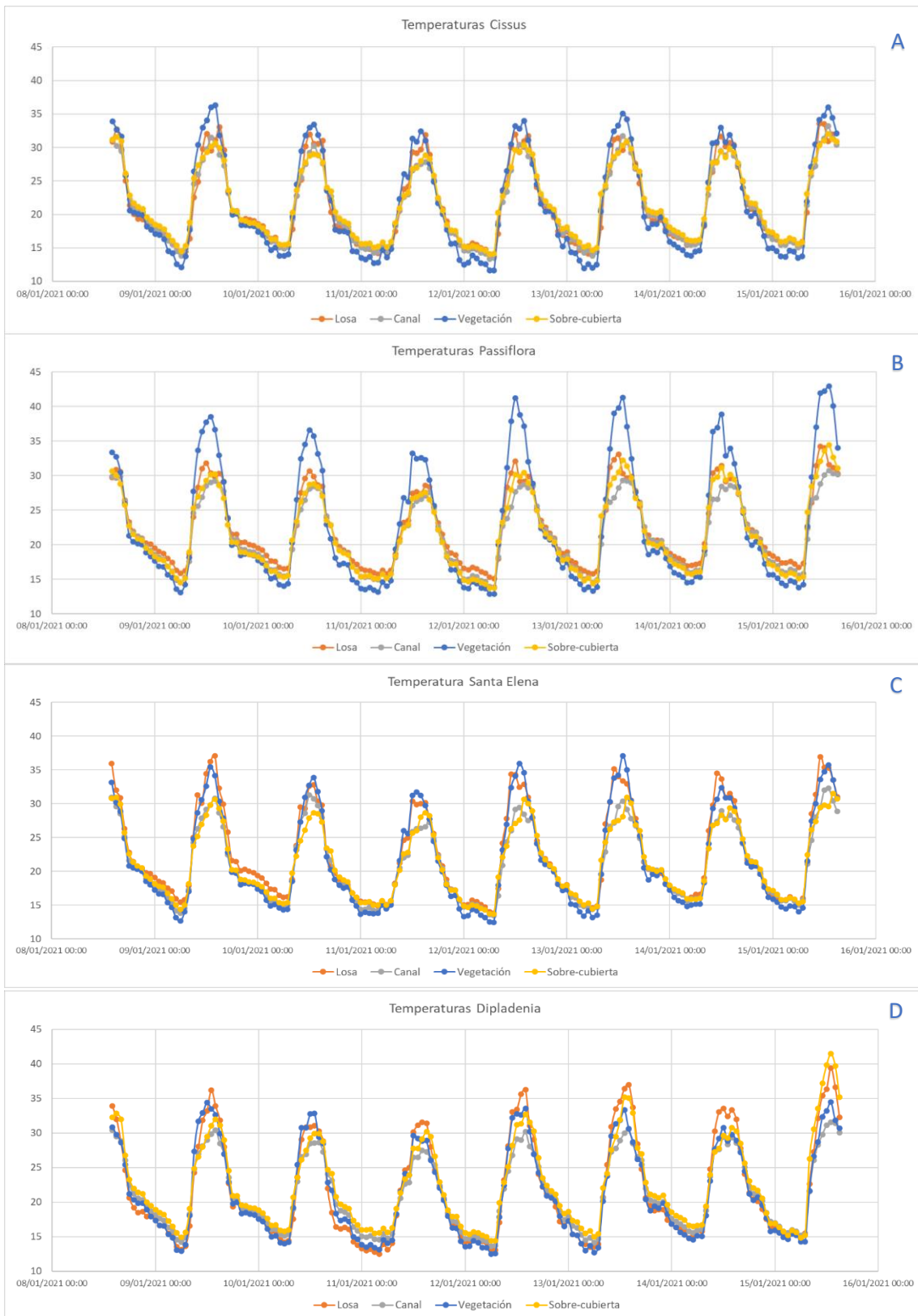


Figura 4. 7. Temperaturas en módulos de prueba A) Cissus, B) Passiflora, C) Santa Elena y D) Dipladenia



Figura 4. 8. Temperaturas Losa y Vegetación (periodo más cálido en recuadro rojo), A) Santa Elena, B) Passiflora, C) Cissus y D) Dipladenia

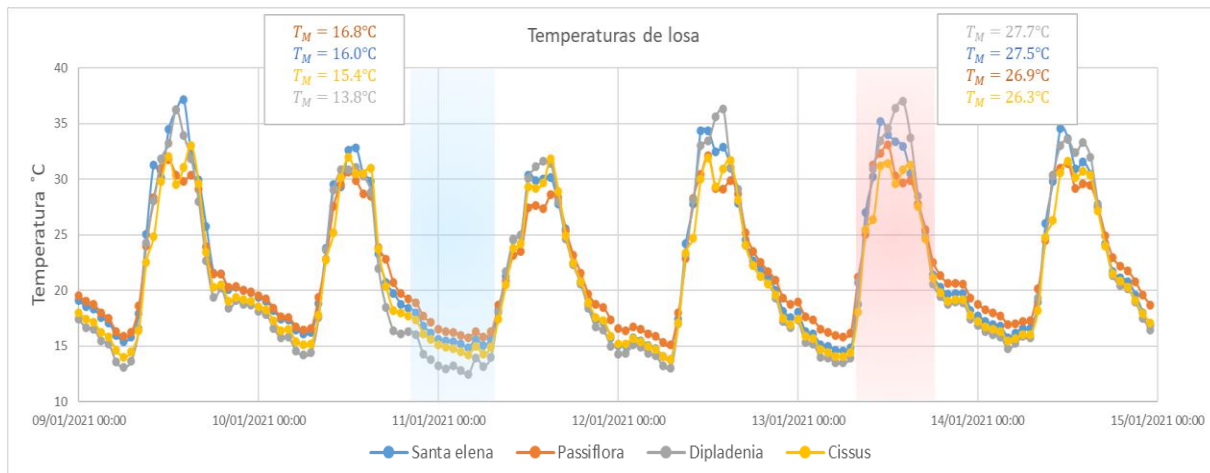


Figura 4. 9. Temperaturas de losa. (Recuadro azul periodo más frío, recuadro rojo periodo más cálido)

Análisis del primer monitoreo

Observando la Figura 4.19 (A-D) se puede notar que: 1) a partir de las 08:00 h los valores de temperatura comienzan a incrementarse notablemente hasta llegar a su valor máximo, que es aproximadamente a las 13:00 h, después de eso comienzan a decrecer rápidamente hasta las 19:00 h y luego comienzan a decrecer lentamente hasta las 08:00 h, y 2) a mayores temperaturas, generalmente entre 10:00 y 16:00 h, mayor dispersión entre las series de valores de temperatura. De la Figura 4.20 (A-C), donde se muestra una comparativa entre las temperaturas de losa y temperaturas de vegetación, se observa que, en los módulos de Santa Elena, Passiflora y Cissus, las temperaturas de vegetación son más elevadas que las temperaturas de losa, y entre las 11:00 h y 14:00 h ésta diferencia se acentúa más. Esto podría indicar que, durante el día, la cubierta vegetal genera un efecto atenuante sobre la temperatura de losa, y que este efecto es más marcado en las horas centrales, momento en que hay mayor radiación solar directa. Dentro de los recuadros azules se aprecia la diferencia máxima, entre las series de datos, en los tres casos mencionados, esta diferencia máxima tuvo lugar durante el periodo más cálido de la semana, a las 13:00 h, lo cual indicaría que el efecto atenuante es más notable a mayores temperaturas. En la Figura 4.20 D se muestra el caso de la especie Dipladenia, en este módulo no se aprecia el mismo comportamiento que en los otros 3 módulos, quizás, debido a una interferencia de factores externos. En la Figura 4.21 se muestra una comparativa entre las temperaturas de losa de los 4 módulos. Para analizar la información se separan los datos en periodos de 12 h (08:00-20:00 y 20:00-08:00), en el recuadro azul se aprecia el periodo más frío y en el recuadro rojo el periodo más cálido, se observa que en el módulo Dipladenia se registraron las temperaturas más elevadas y en Cissus las temperaturas más bajas.

Resultados del segundo monitoreo



Figura 4. 10. Temperaturas en módulos de prueba A) Dipladenia, B) Santa Elena, C) Passiflora y D) Cissus

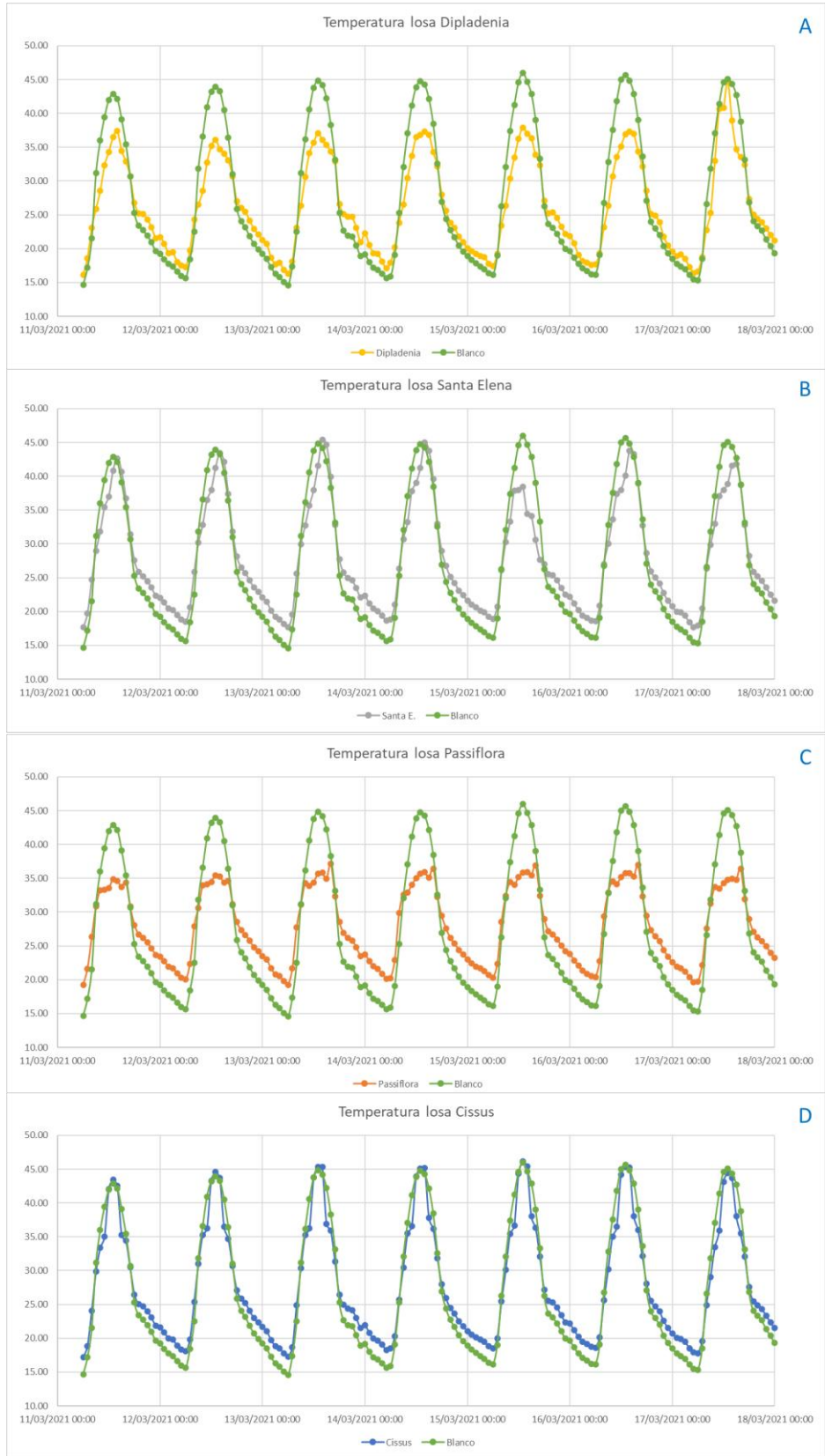


Figura 4. 11. Temperaturas losa vs losa blanca, A) Dipladenia, B) Santa Elena, C) Passiflora y c) Cissus

Análisis del segundo monitoreo

De la Figura 4.22 (A-D) se pueden observar dos tipos de comportamientos diferentes, las Figuras 31A y 31C que corresponden a los módulos de Dipladenia y Passiflora respectivamente, muestran que, durante las horas centrales entre 10 y 16 h, las temperaturas de vegetación son mayores que las temperaturas de losa, lo cual podría indicar un efecto de atenuación de flujo de calor. Por otro lado, en la Figura 31B, que corresponde al módulo de Santa Elena, no se aprecia el mismo comportamiento y generalmente los valores de temperatura de losa son muy cercanos a los valores de temperatura de vegetación durante todo el día, en la Figura 4.22 D, correspondiente al módulo de Cissus, se aprecia que durante las horas centrales las temperaturas de losa son siempre mayores que las temperaturas de vegetación, esto podría indicar que en los módulos de Cissus y Santa Elena, el efecto de atenuación de flujo de calor es nulo. En la Figura 4.23 (A-D) se muestra la comparativa entre las temperaturas de losa de cada uno de los módulos y las temperaturas registradas en una sección de losa blanca sin cubierta vegetal. En las Figuras 4.23 A y 4.23 C, que corresponden a los módulos de Dipladenia y Passiflora, se observa que, durante las horas centrales, las temperaturas de losa (con cubierta vegetal) son siempre menores (hasta 6 °C) que las temperaturas de la losa blanca sin cubierta, mientras que en las Figuras 4.23 B (Santa Elena) y 4.23 D (Cissus), se aprecia que las temperaturas de losa son muy cercanas, con una diferencia máxima de 1 °C.

4.3.4 Conclusiones del monitoreo

De los resultados del monitoreo térmico se puede concluir que:

Durante el primer monitoreo

- En los módulos de Santa Elena, Passiflora y Cissus, las temperaturas de vegetación son más elevadas que las temperaturas de losa, y entre las 11:00 h y 14:00 h ésta diferencia se acentúa más
- La diferencia máxima de temperaturas vegetación-losa se registró en el módulo Cissus (11°C) seguido del módulo Passiflora (5.7 °C)
- La diferencia de temperaturas vegetación-losa indica un efecto de atenuación de flujo de calor
- La mayor diferencia de temperaturas vegetación-losa se da durante los periodos cálidos, en la hora más cálida, lo cual indica que el efecto atenuante es más notorio a mayores temperaturas

Durante el segundo monitoreo

- Las temperaturas de losa de los módulos Dipladenia y Passiflora, son hasta 6°C menores a las temperaturas registradas en la losa blanca sin cubierta vegetal, durante las horas centrales
- Las temperaturas de losa de los módulos Santa Elena y Cissus, son hasta 1°C menores a las temperaturas registradas en la losa blanca sin cubierta vegetal, durante las horas centrales
- La diferencia entre las temperaturas de las losas con cubierta vegetal y la losa sin cubierta vegetal, indica que, la cubierta vegetal genera un efecto de atenuación de flujo de calor
- El efecto de atenuación de flujo de calor es mayor en los módulos Dipladenia y Passiflora y es menor o nulo en los módulos Cissus y Santa Elena

4.3.5 Determinación de la fracción de claros mediante fotografías

Uno de los parámetros de interés para el estudio y la modelación del techo verde ventilado es la fracción de claros del dosel vegetal (gap fraction), si bien existen varias técnicas experimentales para determinar dicho parámetro, en este trabajo, se decidió adoptar la técnica de fotografías hemisféricas. Esta técnica se ha desarrollado en el área de ciencias forestales y consiste en tomar una fotografía hemisférica desde el sotobosque (por debajo del dosel vegetal) y posteriormente estimar los parámetros estructurales del bosque, mediante el procesamiento digital de la imagen (Diaz *et al.*, 2014).

“Con fotografías hemisféricas tomadas desde el interior del bosque pueden medirse los claros del dosel (fracción, tamaño y distribución) y a partir de esas mediciones es posible estimar la estructura del bosque y la transmisión de luz al sotobosque” (Rich, 1990; Hu *et al.*, 2009).

“Mediante la fotografía hemisférica se obtiene un registro detallado de la distribución espacial, tamaño y forma de los claros del dosel (canopy gap). El parámetro de primer orden y de mayor importancia es la fracción de claros (GF). Se define como el porcentaje de cielo que puede ser visto desde debajo del dosel arbóreo” (Chen *et al.*, 1997).

Metodología para la determinación de la fracción de claros

En la Figura 4.24 se muestra la metodología adoptada para determinar el parámetro “fracción de claros”, para realizar el procesamiento de imágenes se utilizó la plataforma de código abierto OCTAVE, en el siguiente apartado se muestran los detalles del código desarrollado.

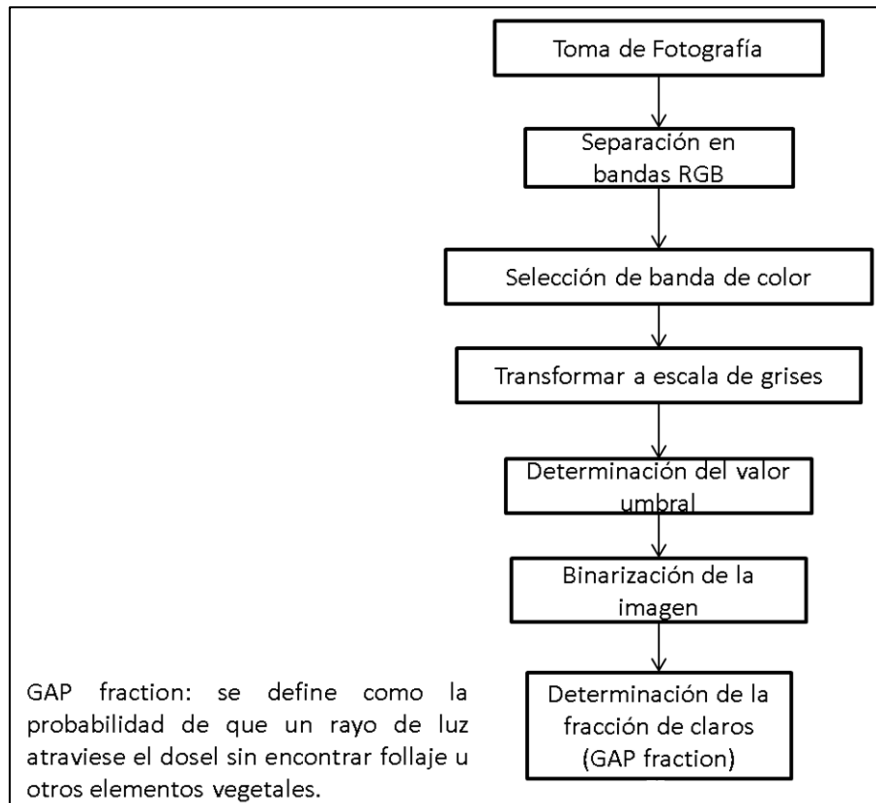
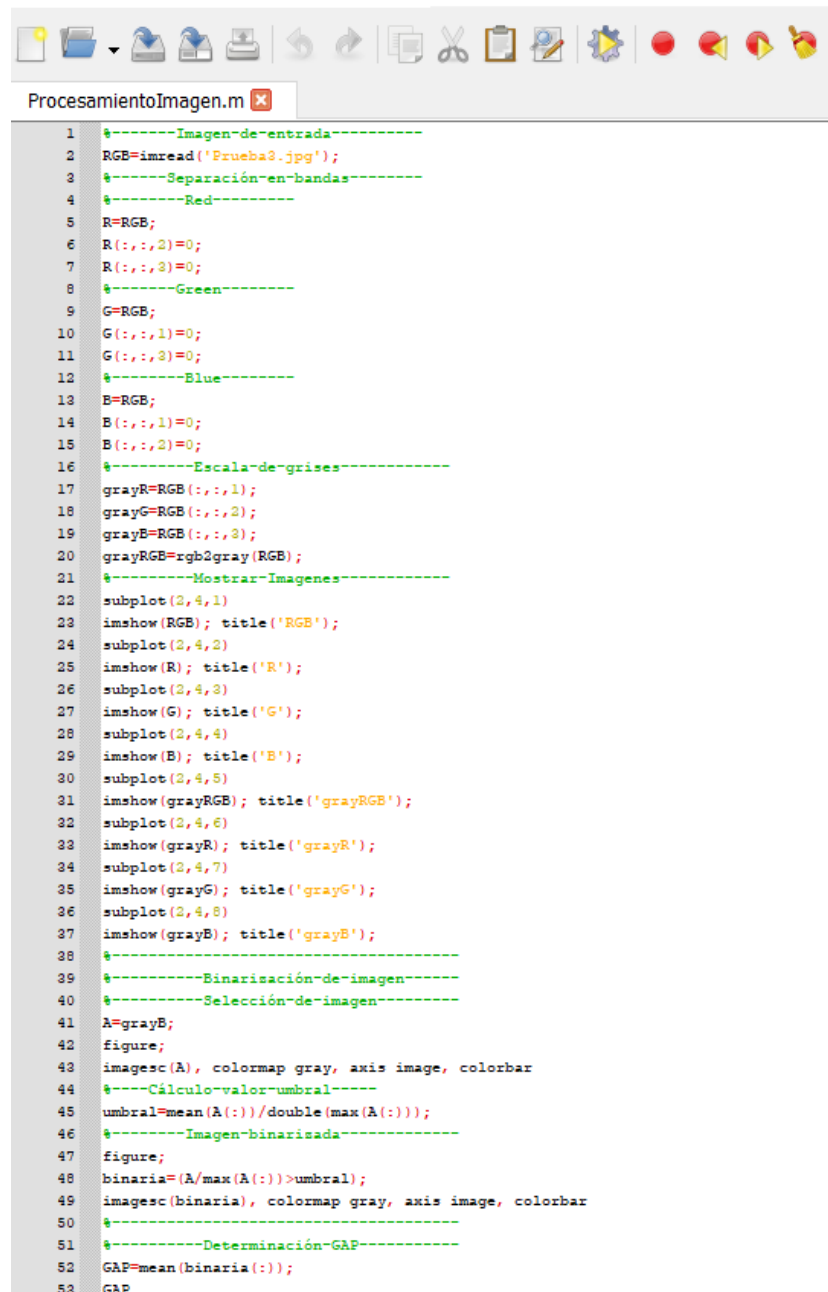


Figura 4. 12. Metodología para la determinación de la fracción de claros

Código desarrollado

Se logró desarrollar un código, programado mediante la plataforma OCTAVE, para realizar el procesamiento digital de las fotografías hemisféricas. Con este código es posible estimar el parámetro de primer orden “gap fraction” (fracción de claro), dicho parámetro aporta información útil para la toma de decisiones durante el proceso de selección de planta. En la Figura 4.25 se muestra un fragmento del código desarrollado y más adelante se muestran los resultados preliminares del código aplicado a una fotografía con un valor de “fracción de claro” conocido.



```

1  $-----Imagen-de-entrada-----
2  RGB=imread('Prueba3.jpg');
3  $-----Separación-en-bandas-----
4  $-----Red-----
5  R=RGB;
6  R(:,:,2)=0;
7  R(:,:,3)=0;
8  $-----Green-----
9  G=RGB;
10 G(:,:,1)=0;
11 G(:,:,3)=0;
12 $-----Blue-----
13 B=RGB;
14 B(:,:,1)=0;
15 B(:,:,2)=0;
16 $-----Escala-de-grises-----
17 grayR=RGB(:,:,1);
18 grayG=RGB(:,:,2);
19 grayB=RGB(:,:,3);
20 grayRGB=rgb2gray(RGB);
21 $-----Mostrar-Imagenes-----
22 subplot(2,4,1)
23 imshow(RGB); title('RGB');
24 subplot(2,4,2)
25 imshow(R); title('R');
26 subplot(2,4,3)
27 imshow(G); title('G');
28 subplot(2,4,4)
29 imshow(B); title('B');
30 subplot(2,4,5)
31 imshow(grayRGB); title('grayRGB');
32 subplot(2,4,6)
33 imshow(grayR); title('grayR');
34 subplot(2,4,7)
35 imshow(grayG); title('grayG');
36 subplot(2,4,8)
37 imshow(grayB); title('grayB');
38 $-----
39 $-----Binarización-de-imagen-----
40 $-----Selección-de-imagen-----
41 A=grayB;
42 figure;
43 imagesc(A), colormap gray, axis image, colorbar
44 $----Cálculo-valor-umbral-----
45 umbral=mean(A(:))/double(max(A(:)));
46 $-----Imagen-binarizada-----
47 figure;
48 binaria=(A/max(A(:))>umbral);
49 imagesc(binaria), colormap gray, axis image, colorbar
50 $-----
51 $-----Determinación-GAP-----
52 GAP=mean(binaria(:));
53 GAP

```

Figura 4. 13. Código desarrollado

Resultados preliminares del código

En la Figura 4.26 se muestra el cálculo de la fracción de claro de una fotografía, realizado con el código. El cálculo de gap fraction se puede obtener utilizando una de las tres capas (Red, Green y Blue) de una imagen RGB, la literatura recomienda utilizar la capa azul (Diaz *et al.*, 2014). En la primera fila se muestra la imagen original RGB y sus tres capas de color (rojo, verde y azul), en la segunda fila se muestran las mismas imágenes transformadas a escala de grises y en la tercera fila se presentan las imágenes binarizadas. Debajo de las imágenes binarizadas se muestran los valores calculados de la fracción de claro (gap fraction). En la Figura 4.27 también se muestra la binarización de la fotografía de una enredadera con fondo de cielo. Para estos cálculos se procesó una fotografía que se sabe tiene una Fracción de claro (gap fraction) cercana al 0.5. Los resultados obtenidos son aceptables y son los esperados, pues la imagen binarizada de la capa azul (blue) fue la que mejor distinguió la fracción clara (fondo de cielo) de la fracción opaca. Esto indica que el código es capaz de calcular acertadamente la fracción de claro de una fotografía.

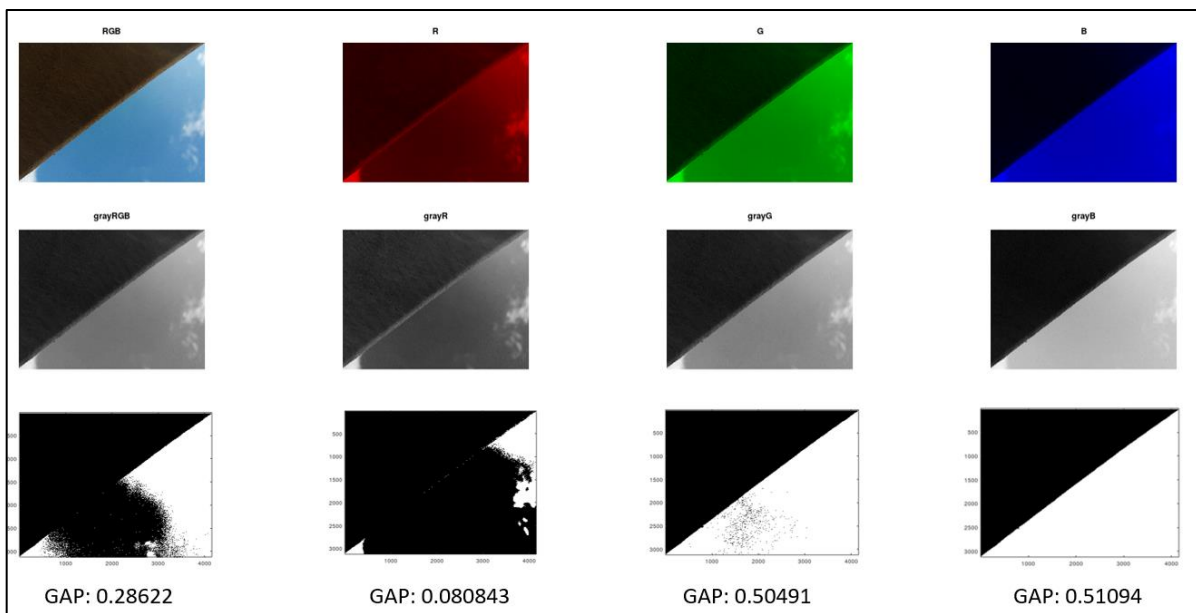


Figura 4. 14.Resultados preliminares

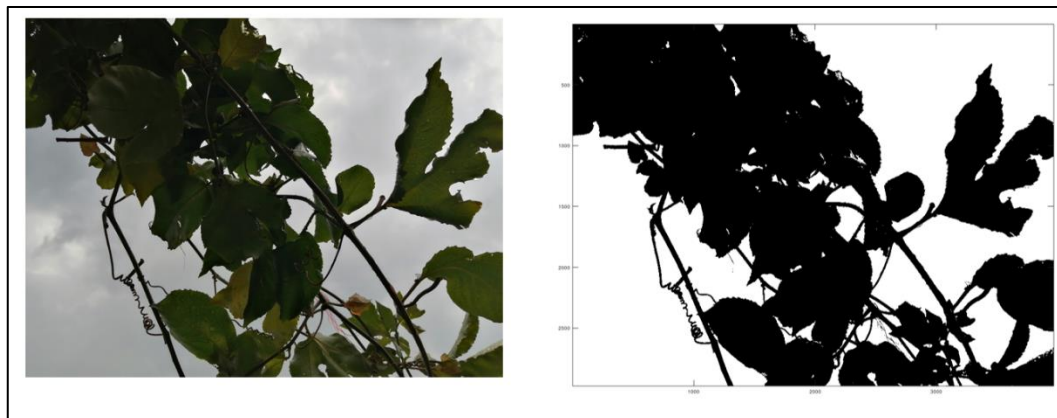


Figura 4. 15. Fotografía de una enredadera (izquierda) y su imagen binarizada (derecha).

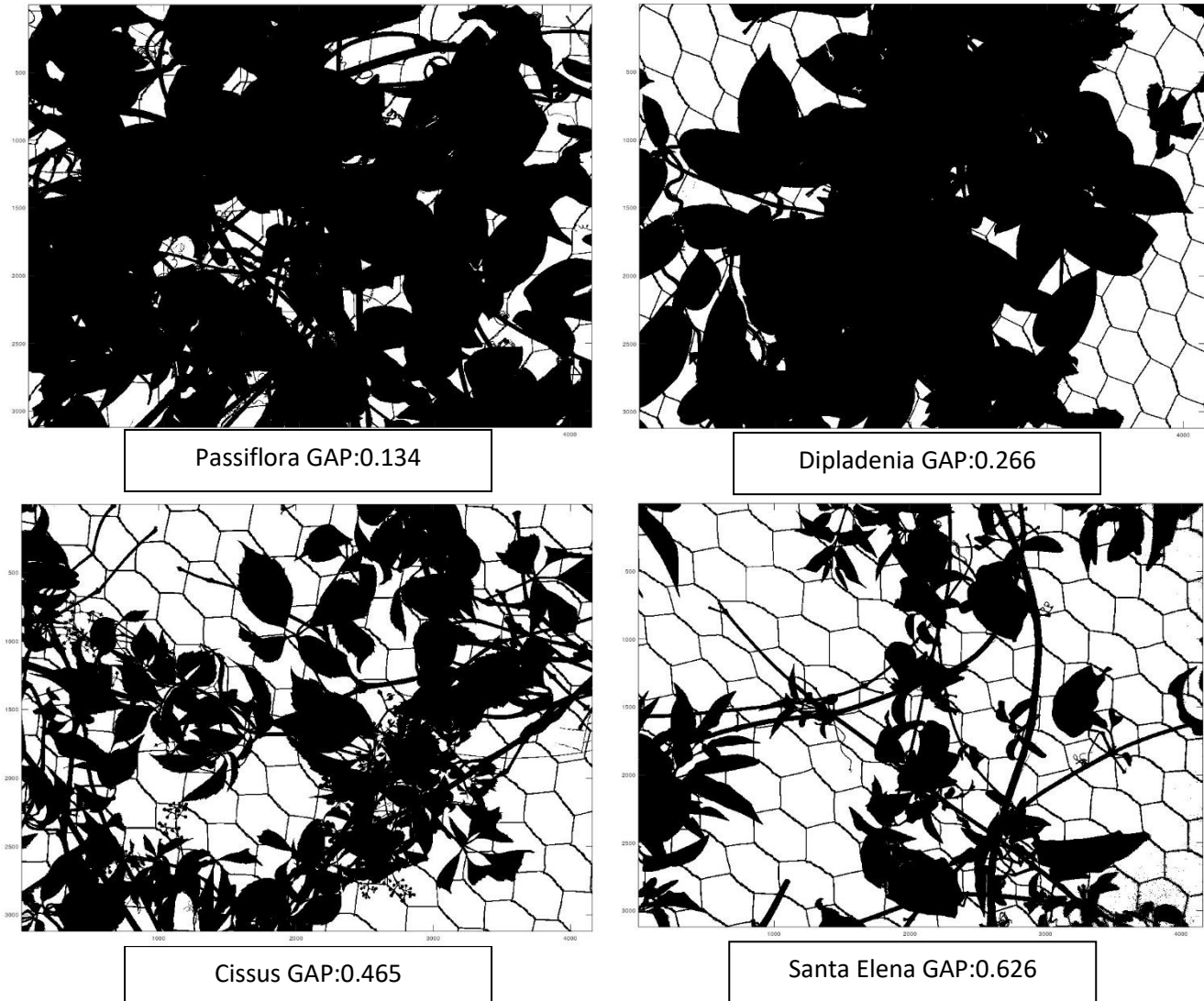


Figura 4. 16. Fotografías binarizadas y determinación de la fracción de claro de las cubiertas vegetales

Fracción de claros de las 4 plantas de estudio

En la Figura 4.28 se muestra la binarización de 4 fotografías tomadas bajo cada una de las cubiertas vegetales, dichas fotografías fueron tomadas y procesadas de acuerdo a la metodología presentada anteriormente, debajo de las imágenes binarizadas se muestra el valor de fracción de claros calculados para cada una de las cubiertas.

De acuerdo a los valores calculados, se puede apreciar que la cubierta vegetal con menor fracción de claro es la especie Passiflora, seguido por la especie Dipladenia, cabe mencionar que, para los fines de este trabajo, se deberá priorizar una cubierta vegetal con la menor fracción de claro posible, debido a que, a menor fracción de claro menor transmisión de luz natural directa a través de la cubierta.

4.3.6 Planta seleccionada

Para seleccionar la planta más idónea al proyecto, se decidió establecer los siguientes criterios; 1) Adaptación en invierno, 2) Adaptación en primavera, 3) Fracción de claro de la cubierta vegetal, 4) Demanda semanal promedio de agua y 5) Diferencia máxima de temperaturas, entre las temperaturas de losa de cada módulo y las temperaturas de losa blanca sin vegetación obtenidas del segundo monitoreo térmico. En la Tabla 4.6 se aprecian los criterios de selección y los valores de cada especie vegetal, se decidió seleccionar a la especie *Dipladenia* (Figura 4.29) debido a que esta especie esta especie; 1) tuvo muy buena adaptación a las condiciones estacionales de Primavera, y no presentó ningún tipo de plaga, 2) la cubierta vegetal de la especie *Dipladenia* tuvo la segunda menor fracción de claro, 3) tuvo la menor demanda semanal de agua y 4) tuvo un buen comportamiento térmico, ya que, durante el segundo monitoreo, la losa debajo de la cubierta vegetal, presentó una diferencia máxima de 9.8 °C respecto a la losa blanca sin cubierta vegetal. Una especie que destacó en el proceso de selección fue la especie *Passiflora*, sin embargo, tuvo que ser descartada debido a que no se adaptó a las condiciones de primavera, ya que, las hojas presentaron síntomas de exceso de sol, además de que esta especie fue la de mayor demanda de agua y fue susceptible a plagas.

Tabla 4. 6. Criterios de selección

Especie	*Adaptación Invierno	*Adaptación Primavera	Fracción de claro	Demanda promedio de agua (l/semana)	**Diferencia máxima de temperaturas (°C)
Dipladenia	Regular	Muy buena	0.266	3.5	- 9.8 °C
Passiflora	Muy buena	Mala	0.133	5.25	- 10.3 °C
Cissus	Mala	Buena	0.465	3.5	- 5.5 °C
Santa Elena	Regular	Buena	0.626	4.4	- 6.9 °C

*Escala de menor a mayor: Malo, Regular, Bueno, Muy bueno

**Considerando la diferencia de temperaturas Losa con vegetación-Losa blanca sin vegetación del segundo monitoreo

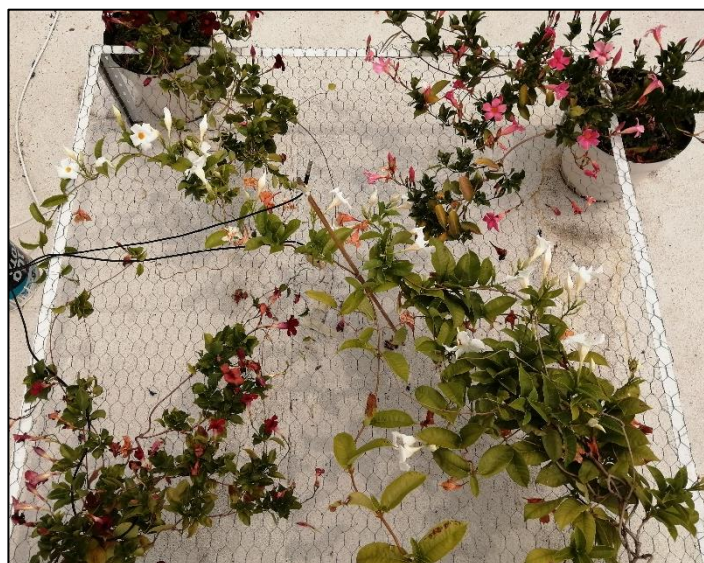


Figura 4. 17. *Dipladenia*, planta seleccionada

4.4 Módulos experimentales

Los módulos experimentales utilizados durante el monitoreo térmico del techo verde ventilado, consistieron de 1) una cavidad de madera y 2) una losa de concreto armado. A continuación, se detallan las características de ambos componentes.

4.4.1 Cavidades de madera

Las cavidades de madera (Figura 4.30), con dimensiones de 0.95m x 0.95m x 0.95m, fueron construidas con madera tipo OSB de 1.8 cm de grosor, las superficies exteriores de las cavidades fueron pintadas de color blanco (Figura 4.31 A) y al interior fueron forradas con aislante térmico de 2.5 cm de espesor (Figura 4.31 B).

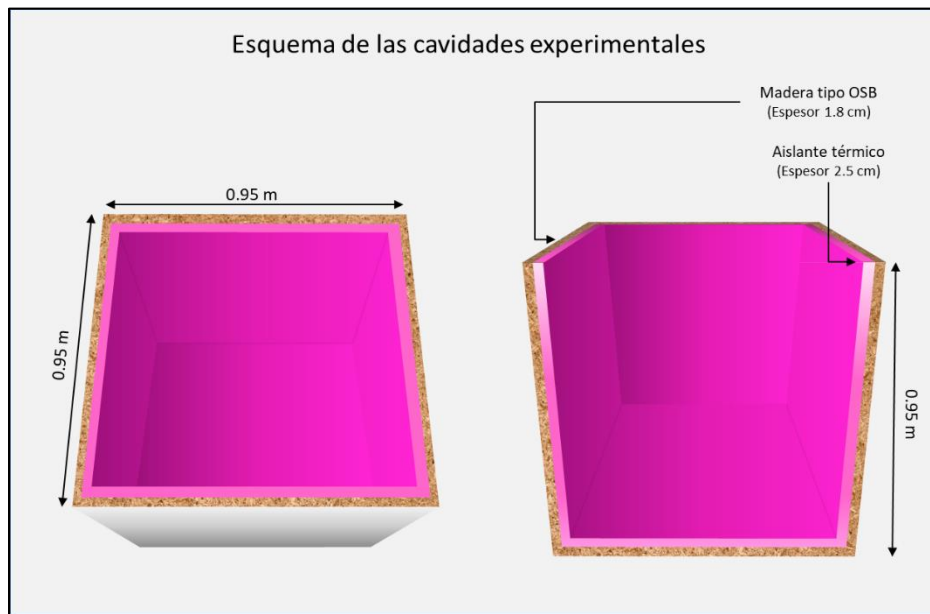


Figura 4. 18. Esquema de las cavidades experimentales



Figura 4. 19. Cavidad experimental construida, A) Exterior y B) Interior

4.4.2 Losas de concreto

Para construir las losas de concreto armado (Figura 4.32), con dimensiones de 1.2m x 1.2m x 0.10 m, se construyeron moldes de madera y se les colocaron dos marcos de varilla (Figura 4.33) con la finalidad de utilizar como agarraderas, en dichos moldes se vació la mezcla de concreto, además, se colocaron sensores de temperatura tipo T, embebidos dentro de la mezcla de concreto (Figuras 4.34 y 4.35).

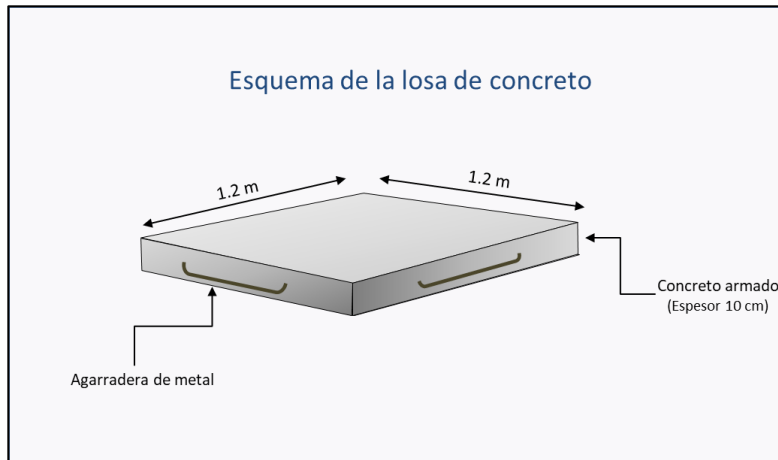


Figura 4. 32. Esquema de la losa de concreto



Figura 4. 21. Molde de madera para la losa y agarraderas de varilla



Figura 4. 34. Losa colada

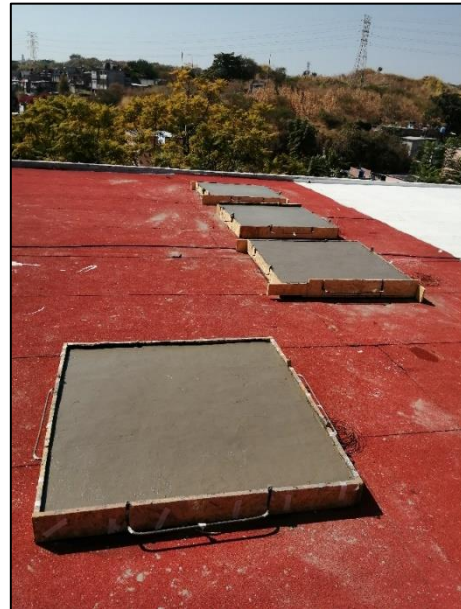


Figura 4. 20. Colado de losas

4.4.3 Distribución de módulos experimentales

Las cavidades experimentales fueron colocadas en el sitio de prueba (Azotea del edificio de mecánica Cenidet), para la colocación de las losas de concreto, fue necesario la construcción de una estructura metálica (Figuras 4.36 y 4.37), con malacates en la parte superior, para elevar las losas de concreto y posteriormente colocar las cavidades de madera debajo de éstas. En la Figura 4.38 se muestra la distribución de las cavidades experimentales y en la Figura 4.39 se aprecia la colocación de una losa de concreto sobre una cavidad experimental.



Figura 4. 36. Estructura metálica con malacates



Figura 4. 37. Elevación de losa



Figura 4. 22. Distribución de módulos



Figura 4. 23. Acoplamiento losa-cavidad

4.4.4 Colocación del techo verde ventilado

Para la colocación del techo verde ventilado sobre la cavidad experimental, se utilizó, un soporte metálico cuadrangular de 1.2 m, con una malla hexagonal de acero galvanizado sujeta al marco, el cual fue colocado sobre la cavidad experimental a una altura de 30 cm (Figuras 4.40 y 4.41).



Figura 4. 40. Soporte metálico cuadrangular



Figura 4. 41. Cavidad con soporte metálico

Posteriormente, se colocaron y sujetaron, 6 macetas de la especie Dipladenia, sobre la cavidad experimental y se distribuyeron las ramas enredaderas sobre el soporte metálico de manera que cubrieran la mayor área posible, para así, conformar una cubierta vegetal, que cubriera la losa de concreto de la cavidad (Figuras 4.42 y 4.43).



Figura 4. 42. Macetas colocadas sobre la cavidad experimental



Figura 4. 43. Sujeción de las macetas colocadas sobre la cavidad experimental

4.4.5 Instrumentación de los módulos experimentales

Durante el monitoreo térmico se consideró la instrumentación de dos cavidades experimentales, la primera con techo tradicional y la segunda con techo verde ventilado. En la Figura 4.44 se muestra la disposición de los sensores de temperatura en ambas cavidades, la instrumentación incluyó sensores de temperatura instalados al interior de las losas de concreto y al interior de las cavidades (Figura 4.45). Para esta instrumentación, se utilizaron termopares tipo T conectados a un adquisidor de datos Agilent y sensores de temperaturas tipo DS18B20 conectados a una placa Arduino Mega.

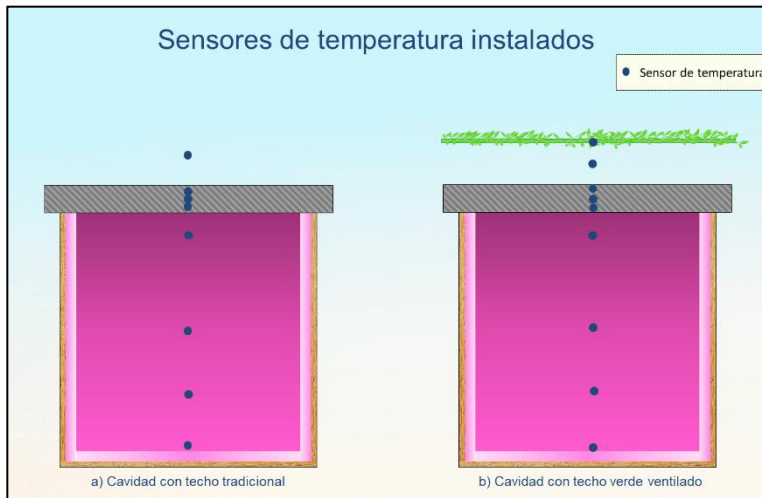


Figura 4. 44. Instrumentación de las cavidades experimentales



Figura 4. 45. Sensores instalados al interior de la cavidad

La cavidad con techo verde ventilado también incluyó la instalación de un piranómetro debajo de la cubierta vegetal, colocado ahí, para poder cuantificar la radiación incidente sobre la losa con techo verde ventilado (Figura 4.46).

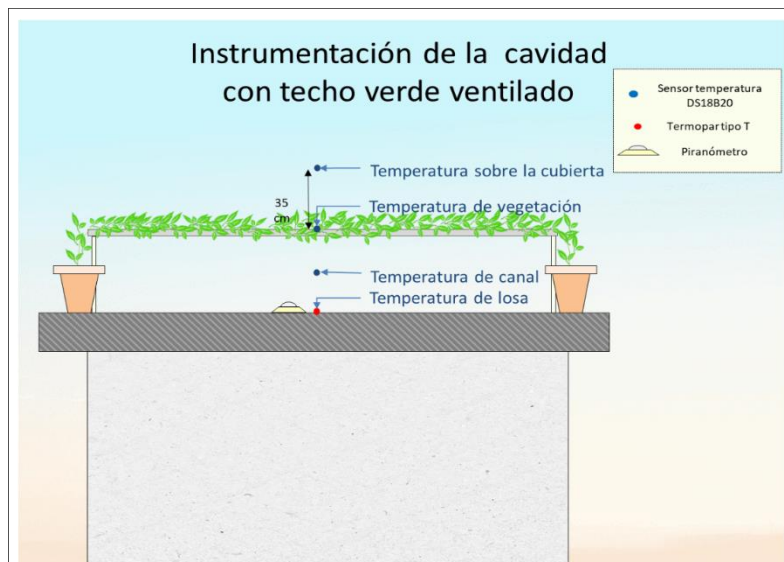


Figura 4. 24. Instrumentación de la cavidad experimental con techo verde ventilado

4.4.6 Monitoreo de los módulos experimentales

El monitoreo térmico de los módulos experimentales, se realizó entre el 02/Junio/2021 y el 12/Junio/2021, en la Figura 4.47 se muestran las temperaturas registradas en ambas losas (tradicional y con techo verde ventilado) y en la Figura 4.48 se presentan las temperaturas registradas al interior de ambas cavidades.

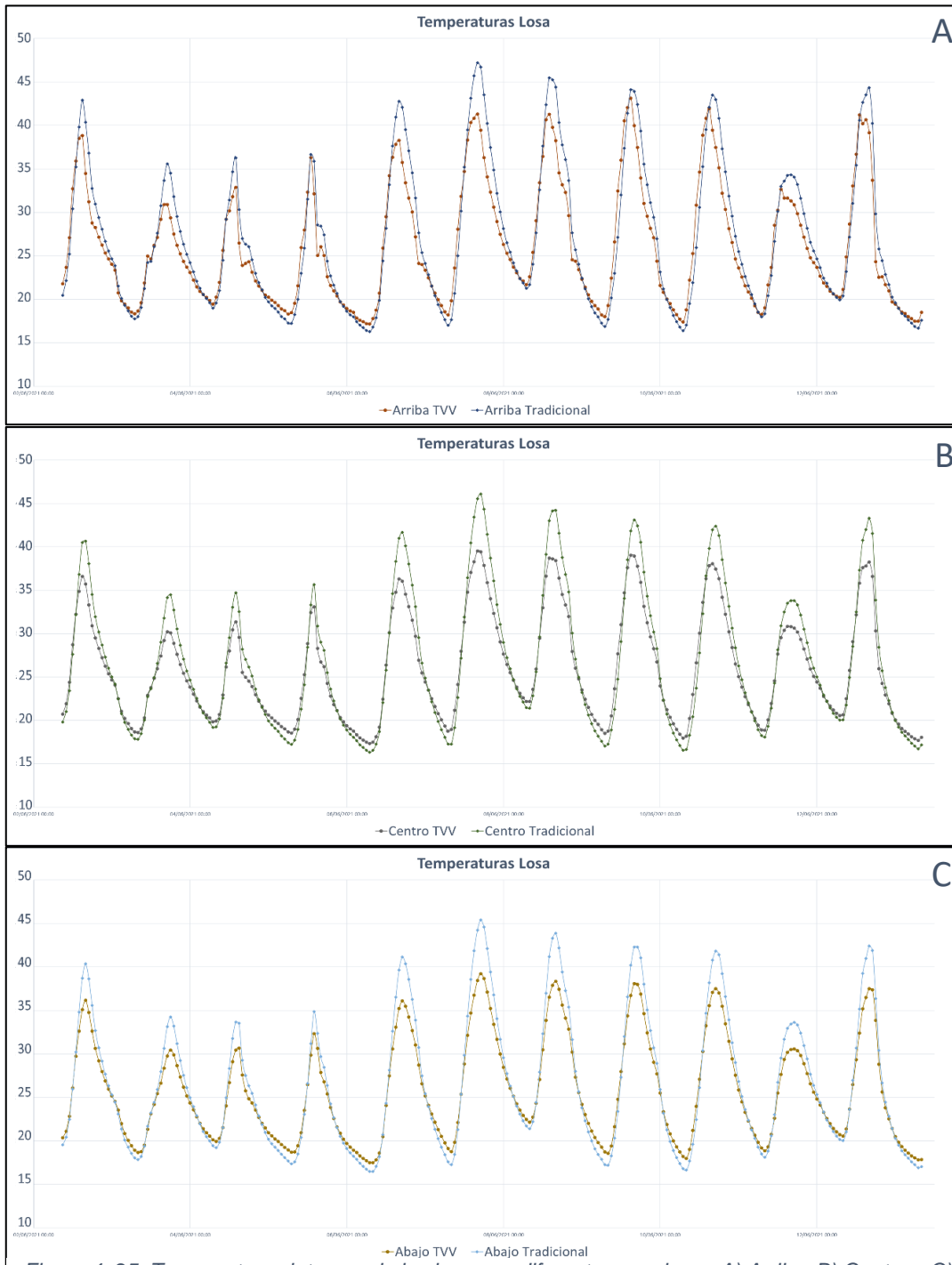


Figura 4. 25. Temperaturas internas de las losas en diferentes secciones A) Arriba, B) Centro y C) Abajo

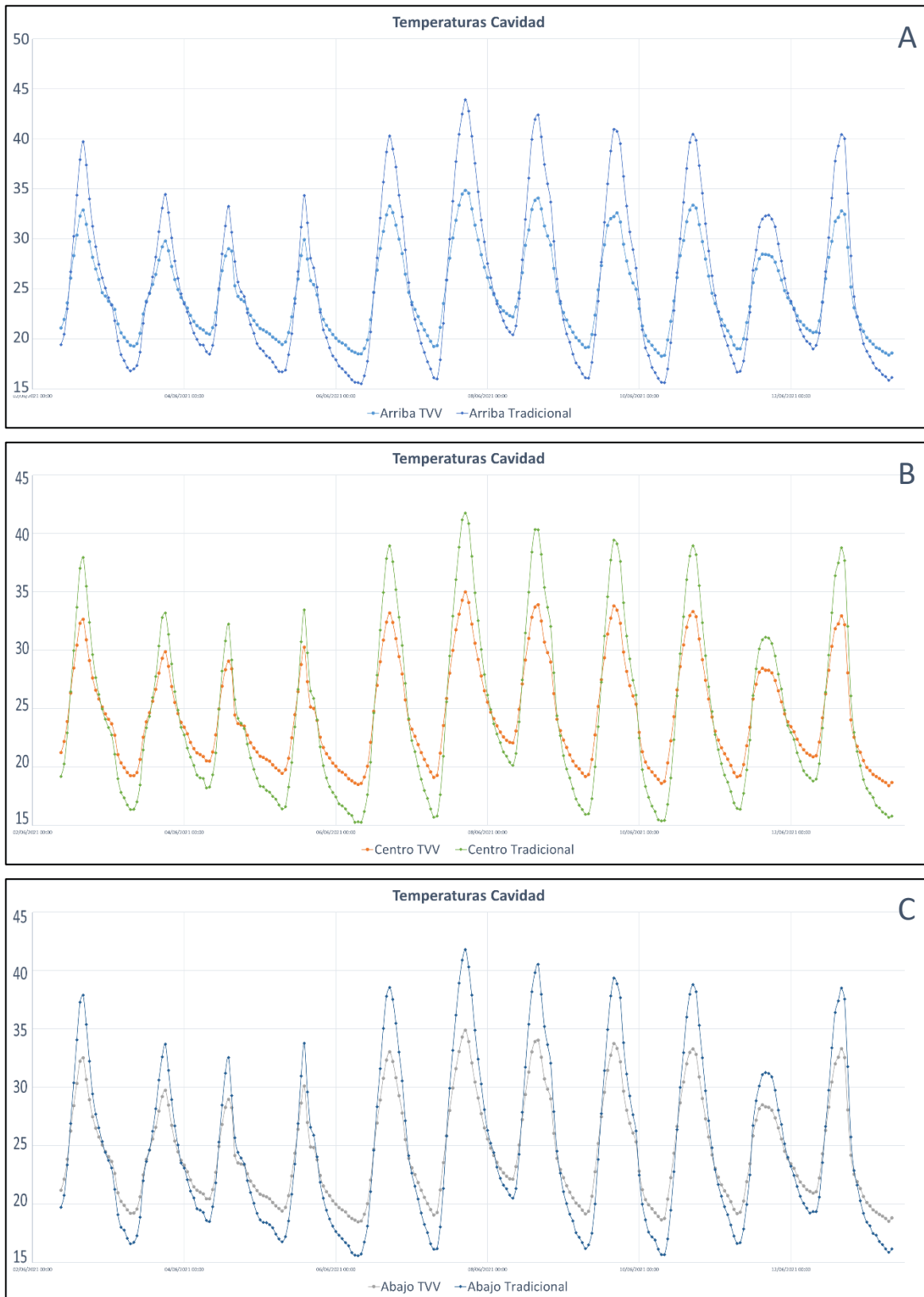


Figura 4. 26. Temperaturas registradas dentro de las cavidades experimentales a diferentes alturas A) Arriba, B) Centro y C) Abajo

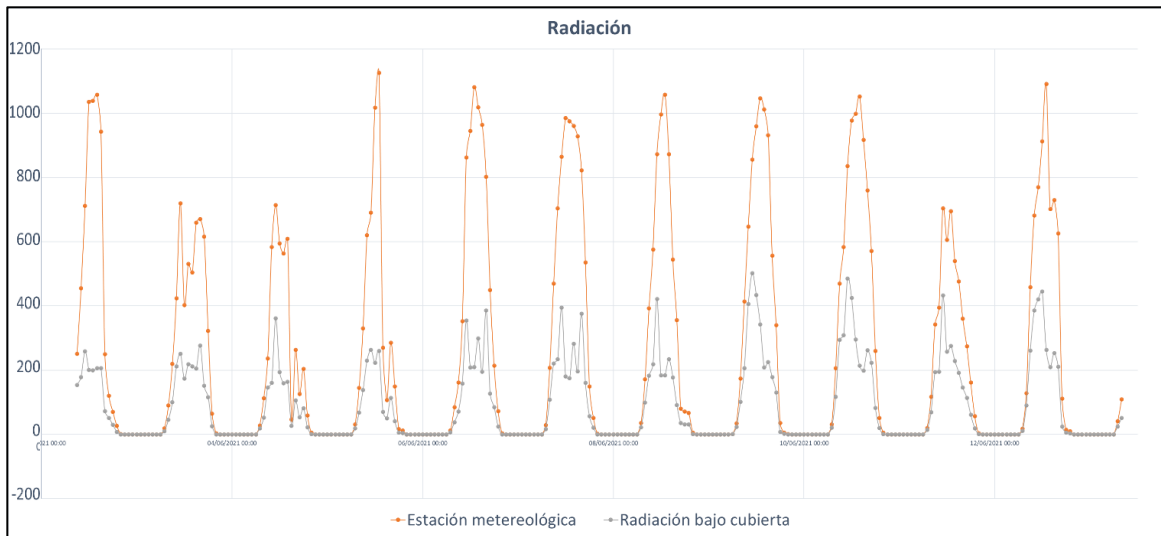


Figura 4. 27. Registro de la radiación solar

4.4.7 Resultados del monitoreo

En la Figura 4.47 A, se aprecia que las temperaturas de la parte superior de la losa del módulo con techo tradicional, fueron durante el día, más elevadas que las registradas en la losa del módulo con techo verde ventilado, y el efecto se acentúa durante las horas centrales, con una diferencia máxima de hasta 6 °C, este tipo de comportamiento se repite en las 3 diferentes secciones de la losa (4.47 A, B y C). En la Figura 4.48, se aprecia que, en las 3 secciones de la cavidad, la cavidad con techo tradicional, durante el día, registró temperaturas más elevadas en comparación con la cavidad con techo verde ventilado, en estos casos también se acentuó esta diferencia durante las horas centrales, presentando una diferencia máxima de hasta 8 °C. En la Figura 4.49 se muestra una comparativa entre la radiación global registrada por la estación meteorológica y la radiación global registrada debajo de la cubierta vegetal, de esta comparativa se puede observar que, durante las horas centrales, la radiación debajo de la cubierta vegetal fue siempre menor que la registrada por la estación, teniendo una diferencia máxima de hasta 900 W/m².

4.4.8 Conclusiones del monitoreo de los módulos experimentales

Del monitoreo térmico se puede concluir que:

- Durante el día, las temperaturas internas de la losa del módulo con techo tradicional son siempre más elevadas que las del módulo con techo verde ventilado.
- Durante el día, las temperaturas internas de la cavidad del módulo con techo tradicional son siempre más elevadas que las del módulo con techo verde ventilado.
- Las diferencias entre las temperaturas de ambos módulos, se acentúan durante las horas centrales.
- La radiación registrada debajo de la cubierta vegetal, fue durante el día, menor que la registrada por la estación meteorológica, y ésta diferencia fue más notoria durante las horas centrales.
- La diferencia entre la radiación ambiental y la radiación debajo de la cubierta vegetal, indica que, la cubierta vegetal genera un efecto de atenuación de flujo de calor radiativo.

Capítulo 5

Simulaciones

Para el desarrollo de las simulaciones, mediante el software Design Builder, se llevaron a cabo 5 etapas; 1) Evaluación de habilidades de usuario, 2) Modelado de las cavidades experimentales, 3) Caracterización de la cubierta vegetal, 4) Validación de las simulaciones y 5) Simulación de la vivienda de referencia con techo verde ventilado.

5.1 Evaluación de habilidades de usuario

Con la finalidad de familiarizarse y corroborar que se tienen las capacidades necesarias, para utilizar la herramienta Design Builder, se realizó una evaluación de habilidades de usuario, para ello, se tomaron de referencia los casos de estudio descritos en la sección 5.2 del estándar ANSI ASHRAE 140/2011. El usuario realizó simulaciones, replicando las condiciones de los casos de estudio (BESTEST), y posteriormente, se compararon los resultados del usuario con los resultados reportados en el estándar (ANSI ASHRAE 140/2011), para así, evaluar cuantitativamente si el usuario domina el software Design Builder.

5.1.1 Estándar ANSI ASHRAE 140/2011

El estándar titulado *Standard Method of Test for the Evaluation of Building Energy Analysis Computer Programs*, publicado y elaborado por el *American National Standards Institute* (ANSI) y la *American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers* (ASHRAE), especifica los procedimientos de prueba que se pueden aplicar para evaluar el rango de aplicabilidad y la capacidad de los softwares, diseñados para calcular el rendimiento térmico de edificaciones. Las pruebas se basan en el principio de comparar el rendimiento de un programa con el rendimiento de otros programas y, aunque no están destinadas a evaluar todos los aspectos del software, están diseñadas para indicar fallas o limitaciones graves.

5.1.2 BESTEST

En la sección 5.2 del estándar ANSI ASHRAE 140/2011 se describen una serie de pruebas denominadas BESTEST, estas pruebas, están basadas en el proyecto “Building Energy Simulation Test and Diagnostic Method” realizado en 1995 por la Agencia Internacional de Energía (AIE, por sus siglas en inglés). En estas pruebas se especifican las características geométricas de una edificación, su localización y orientación, las características del sistema de acondicionamiento, las propiedades termofísicas y ópticas de todos los componentes, así como la disposición de todas sus aberturas, además, se especifica el archivo de datos climatológicos a utilizar para la simulación energética del edificio.

5.1.3 Especificaciones de los BESTEST casos 600's y 900's

Los casos de estudio seleccionados para realizar la evaluación fueron los BESTEST's 600-650 y 900-950, a continuación, se detallan las especificaciones de dichos casos. Cabe resaltar que los casos 600's y 900's se diferencian únicamente por la masa térmica de sus edificaciones, denominándose a los casos 600's como de baja masa térmica y los 900's como de alta masa térmica.

Geometría de las edificaciones

En las Figuras 5.1-5.4, se muestran las características geométricas de las edificaciones de los casos 600, 610, 620 y 630. Cabe resaltar que, el caso 610 es idéntico al caso 600, solo que se le añade un elemento de sombreado en la fachada sur, y los casos 620 y 630 varían por la disposición de las ventanas, además, el caso 630 añade un elemento de sombreado alrededor de ambas ventanas.

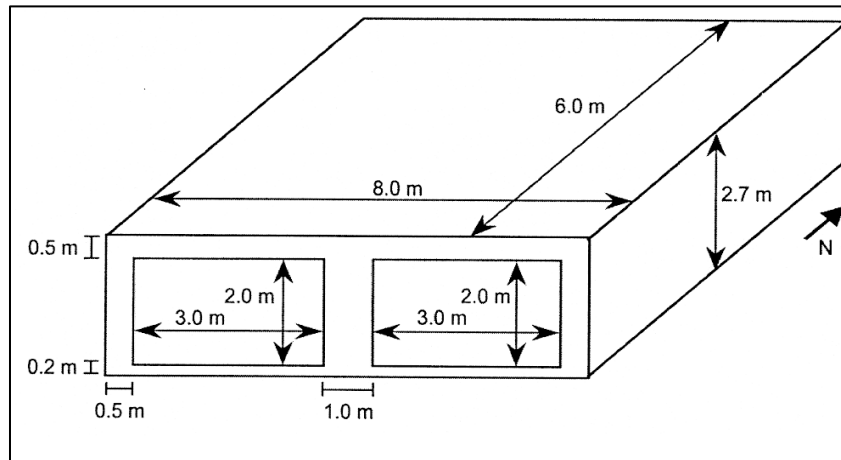


Figura 5. 1. Geometría BESTEST 600

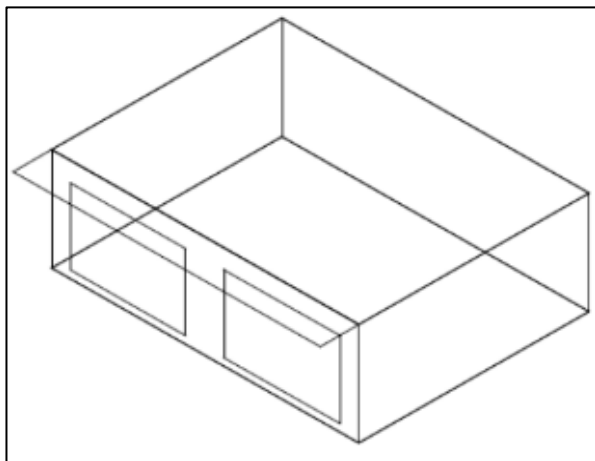


Figura 5. 2. Geometría BESTEST 610

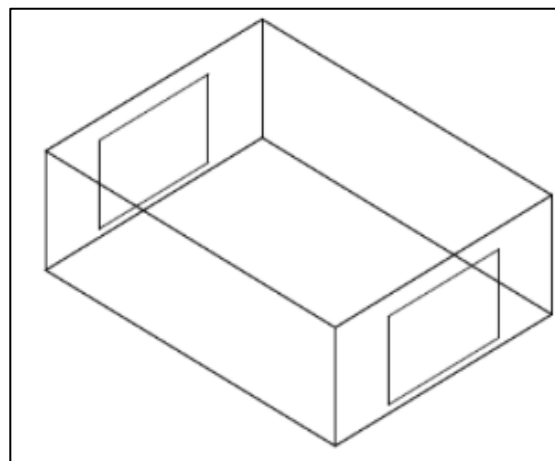


Figura 5. 2. Geometría BESTEST 620

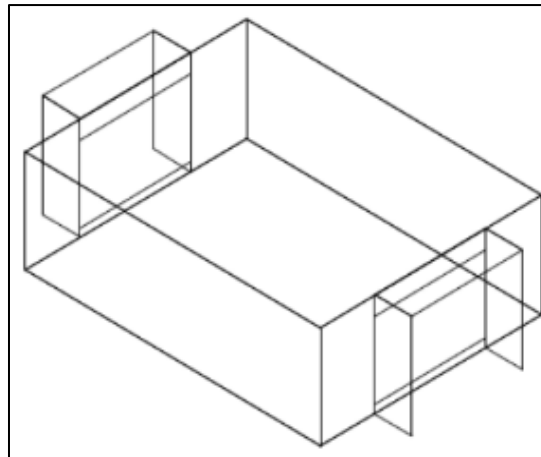


Figura 5. 4. Geometría BESTEST 630

BESTEST 640

El caso 640 es idéntico al caso 600 excepto por el funcionamiento del sistema de calefacción, para este el control de temperatura es el siguiente:

- De 23:00 – 07:00 horas, calefacción encendida si $T < 10^{\circ}\text{C}$
- De 07:00 – 23:00 horas, calefacción encendida si $T < 20^{\circ}\text{C}$
- 24/7 aire acondicionado encendido si $T > 27^{\circ}\text{C}$

BESTEST 650

El caso 650 es idéntico al caso 600, excepto que se programa una ventilación nocturna y el control de aire acondicionado es el siguiente:

- Calefacción siempre apagada
- De 18:00- 07:00 ventilación natural activada
- De 07:00-18:00 Ventilación natural desactivada
- De 07:00- 18:00 aire acondicionado encendido si $T > 27^{\circ}\text{C}$
- De 18:00- 07:00 aire acondicionado apagado
- Tasa de flujo de aire ventilación natural $1703.16 \text{ (m}^3/\text{hora)}$

Localización del sitio

En los detalles de sitio se especifica como ubicación la del Aeropuerto de Denver Stapleton, Colorado, E.U.A, y los datos meteorológicos de la estación WMO 724690.

Propiedades de los componentes

En la Tabla 5.1 se especifican las propiedades térmicas de los muros, techo y piso de la edificación, éstas aplican para todos los casos 600's (Edificios de baja masa térmica).

Tabla 5. 1. Propiedades termofísicas de los componentes BESTEST 600's

Edificios de baja masa térmica						
Componente	Elemento	Espesor (m)	$k \text{ (W/mK)}$	$R \text{ (m}^2\text{K/W)}$	$\rho \text{ (kg/m}^3\text{)}$	$C_p \text{ (J/kgK)}$
Muros	Tabla roca	0.012	0.160	0.075	950	840
	Fibra de vidrio	0.066	0.040	1.650	12	840
	Madera	0.009	0.140	0.064	530	900
Techo	Tabla roca	0.010	0.160	0.063	950	840
	Fibra de vidrio	0.1118	0.040	2.794	12	840
	Madera	0.019	0.140	0.136	530	900
Piso	Madera	0.025	0.140	0.179	650	1200
	Aislante	1.003	0.040	25.374		

En la Tabla 5.2 se muestran las propiedades térmicas de las ventanas, estas propiedades son idénticas para todos los casos de estudio.

Tabla 5. 2. Propiedades de las ventanas BESTEST 600's y 900's

Propiedades de las ventanas	
Número de ventanas	2
Espesor cristal	3.175 mm
Espesor entre vidrios	13 mm
Índice de refracción	1.526
Transmitancia	0.86156
Conductividad térmica del vidrio	$1.06 (W/mK)$
Conductancia del vidrio	$333 (W/m^2K)$
Coefficiente convectivo-radiativo aire	$6.297 (W/m^2K)$
Coefficiente combinado superficie exterior	$21.00 (W/m^2K)$
Coefficiente combinado superficie interior	$8.29 (W/m^2K)$
Coefficiente U	$3.0 (W/m^2K)$
Emisividad	0.9
Densidad del cristal	$2500 (kg/m^3)$
Calor específico del cristal	$750 (J/kgK)$

BESTEST 900's

La serie de casos 900 usa los mismos modelos de construcción de la serie 600, excepto que las propiedades de los muros y el piso cambian por materiales de mayor masa térmica. En la Tabla 5.3 se especifican las propiedades térmicas de estas edificaciones.

Tabla 5. 3. Propiedades de los componentes BESTEST 900's

Edificios da alta masa térmica						
Componente	Elemento	Espesor (m)	$k (W/mK)$	$R (m^2K/W)$	$\rho (kg/m^3)$	$C_p (J/kgK)$
Muros	Concreto	0.100	0.510	0.196	1400	1000
	Aislante	0.0615	0.040	1.537	10	1400
	Madera	0.009	0.140	0.064	530	900
Piso	Concreto	0.080	1.130	0.071	1400	1000
	Aislante	1.007	0.040	25.175		

5.1.4 Resultados BESTEST's 600's y 900's

En las Tablas 5.4 y 5.5, se muestran los resultados de las simulaciones y se comparan con los resultados reportados en el estándar ANSI/ASHRAE 140/2011, los parámetros comparados fueron carga de calentamiento anual (Anual Heating), carga anual de enfriamiento (Anual Cooling), pico de calentamiento (Peak Heating) y pico de enfriamiento (Peak Cooling).

Tabla 5. 4. Resultados BESTEST serie 600

Edificio de baja masa térmica						
Caso	600	610	620	630	640	650
Anual Heating (MWh)						
Minimun	4.296	4.355	4.613	5.050	2.751	-
Maximun	5.709	5.786	5.944	6.469	3.803	-
BESTEST Average	5.046	5.098	5.328	5.686	3.135	-
Presente Trabajo	4.496	4.544	4.617	4.944	2.761	-
Diferencia %	-10.9 %	-10.9 %	-13.3 %	-13.0 %	-11.9 %	-
Anual Cooling (MWh)						
Minimun	6.137	3.915	3.417	2.129	5.952	4.816
Maximun	8.448	6.1390	5.482	3.701	8.097	7.064
BESTEST Average	7.053	5.144	4.416	2.951	6.790	5.708
Presente Trabajo	6.686	4.660	3.925	2.489	6.363	5.652
Diferencia %	-5.2 %	-9.4 %	-11.1 %	-15.6 %	-6.3 %	-0.9 %
Peak Heating (KW)						
Minimun	3.437	3.437	3.591	3.592	5.232	-
Maximun	4.354	4.354	4.379	4.280	6.954	-
BESTEST Average	3.952	3.947	3.998	3.949	5.903	-
Presente Trabajo	3.806	3.795	3.798	3.777	6.352	-
Diferencia %	-3.7 %	-3.8 %	-5.0 %	-4.3 %	+7.6 %	-
Peak Cooling (KW)						
Minimun	5.965	5.669	3.634	3.072	5.884	5.831
Maximun	7.188	6.673	5.096	4.116	7.126	6.679
BESTEST Average	6.535	6.090	4.393	3.688	6.478	6.321
Presente Trabajo	6.535	6.162	3.781	3.237	6.456	6.416
Diferencia %	0.0 %	1.2 %	-13.9 %	-12.2 %	+0.4 %	+ 1.5 %

Tabla 5. 5. Resultados BESTEST serie 900

Edificio de alta masa térmica						
Caso	900	910	920	930	940	950
Anual Heating (MWh)						
Minimun	1.170	1.512	3.261000	4.143	0.739	-
Maximun	2.041	2.282	4.300	5.335	1.411	-
BESTEST Average	1.649	1.951	3.828	4.603	1.086	-
Presente Trabajo	1.297	1.596	3.333	4.009	0.804	-
Diferencia %	-21.3 %	-18.2 %	-12.9 %	-12.9 %	-25.9 %	-
Anual Cooling (MWh)						
Minimun	2.132	0.821	1.840	1.039	2.079	0.387
Maximun	3.669	1.883	3.313000	2.238	3.546	0.921
BESTEST Average	2.826	1.521	2.684	1.715	2.725	0.635
Presente Trabajo	2.428	1.146	2.395	1.447	2.355	0.517
Diferencia %	-14 %	-24.6 %	-10.7 %	-15.6 %	-13.5 %	-18.6 %
Peak Heating (KW)						
Minimun	2.850	2.858	3.308	3.355	3.980	-
Maximun	3.797	3.801	4.061	4.064	6.428	-
BESTEST Average	3.452	3.459	3.738	3.733	5.414	-
Presente Trabajo	3.228	3.230	3.538	3.556	4.878	-
Diferencia %	-6.5 %	-6.6 %	-5.3 %	-4.7 %	-9.9 %	-
Peak Cooling (KW)						
Minimun	2.888	1.896	2.385	1.873	2.888	2.033
Maximun	3.932	3.277	3.505	3.080	3.932	3.170
BESTEST Average	3.460	2.676	3.123	2.526	3.460	2.724
Presente Trabajo	3.189	2.524	2.706	2.164	3.189	2.561
Diferencia %	-7.8 %	-5.7 %	-13.3 %	-14.3 %	-7.8 %	-5.9 %

Análisis de resultados BESTEST's

La comparación de resultados, muestra que, 42 de los 44 resultados obtenidos son aceptables y se encuentran dentro del rango reportado por el estándar ANSI ASHRAE, los únicos resultados que estuvieron fuera del rango fueron las cargas anuales de calentamiento de los casos 630 y 930. Al obtener más del 95% de resultados, dentro del rango establecido por el estándar ANSI ASHRAE 140/2011, se demuestra que el usuario está familiarizado con el software, y posee las habilidades necesarias para utilizar correctamente las herramientas del software Design Builder.

5.2 Modelación de las cavidades experimentales

Se realizó la modelación de las dos cavidades experimentales, 1) cavidad con techo tradicional y 2) cavidad con techo verde ventilado, mediante el software Design Builder, para posteriormente simular el comportamiento térmico de éstas. A continuación, se presentan; 1) la geometría de las cavidades experimentales, 2) las propiedades térmicas de los materiales, 3) los datos climáticos y datos de sitio, considerados para la simulación y 4) el modelado de la cubierta vegetal, que se añadirá a la cavidad con techo verde ventilado.

5.2.3 Geometría de las cavidades experimentales

En la Figura 5.5 se muestra la cavidad experimental, modelada en el software Design Builder, cabe mencionar que, se respetaron las dimensiones reales de la cavidad utilizada en la fase experimental, éstas fueron; cavidad de madera de 0.95m x 0.95m x 0.95m y losa de concreto de 1.2m x 1.2m x 0.1m, además se consideró el color de la superficie exterior de la cavidad.

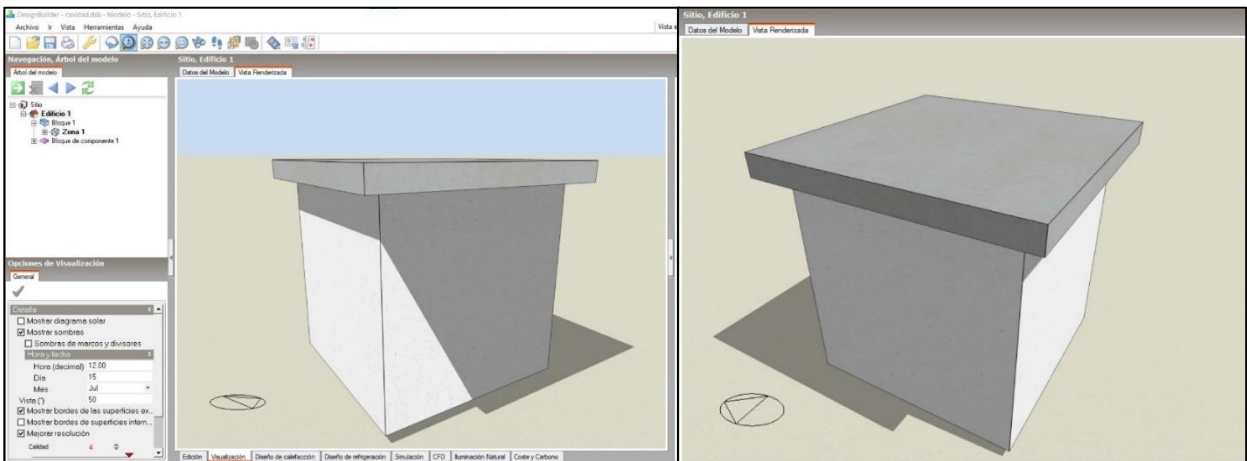


Figura 5. 3. Geometría de la cavidad experimental, modelada en Design Builder

5.2.4 Propiedades termofísicas de los materiales

En la Tabla 5.6, se muestran las propiedades termofísicas de los materiales que componen la cavidad experimental, los valores fueron obtenidos del trabajo realizado por Ávila, (2019), en su trabajo la autora realizó una etapa experimental con una cavidad construida con los mismos materiales que fueron utilizados para las cavidades del presente trabajo.

Tabla 5. 6. Propiedades termofísicas de los materiales

Material	Espesor (cm)	k (W/mK)	ρ (kg/m^3)	C_p (J/kgK)
Madera OSB	1.8	0.13	650	1880
Aislante térmico	2.5	0.0288	10	1470
Losa de concreto	10	1.74	2300	840

5.2.5 Datos climáticos y datos de sitio

Las variables climáticas, consideradas para las simulaciones, fueron obtenidas de la estación meteorológica del Cenidet, durante el periodo experimental que comprendió del 05/Junio/2021 al 12/Junio/2021. En la Figura 5.6 se muestran los registros de las 4 variables climáticas, estas variables fueron añadidas a un archivo de datos climáticos compatible con el software Design Builder, para posteriormente realizar las simulaciones. Para los datos de sitio (Figura 5.7), se consideraron; la altitud, longitud y latitud de la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México.

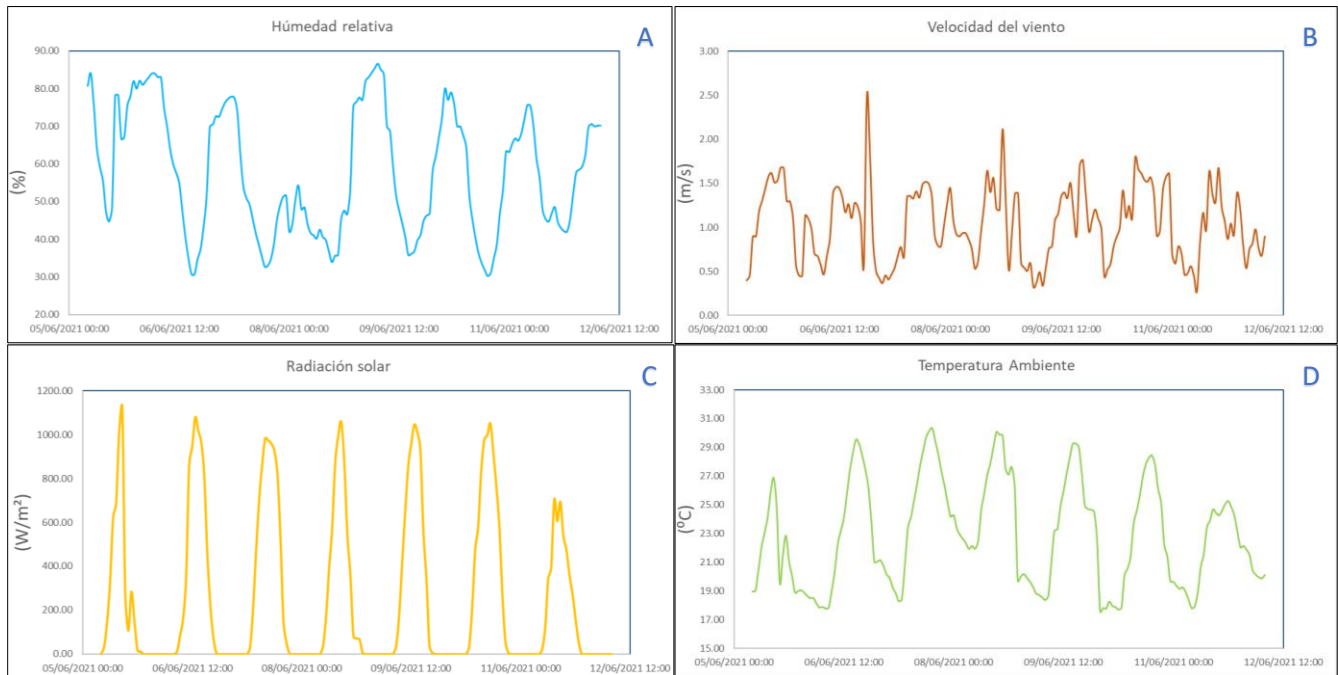


Figura 5. 6. Variables climáticas A) Humedad relativa, B) Velocidad del viento, C) Radiación solar y D) Temperatura ambiental

The screenshot shows the 'Sitio' configuration window with the following settings:

- Modelo:** Datos del Sitio
- Plantilla de Sitio:** Cuernavaca
- Plantilla:** Cuernavaca
- Ubicación:**
 - Latitud (°): 18.92
 - Longitud (°): -99.22
 - Zone climática ASHRAE: 3B
- Detalles del Sitio:**
 - Elevación sobre el nivel del mar (m): 1510
 - Nivel de exposición al viento: 2-Normal
 - Orientación (°): 0.0
 - Variación de Altura del Sitio: >>
 - Terreno: >>
 - Cielo: >>
 - Horizonte: >>
 - Temperaturas del Agua de la Red: >>
 - Precipitación: >>
 - Irrigación de Cubiertas Verdes: >>
 - CO2 y Contaminantes del Aire Exterior: >>
- Horario y Horario de Verano:** >>
- Datos Climáticos para Simulación:**
 - Datos climáticos horarios: MÉXICO-Cuernavaca
 - Día inicial de la semana (simulaciones): 8-Usar archivo climático
 - Usar indicadores de lluvia y nieve del archivo climático
- Datos Climáticos para Diseño de Calefacción:** >>
- Datos Climáticos para Diseño de Refrigeración:** >>

Figura 5. 7. Datos de sitio

5.2.6 Modelado de la cubierta vegetal

Para modelar e introducir la cubierta vegetal a la simulación, se ha optado por utilizar la herramienta “bloque de componente”, esta herramienta permite dibujar un bloque, al cual es posible asignarle propiedades térmicas y superficiales. Las propiedades termofísicas y superficiales de los bloques de componente, son incluidas en los cálculos de la simulación, sin embargo, no es posible almacenar o visualizar sus valores de temperatura superficial. El procedimiento para crear y asignarle propiedades térmicas y superficiales, al bloque de componente, es el siguiente:

1) *Dibujar la geometría del bloque de componente:* en la Figura 5.8 se muestra la geometría dibujada para representar a la cubierta vegetal, se respetaron todas las dimensiones del modelo experimental, la cubierta vegetal tuvo unas dimensiones de 1.2m x 1.2m x 0.02m, y se colocó a una altura de 0.3m respecto a la losa.

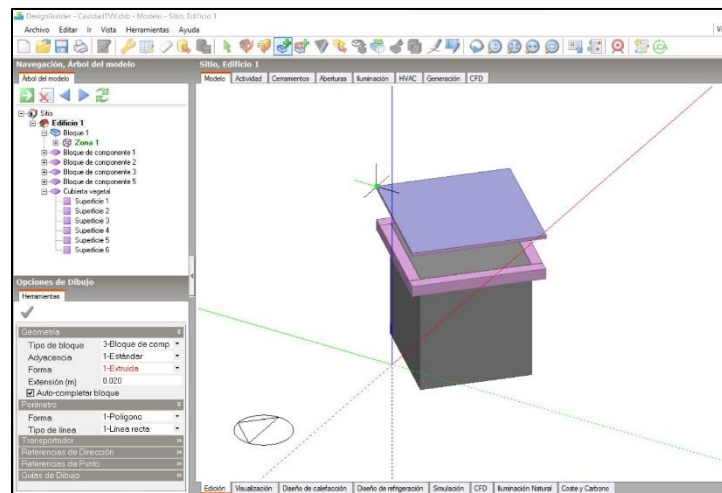


Figura 5. 4. Geometría del bloque de componente

2) *Crear y editar un nuevo material:* el siguiente paso es crear y editar un nuevo material, asignándole propiedades térmicas y superficiales. En la Figura 5.9 se muestra la edición del material nombrado “Cubierta vegetal”.

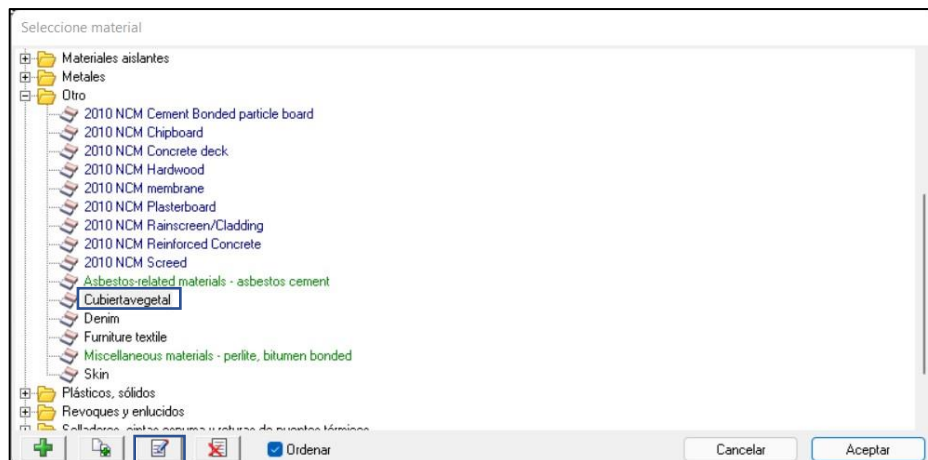


Figura 5. 5. Edición del material "Cubierta vegetal"

3) *Asignar propiedades termofísicas al nuevo material:* el tercer paso es asignarle nuevas propiedades termofísicas al material creado, existe la posibilidad de editar las 3 propiedades termofísicas (*conductividad, calor específico y densidad*) del material (Figura 5.10), o editar el valor R (*resistencia térmica*) del material (Figura 5.11).

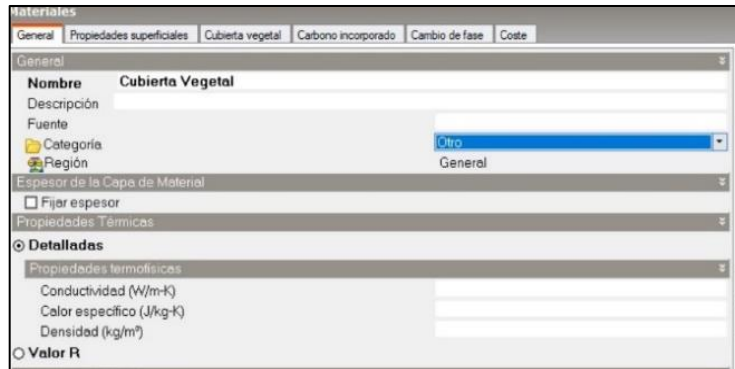


Figura 5. 10. Propiedades termofísicas del material

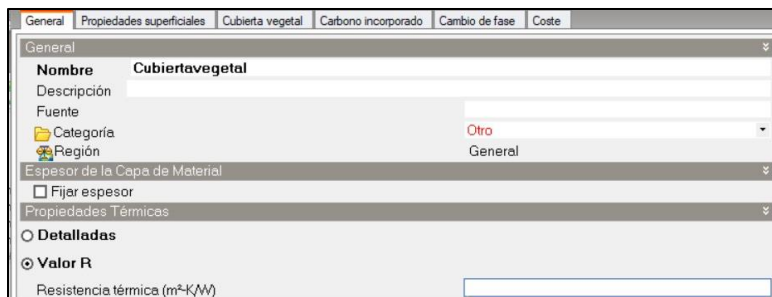


Figura 5. 11. Valor R del material

4) *Asignar propiedades superficiales al nuevo material:* Por último, se deben asignar las propiedades superficiales del material, en las Figura 5.12 y 5.13 se muestra la edición de estas 3 propiedades superficiales; *transmitancia, reflectancia y especularidad*.



Figura 5. 12. Transmitancia del material

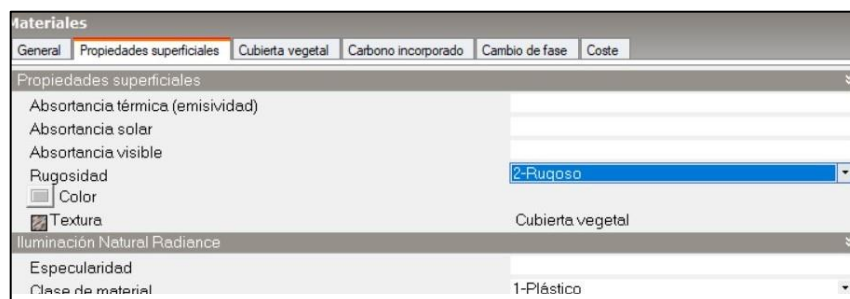


Figura 5. 13. Propiedades superficiales del material

5.3 Caracterización de la cubierta vegetal

Una vez creado el bloque de componente (véase la sección anterior), es necesario caracterizar, las propiedades térmicas y superficiales de la cubierta vegetal, monitoreada durante la fase experimental, para posteriormente, añadir estas características al bloque de componente y simular el comportamiento térmico de la cavidad experimental con techo verde ventilado (Figura 5.14).

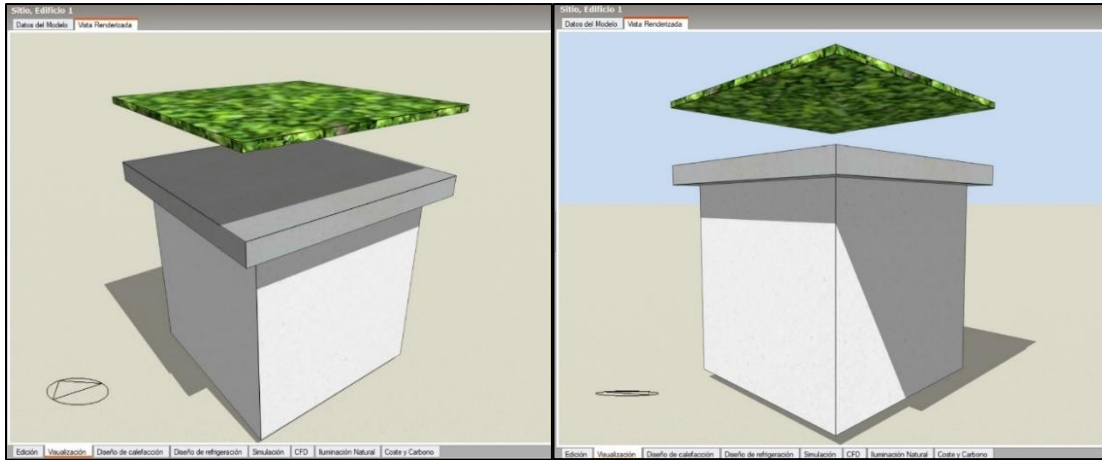


Figura 5. 6. Simulación de la cavidad experimental con techo verde ventilado

Transmisividad

Para calcular la transmisividad de la cubierta vegetal, se utilizaron los datos de radiación global, obtenidos por la estación meteorológica del Cenidet, y los datos de radiación bajo cubierta, obtenidos por el piranómetro colocado bajo la cubierta vegetal (véase capítulo IV). En la Figura 5.15, se muestran los resultados del cálculo de la transmisividad. La fórmula utilizada para calcular esta propiedad fue:

$$Transmisividad_{cubierta\ vegetal} = \frac{radiación\ global}{radiación\ bajo\ cubierta}$$

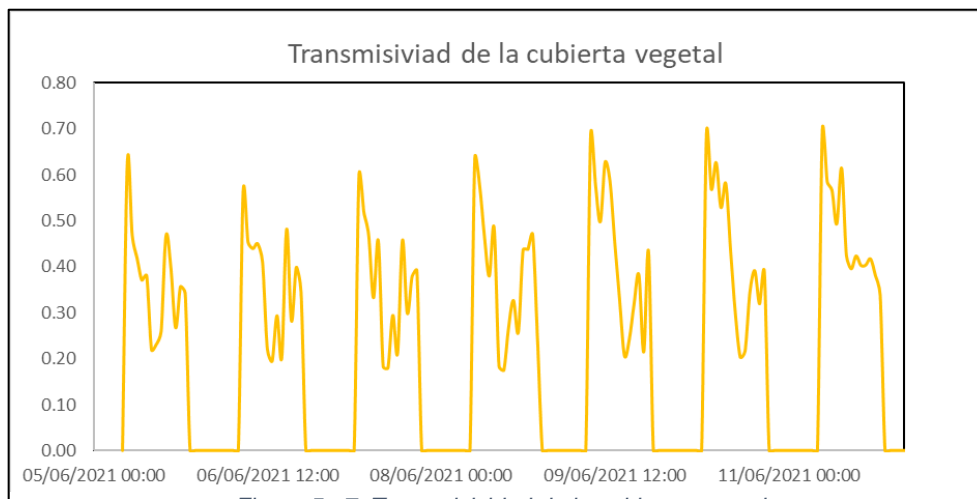


Figura 5. 7. Transmisividad de la cubierta vegetal

Absortancia

Debido a que no se cuenta con los datos experimentales necesarios para calcular la absortancia de la cubierta vegetal, se decidió, consultar una fuente bibliográfica en la cual se tuviera un modelo físico similar al de la cubierta vegetal. De la búsqueda bibliográfica, se eligió el trabajo desarrollado por Suklje, (2019), el modelo físico de este trabajo, consistió, de una cubierta vegetal vertical y una envolvente, ambas separadas por una capa de aire (Figura 5.16 a). Los autores consideraron la capa vegetal y la capa de aire como una capa homogénea con propiedades termofísicas aparentes (Figura 5.16 b). Las propiedades aparentes, fueron calculadas mediante un método de modelación inversa, en la Tabla 5.7 se muestran los valores calculados de transmisividad.

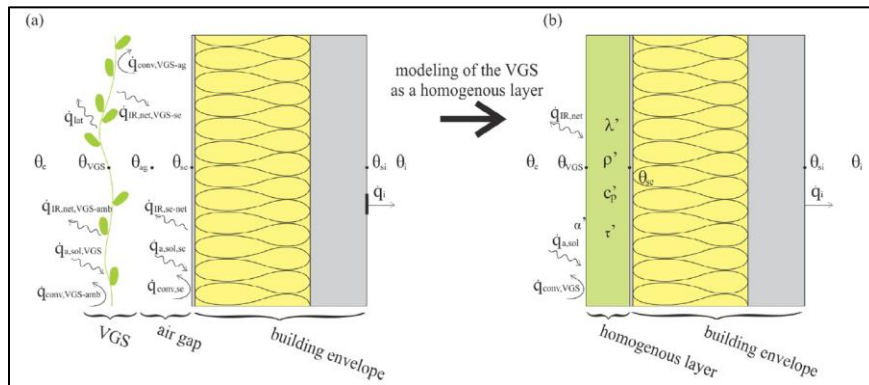


Tabla 5. 7. Absortancia capa homogénea (Suklje, 2019)

	α
Promedio	0.16
Mediana	0.02

Figura 5. 8. Modelo físico a) cubierta vegetal, aire y envolvente y b) capa homogénea y envolvente (Suklje, 2019).

Reflectancia

La reflectancia se calculó considerando los valores de transmisividad y de absortancia. En la Figura 5.17 se muestran los valores calculados de reflectancia, la fórmula para realizar los cálculos fue:

$$Reflectancia = 1 - Transmisividad - Absortancia$$

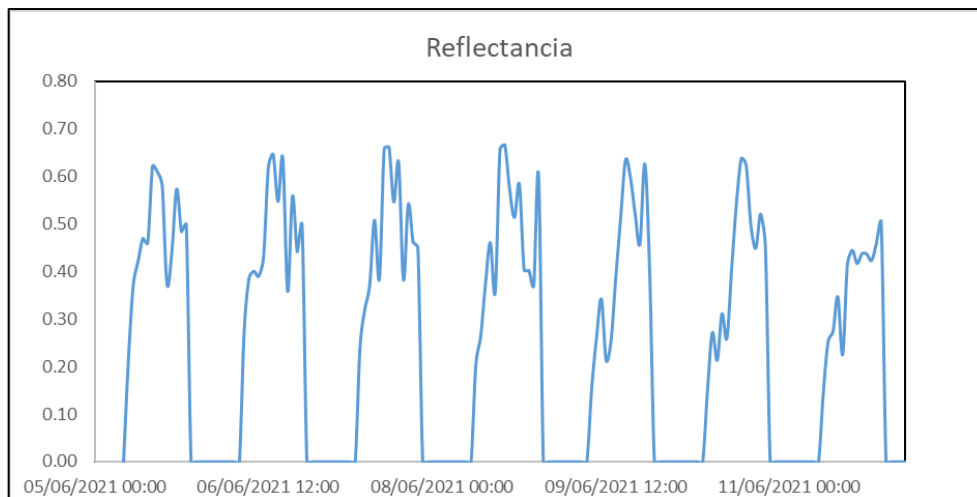


Figura 5. 9. Reflectancia de la cubierta vegetal

Valor R

Para calcular el valor R de la cubierta vegetal se consideraron los datos experimentales de temperatura de la cubierta vegetal, radiación global y la propiedad de absorción, no se consideraron ganancias o pérdidas convectivas en el cálculo. En la Figura 5.19 se muestran los valores R calculados, la fórmula utilizada fue:

$$R = \frac{\Delta T}{Q_{rad}} = \frac{T_1 - T_2}{\alpha * G_{sol}} = \frac{K * m^2}{W}$$

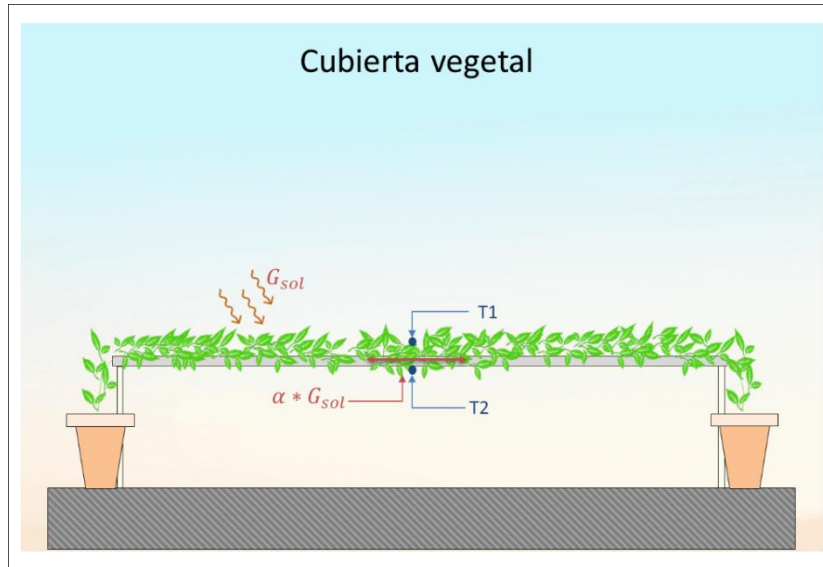


Figura 5. 10. Esquema de la cubierta vegetal

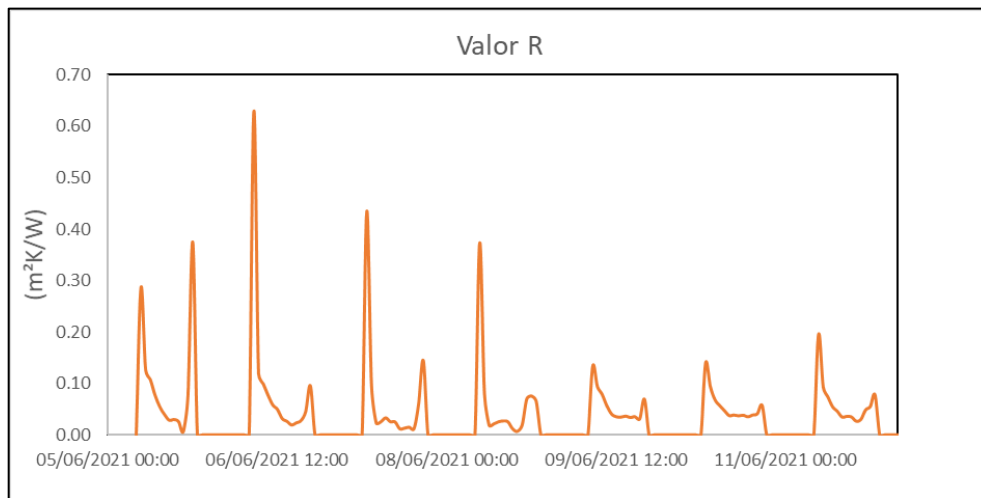


Figura 5. 11. Valores R calculados

5.3.1 Propiedades de la cubierta vegetal

En la Tabla 6.8 se presentan los valores calculados de las propiedades de la cubierta vegetal, incluyendo los datos de absorción que fueron obtenidos de una fuente bibliográfica. Se realizaron varias simulaciones preliminares, para determinar con que valores, los resultados simulados eran más acordes a los resultados experimentales, de estas pruebas preliminares se llegó a la conclusión de utilizar los valores promedio, ya que, con estos valores se obtuvieron los resultados simulados más apegados a los valores experimentales.

Tabla 5. 8. Propiedades de la cubierta

	Transmisividad	*Absortancia	Reflectancia	R (K * m ² / W)
Mínimo	0.00	-	0.15	0.01
Máximo	0.69	-	0.67	0.63
Promedio	0.40	0.16	0.44	0.07
Mediana	0.40	0.02	0.44	0.04

*Fuente: Suklje, (2019)

5.4 Validación

Una vez caracterizada la cubierta vegetal, se realizaron las simulaciones de las cavidades experimentales, para éstas, el periodo de simulación establecido fue del 05/Junio/2021 al 12/Junio/2021, con pasos de tiempo de 1 minuto. Para validar las simulaciones, se compararon los resultados experimentales con los resultados simulados, mediante el parámetro MBE (Mean Bias Error), el cual se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{y - x}{x}$$

Donde y son los valores simulados y x son los valores experimentales, y n es el número de datos.

5.4.1 Cavidad experimental con techo tradicional

En la Figura 5.20 se muestra la comparativa entre los valores experimentales y simulados de la cavidad experimental con techo tradicional, cabe mencionar, que estos valores corresponden a las temperaturas internas de la cavidad.

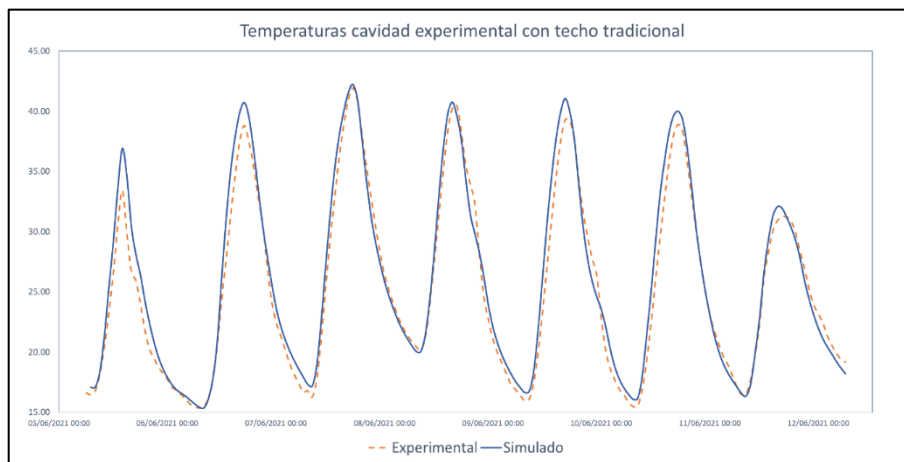


Figura 5. 12. Temperaturas internas de la cavidad con techo tradicional

En la Tabla 5.9 se muestran los resultados de la cavidad con techo tradicional. Las temperaturas experimentales se registraron en un rango de 15.3 °C a 41.9 °C, y las simuladas se estimaron en un rango de 15.3 °C a 42.2 °C, por otra parte, la temperatura promedio experimental fue de 25.3 °C y la simulada fue de 26 °C, con una diferencia de 0.7 °C. El valor MBE muestra que la variación entre los conjuntos de datos es baja.

Tabla 5. 9. Resultados de la cavidad con techo tradicional

<i>Cavidad con techo tradicional</i>				
<i>Datos</i>	<i>Mínimo</i>	<i>Máximo</i>	<i>Promedio</i>	<i>MBE</i>
<i>Experimentales</i>	15.3	41.9	25.3	0.7
<i>Simulados</i>	15.3	42.2	26.0	

5.4.2 Cavidad con techo verde ventilado

En la Figura 5.21 se muestran los valores experimentales y simulados, correspondientes a la cavidad con techo verde ventilado.

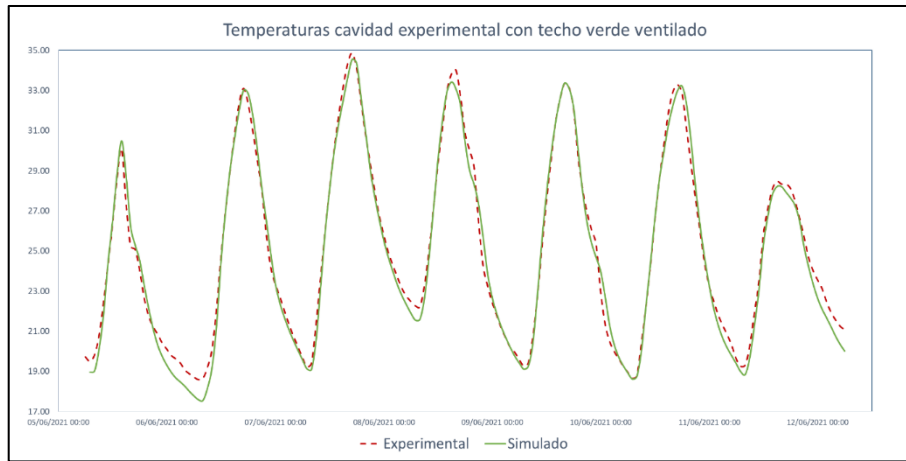


Figura 5. 13. Temperaturas internas de la cavidad con techo verde ventilado

En la Tabla 5.10 se muestran los resultados de la cavidad con techo verde ventilado, la temperatura mínima experimental fue de 18.6 °C y la simulada fue de 17.6 °C, mientras que la temperatura máxima experimental fue de 34.8 °C y la simulada fue de 34.5 °C, la diferencia entre las temperaturas promedio fue de 0.1 °C. El valor MBE muestra que el error entre las series de datos es bajo.

Tabla 5. 10. Resultados de la cavidad con techo verde ventilado

Datos	Cavidad con techo verde ventilado			MBE
	Mínimo	Máximo	Promedio	
Experimentales	18.6	34.8	24.9	0.2
Simulados	17.6	34.5	24.8	

5.5 Simulación del techo verde ventilado aplicado en una vivienda de referencia

Las simulaciones del presente trabajo se llevaron a cabo considerando las características de la edificación de referencia utilizada para realizar los indicadores de la NOM-020-ENER-2011. Las especificaciones (planos, orientación, propiedades de los materiales y disposición de componentes y aberturas) de la edificación, se obtuvieron del trabajo *Ávila (2019)* y son referenciados al trabajo de *Heard (1993)*.

5.5.1 Descripción general de la vivienda

La edificación se compone de dos plantas, ambas con una altura de 2.5 m, la envolvente tiene un área de 160 m² y el techo 54.3 m², la fachada principal está orientada hacia el norte. En la Figura 5.22 se muestran los planos.

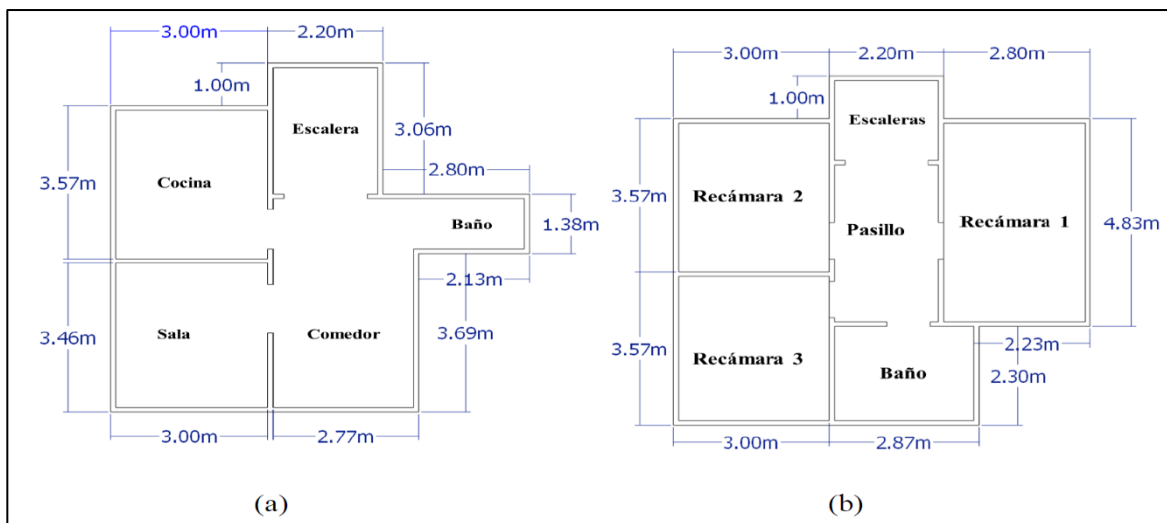


Figura 5. 14. Vivienda de referencia a) Plano planta baja b) Plano planta alta

En la Figura 5.23 y 5.24 se aprecia la disposición y dimensiones de las ventanas y puertas.

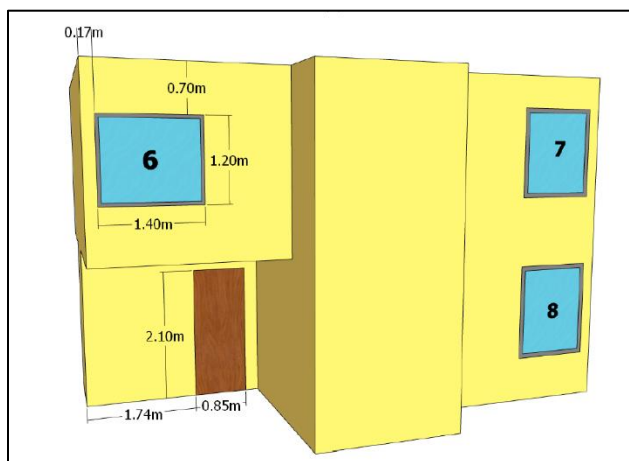


Figura 5. 23. Fachada norte vivienda de referencia

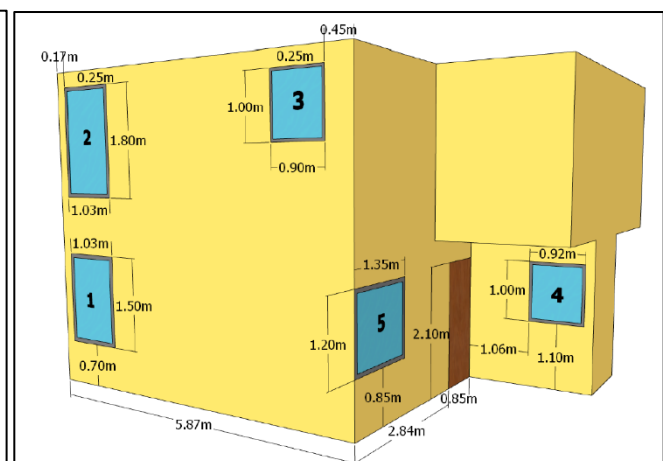


Figura 5. 24. Fachada sur vivienda de referencia

5.5.2 Propiedades de los materiales

En la Tabla 5.11 se muestran las propiedades termofísicas de todos los elementos de construcción de la edificación y en la Tabla 5.12 se muestran las propiedades correspondientes a las ventanas.

Tabla 5. 11. Propiedades termofísicas de los materiales

Elemento	Material	Espesor (m)	c_p ($J/kg K$)	k ($W/m K$)	ρ (kg/m^3)
Techo	Yeso	0.015	1000	0.372	800
	Concreto	0.10	840	1.74	2300
	Impermeabilizante	0.002	800	0.17	1127
Muros	Yeso	0.015	1000	0.372	800
	Ladrillo	0.14	800	0.81	1600
	Mortero	0.015	837	0.72	1890
Segundo Piso	Mosaico	0.01	795	1.136	2600
	Concreto	0.10	840	1.74	2300
	Yeso	0.015	1000	0.372	800
Primer Piso	Mosaico	0.01	795	1.136	2600
	Concreto	0.10	840	1.74	2300

Tabla 5. 12. Propiedades del vidrio

Propiedades del vidrio	
Espesor	4 mm
k ($W/m K$)	1
Transmitancia (solar)	0.816
Reflectancia interior (solar)	0.075
Reflectancia exterior (solar)	0.075
Transmitancia (visible)	0.892
Reflectancia interior (visible)	0.081
Reflectancia exterior (visible)	0.081
Transmitancia (infrarrojo)	0
Reflectancia interior (infrarrojo)	0.84
Reflectancia exterior (infrarrojo)	0.84

La vivienda de referencia, fue modelada en el software Design Builder para posteriormente simular su comportamiento térmico-energético. En las Figuras 5.27-5.28 se puede apreciar el modelado de la vivienda.

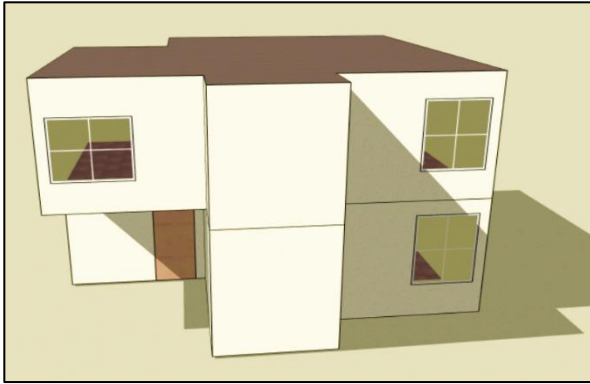


Figura 5. 25. Fachada norte del modelo

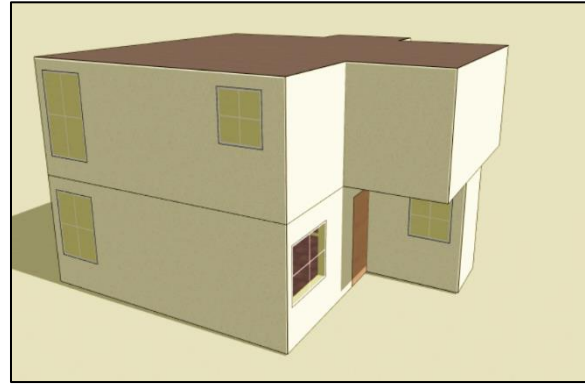


Figura 5. 26. Fachada sur del modelo

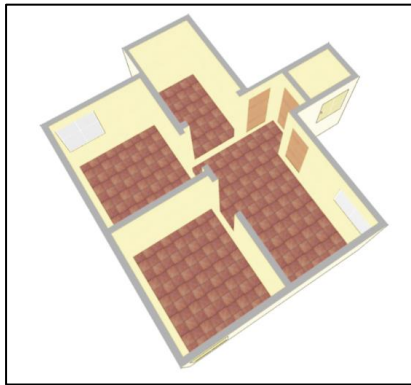


Figura 5. 15. Planta baja del modelo generado

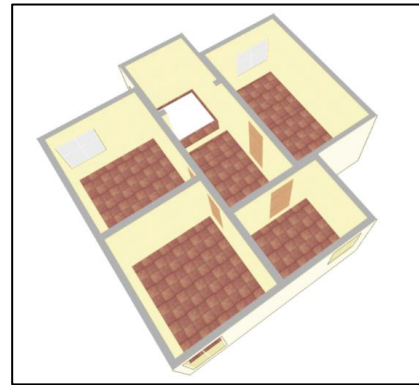


Figura 5. 16. Planta alta del modelo generado

5.5.3 Vivienda con techo verde ventilado

Para simular el techo verde ventilado, se colocó un bloque de componente con las propiedades térmicas y superficiales de la cubierta vegetal. La cubierta se colocó a una altura de 30 cm respecto a la losa de la vivienda (Figura 5.29).

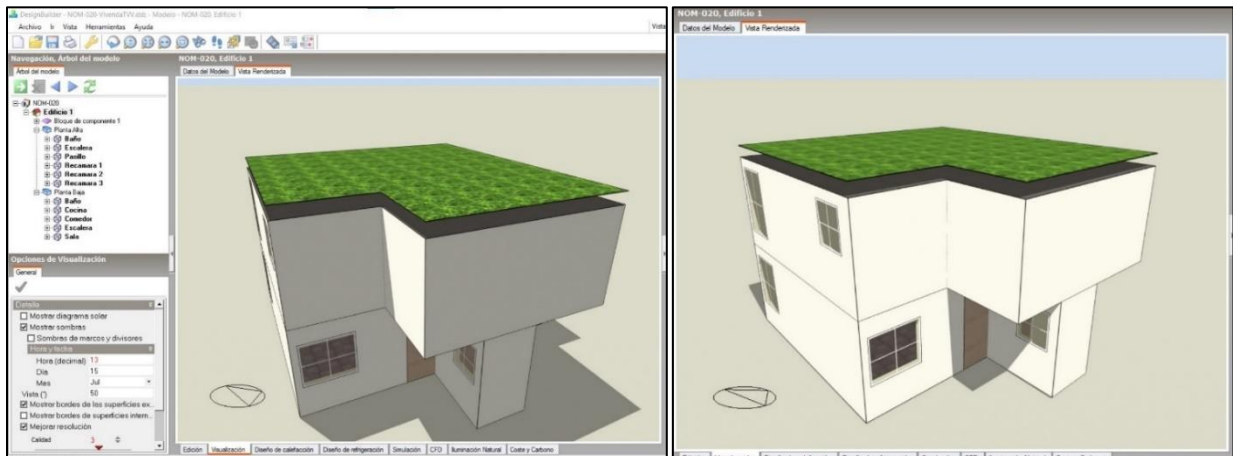


Figura 5. 17. Modelado de la vivienda residencial con techo verde ventilado

5.5.4 Datos de la simulación

Se realizaron simulaciones con 4 escenarios diferentes: 1) Vivienda con techo tradicional, 2) Vivienda con techo tradicional y sistema de aire acondicionado, 3) Vivienda con techo verde ventilado y 4) Vivienda con techo verde ventilado y sistema de aire acondicionado. El periodo de simulación fue programado para 1 año entero y los pasos de tiempo utilizados fueron de 1 minuto (Figuras 5.30 y 5.31).

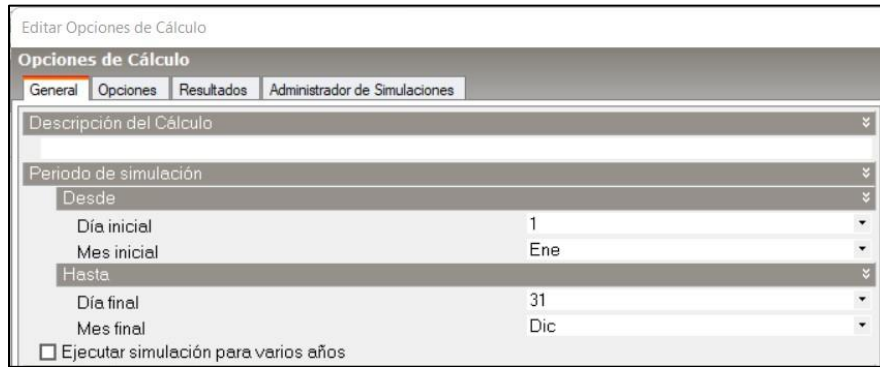


Figura 5. 30. Periodo de simulación

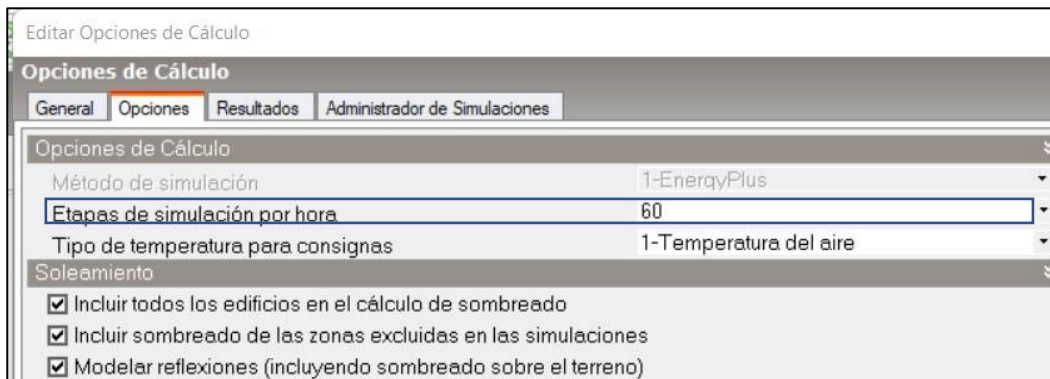


Figura 5. 31. Paso de tiempo de simulaciones

5.5.5 Datos de sitio y de clima

Los datos de sitio considerados fueron los de la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México, cuyas coordenadas geográficas son: Latitud: 18.918, Longitud: -99.234 y una altitud de 1510 MSNM, la ciudad de Cuernavaca presenta un clima cálido subhúmedo con lluvias en verano. Las variables climáticas fueron obtenidas de Estación Meteorológica Automática (EMA) perteneciente al sistema de monitoreo del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), que se encuentra ubicada en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA).

Capítulo 6

Resultados de las simulaciones

En el presente capítulo se presentan los resultados de la simulación energética de la vivienda de referencia, bajo 4 escenarios diferentes: 1) vivienda con techo tradicional en evolución libre, 2) vivienda con techo verde ventilado en evolución libre, 3) vivienda con techo tradicional con sistema de aire acondicionado y 4) vivienda con techo verde ventilado y sistema de aire acondicionado. A continuación, se presentan de manera individual los resultados de cada escenario, se muestran los valores promedio mensuales de todo el año, y los valores promedio por hora obtenidos durante la semana más cálida del año, esta semana tuvo lugar del 7 al 14 de abril.

Abreviaturas

Para una presentación más sencilla de resultados se han empleado las siguientes abreviaturas y palabras clave (Tabla 6.1)

Tabla 6. 1. Tabla de abreviaturas

Abreviatura	Significado
<i>Tradicional</i>	<i>Temperatura promedio de la vivienda completa con techo tradicional</i>
<i>Tradicional PA</i>	<i>Temperatura promedio de la planta alta de la vivienda con techo tradicional</i>
<i>Tradicional PB</i>	<i>Temperatura promedio de la planta baja de la vivienda con techo tradicional</i>
<i>Tradicional HVAC</i>	<i>Temperatura promedio de la vivienda completa con techo tradicional y sistema de refrigeración</i>
<i>Tradicional HVAC PA</i>	<i>Temperatura promedio de la planta alta de la vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración</i>
<i>TVV</i>	<i>Temperatura promedio de la vivienda completa con techo verde ventilado</i>
<i>TVV PA</i>	<i>Temperatura promedio de la planta alta de la vivienda con techo tradicional</i>
<i>TVV PB</i>	<i>Temperatura promedio de la planta baja de la vivienda con techo verde ventilado</i>
<i>TVV HVAC</i>	<i>Temperatura promedio de la vivienda completa con techo verde ventilado y sistema de refrigeración</i>
<i>TVV HVAC PA</i>	<i>Temperatura promedio de la planta alta de la vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración</i>
<i>Confort</i>	<i>Intervalo de confort térmico</i>
<i>T Ambiente</i>	<i>Temperatura promedio ambiente</i>

6.1 Vivienda con techo tradicional

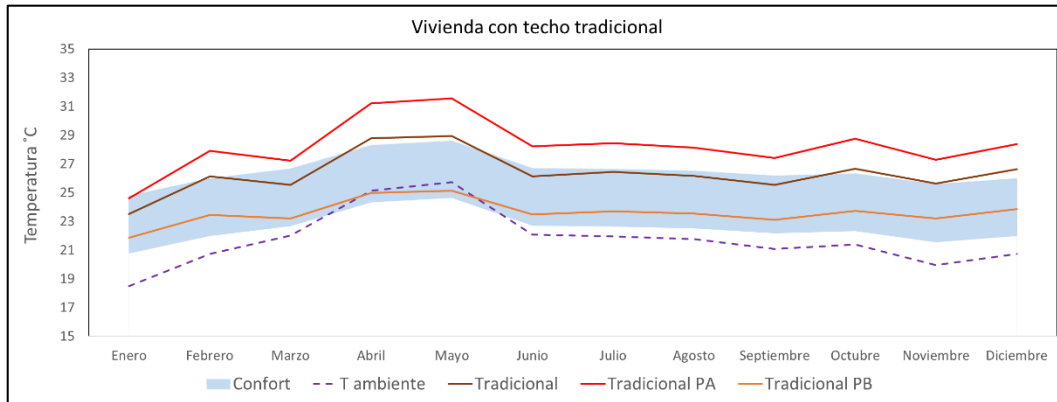


Figura 6. 1. Temperaturas mensuales vivienda con techo tradicional

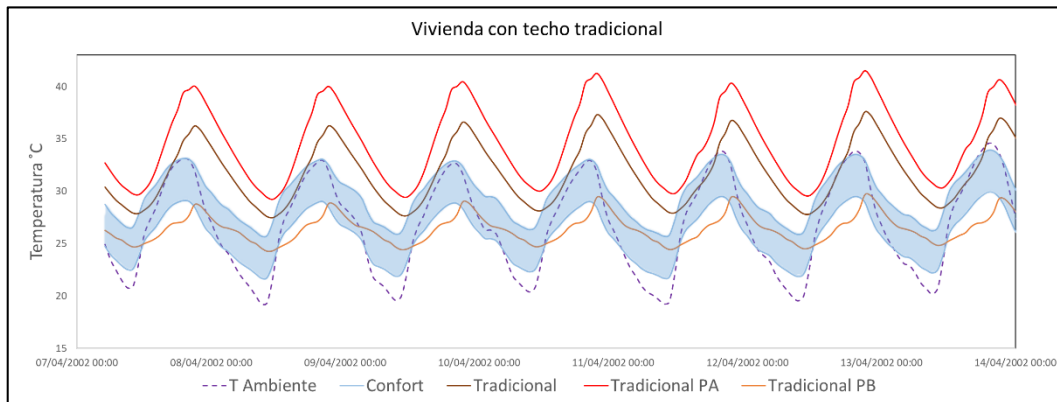


Figura 6. 2. Temperaturas durante la semana más cálida vivienda con techo tradicional

En la Figura 6.1 se muestran resultados de simulación del primer escenario “vivienda con techo tradicional”, en la gráfica se observa que, durante 5 de los 12 meses, las temperaturas promedio de la vivienda estuvieron fuera del intervalo de confort térmico. Las temperaturas mensuales de la planta alta se mantuvieron, los 12 meses, fuera del intervalo de confort, por el contrario, en la planta baja todo el año se tuvieron temperaturas de confort. En la Figura 6.2 se observa el comportamiento térmico de la vivienda durante la semana más cálida del año, se puede apreciar que, en la vivienda solo se tuvieron temperaturas confortables durante un breve lapso del día (6 horas al día aprox.), por otro lado, en la planta alta de la vivienda no se registraron temperaturas dentro de la zona de confort, y en la planta baja se presentaron temperaturas confortables durante las 24 del día. En general la temperatura promedio de la planta alta fue más elevada que la temperatura promedio de toda la vivienda y que la temperatura promedio de la planta baja.

6.2 Vivienda con techo verde ventilado

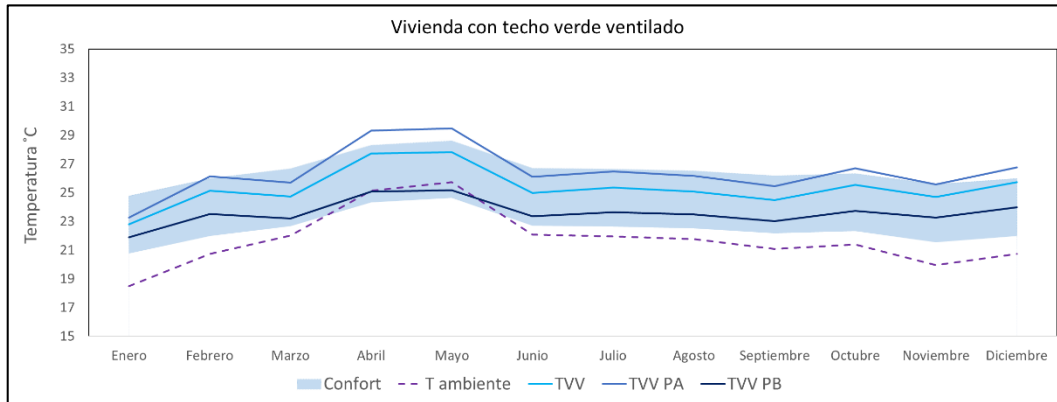


Figura 6. 3. Temperaturas mensuales vivienda con techo verde ventilado

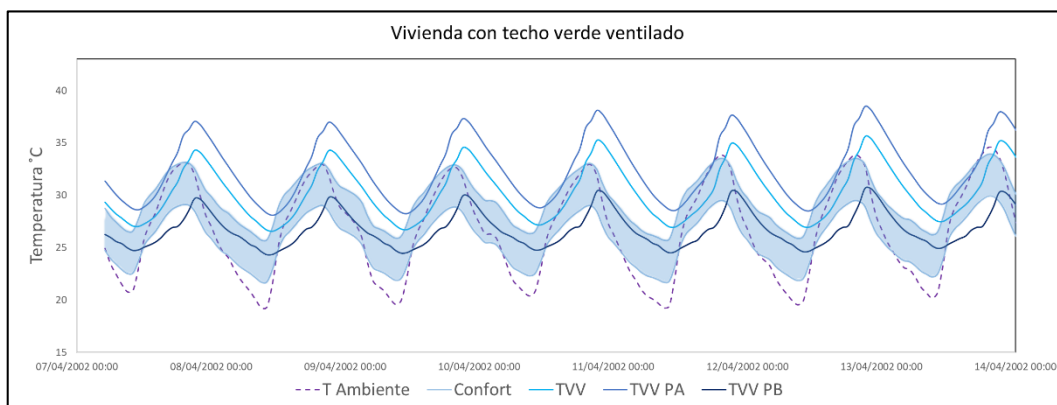


Figura 6. 4. Temperaturas durante la semana más cálida vivienda con techo verde ventilado

En la Figura 6.3, se muestran los resultados simulados del segundo escenario “Vivienda con techo verde ventilado”, se observa que la temperatura promedio de la vivienda con techo verde ventilado se mantuvo, durante los 12 meses, dentro de la zona de confort. La planta alta registró 7 meses con temperaturas fuera del intervalo de confort, mientras que, la planta baja registró los 12 meses del año temperaturas confortables. En la Figura 6.4 se muestran los resultados de la semana más cálida del año, durante este periodo la vivienda registró temperaturas confortables durante 9 horas al día (aprox.), la planta alta registró temperaturas de confort durante 5 horas al día (aprox.), y la planta baja registró temperaturas de confort durante las 24 horas del día. Durante todo el periodo de simulación, la planta alta presentó temperaturas más elevadas que la planta baja.

6.3 Vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración

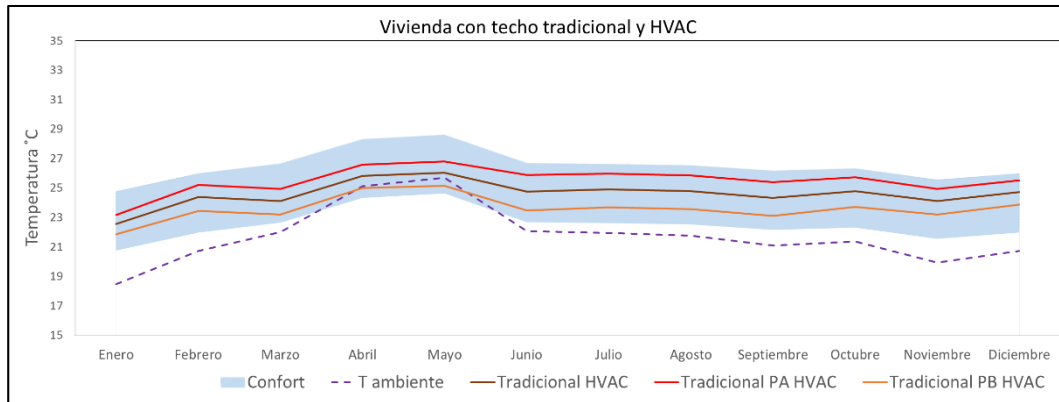


Figura 6. 5. Temperaturas mensuales vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración

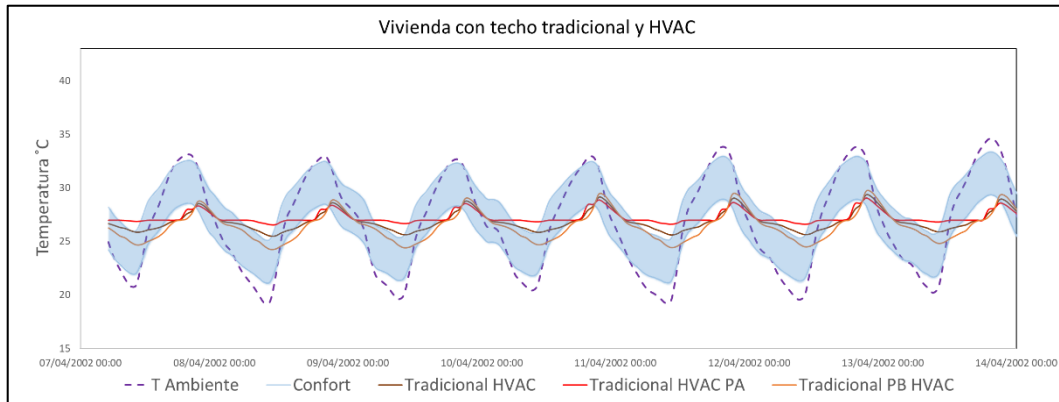


Figura 6. 6. Temperaturas durante la semana más cálida vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración

En las Figuras 6.5 y 6.6 se observan los resultados de la simulación con las condiciones del tercer escenario “Vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración”, se observa que las temperaturas promedio mensuales de toda la vivienda (incluyendo la planta alta y la planta baja) se mantuvieron, durante todo el año, dentro del intervalo de confort. En general las temperaturas de la planta alta fueron más elevadas que las temperaturas de la planta baja y las temperaturas de la vivienda completa, sin embargo, todas las temperaturas se mantuvieron dentro del intervalo de confort.

6.4 Vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración

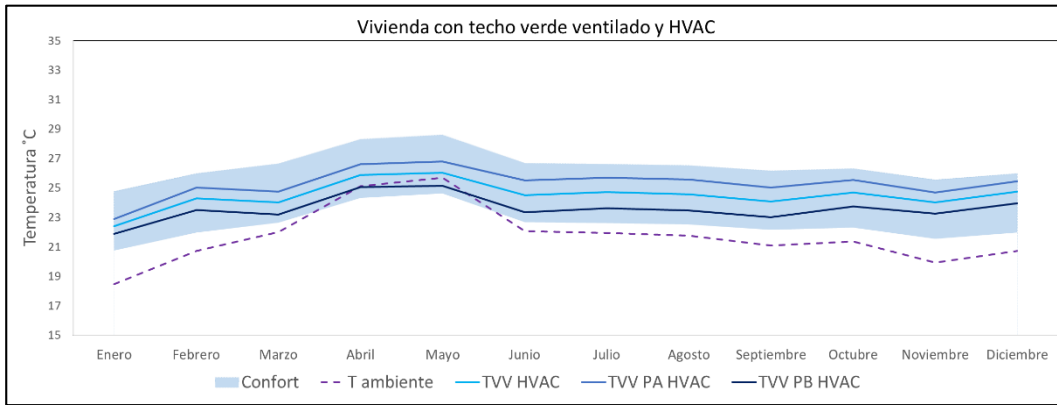


Figura 6. 7. Temperaturas mensual vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración

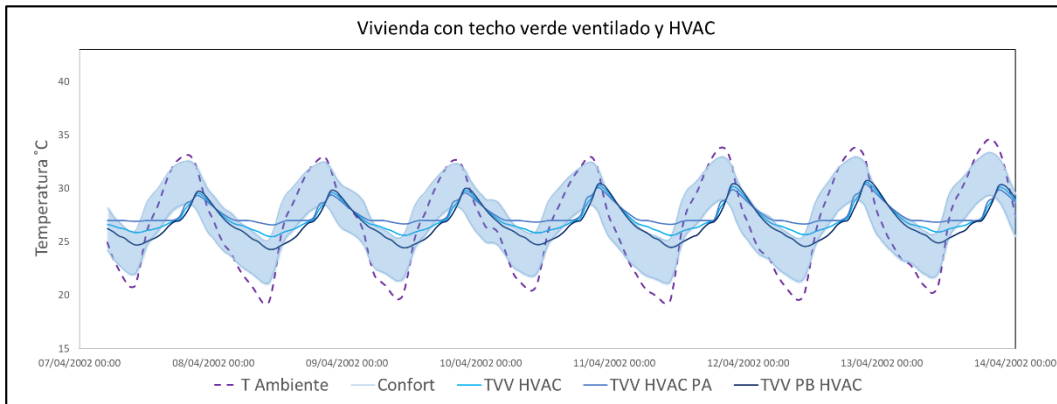


Figura 6. 8. Temperaturas durante la semana más cálida vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración

En la Figuras 6.7 y 6.8 se observan los resultados de la simulación bajo las condiciones del cuarto escenario “Vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración”. Se observa que las temperaturas promedio de la vivienda se mantuvieron durante todo el periodo de simulación, dentro del intervalo de confort, lo mismo sucedió con las temperaturas de la planta alta y la planta baja. Durante todo el año, la planta alta registró las temperaturas más elevadas, sin embargo, siempre se mantuvieron dentro del intervalo de confort térmico.

6.5 Ganancias térmicas de los techos

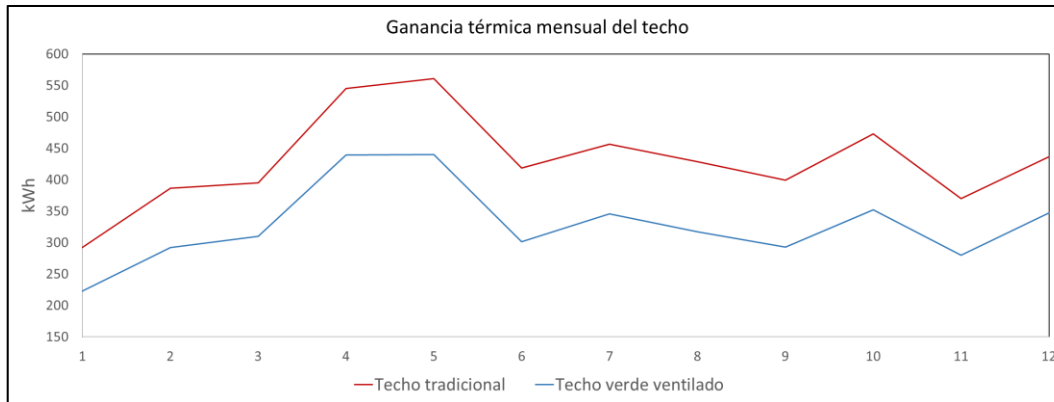


Figura 6. 7. Ganancias térmicas mensuales de los techos

En la Figura 6.9 se presentan las ganancias térmicas obtenidas de la simulación de las viviendas con techo tradicional y con techo verde ventilado. La vivienda con techo tradicional registró mayores ganancias térmicas durante todo el año, con una diferencia promedio mensual de 100 kWh, respecto a las ganancias térmicas de la vivienda con techo verde ventilado. El mes en el que se presentaron mayores ganancias térmicas fue el mes de mayo, y el mes con menores ganancias térmicas fue el mes de enero para ambos casos. La mayor ganancia térmica de la vivienda con techo tradicional fue de 560kwh y la mayor ganancia térmica de la vivienda con techo verde ventilado fue de 440 kWh.

6.6 Cargas de enfriamiento de las viviendas con sistema de refrigeración

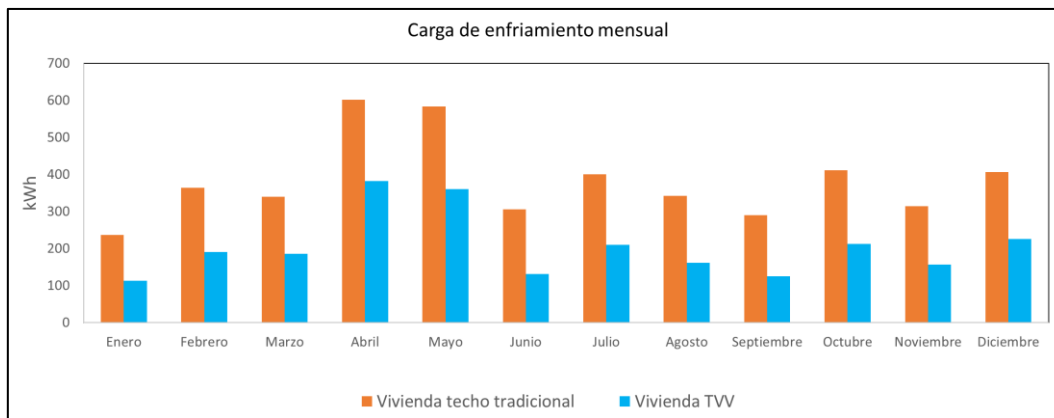


Figura 6. 8. Carga de enfriamiento anual

En la Figura 6.10 se muestran las cargas mensuales de enfriamiento de las viviendas con sistema de refrigeración, se observa que la vivienda con techo tradicional tiene una mayor carga de enfriamiento, los 12 meses del año, en comparación con la vivienda con techo verde ventilado. La mayor carga de enfriamiento se presentó en abril y fue de 582 kWh para la vivienda con techo tradicional y 360 kWh para la vivienda con techo verde ventilado.

6.7 Análisis de resultados

Para analizar el efecto que tiene el techo verde ventilado sobre el rendimiento térmico de la vivienda de referencia, se realizan dos comparaciones, la primera entre los resultados del escenario 1) Vivienda con techo tradicional y el escenario 2) Vivienda con techo verde ventilado, y la segunda entre los resultados del escenario 3) Vivienda con techo tradicional y sistema de refrigeración y el escenario 4) Vivienda con techo verde ventilado y sistema de refrigeración.

Comparativa vivienda con techo tradicional y vivienda con techo verde ventilado

Periodo anual

En la Tabla 6.2 se presentan los resultados de todo el periodo de simulación (1 año), se puede observar que la temperatura promedio anual de la vivienda con techo tradicional es de 26.3 °C, mientras que, la temperatura promedio anual de la vivienda con techo verde ventilado es de 25.3°C. En ambas viviendas, las temperaturas de la planta baja fueron idénticas con un valor promedio anual de 23.6 °C. En la planta alta de ambas viviendas se registraron las temperaturas más elevadas, la temperatura promedio anual de la vivienda con techo tradicional fue de 28.3 °C, y en la vivienda con techo verde ventilado fue de 26.4 °C. Las temperaturas promedio mensuales de la vivienda con techo tradicional se mantuvieron dentro del intervalo de confort durante 6 meses, mientras que las temperaturas de la vivienda con techo verde ventilado se mantuvieron los 12 meses del año dentro del intervalo de confort térmico. De las temperaturas promedio mensuales de la planta alta, la vivienda con techo tradicional solo registró 1 mes dentro del intervalo de confort, mientras que, la vivienda con techo verde ventilado registró 7 meses dentro del intervalo de confort. Las temperaturas de la planta baja de ambas viviendas se mantuvieron dentro del intervalo de confort los 12 meses del año.

Tabla 6. 2.Resultados anuales vivienda con techo tradicional y con techo verde ventilado

Temperatura °C	Temperatura		Vivienda con techo tradicional			Vivienda con techo verde ventilado		
	Ambiental	Confort	Completa	Planta alta	Planta baja	Completa	Planta alta	Planta baja
Mínima	18.5	20.8	23.5	24.6	21.8	22.8	23.2	21.8
Máxima	25.7	28.6	28.9	31.5	25.1	27.8	29.4	25.1
Promedio	21.7	24.5	26.3	28.3	23.6	25.3	26.4	23.6
Meses en confort			6	1	12	12	7	12
Tiempo de confort			50%	8%	100%	100%	58%	100%

Periodo semana más cálida del año

En la Tabla 6.3 se muestran los resultados simulados de la semana más cálida del año, se observa que, durante este periodo la temperatura promedio de la vivienda con techo tradicional fue de 31.8 °C, mientras que, la vivienda con techo verde ventilado registró una temperatura promedio de 30.3 °C. En la planta alta de ambas viviendas se registraron las mayores temperaturas, en el caso de la vivienda con techo tradicional se tuvo una temperatura promedio de 34.7 °C y en la vivienda con techo verde ventilado se tuvo una temperatura promedio de 32.5 °C. En la planta baja de la vivienda con techo tradicional se registró una temperatura promedio de 26.5 °C, mientras que, en la vivienda con techo verde ventilado se tuvo una temperatura de 26.8 °C.

Durante este periodo, que comprendió 168 horas, la vivienda con techo tradicional registró 41 horas con temperaturas dentro del intervalo de confort; en la planta baja se mantuvieron temperaturas de confort durante toda la semana, mientras que, en la planta alta no se registraron temperaturas dentro del intervalo de confort. En el otro escenario, la vivienda con techo verde ventilado registró 62 horas con temperaturas dentro del intervalo de confort, y la planta alta registró 35 horas con temperaturas confortables, mientras que, en la planta baja se registraron durante toda la semana temperaturas dentro del intervalo de confort.

Tabla 6. 3. Resultados durante la semana más cálida, vivienda con techo tradicional y con techo verde ventilado

Temperatura °C	Temperatura		Vivienda con techo tradicional			Vivienda con techo verde ventilado		
	Ambiental	Confort	Completa	Planta alta	Planta baja	Completa	Planta alta	Planta baja
Mínima	19.2	21.7	27.5	29.2	24.2	26.5	28.1	24.3
Máxima	34.5	33.9	37.6	41.5	29.7	35.6	38.5	30.7
Promedio	26.6	27.7	31.8	34.7	26.5	30.3	32.5	26.8
Horas en confort			41	0	168	62	35	168
Tiempo de confort			24%	0%	100%	37%	21%	100%

Ganancia térmica de los techos

En la Tabla 6.4 se muestran las ganancias térmicas de los techos de ambas viviendas, se observa que, el techo tradicional tuvo una ganancia térmica anual de 5160.8 kWh, mientras que, el techo verde ventilado registró una ganancia térmica anual de 3937.8 kWh, esta diferencia representa una disminución de la ganancia térmica del 24%. La ganancia térmica promedio mensual del techo tradicional fue de 430 kWh y la del techo verde ventilado fue de 328.2 kWh, en ambos casos la ganancia térmica máxima se presentó en el mes de mayo, en este mes el techo tradicional registró una ganancia de 560.6 kWh y el techo verde ventilado registró una ganancia de 440.2 kWh, esto significa una disminución de la ganancia térmica del 21%. La menor ganancia térmica se registró en el mes de enero y fue de 292.3 kWh para el techo tradicional, y 222.5 para el techo verde ventilado, lo que implica una disminución de ganancia térmica del 24%.

Tabla 6. 4. Ganancias térmicas de los techos

Valor	Ganancia térmica del techo (kWh)	
	Techo tradicional	Techo verde ventilado
Máximo	560.56	440.22
Mínimo	292.31	222.50
Promedio	430.07	328.15
Total anual	5160.79	3937.82

Carga de enfriamiento de las viviendas con sistema de refrigeración

En la Tabla 6.5 se muestran las cargas de enfriamiento mensuales requeridas por la vivienda con techo tradicional y la vivienda con techo verde ventilado. Se observa que, de ambas viviendas la vivienda con techo tradicional presentó las mayores cargas de enfriamiento durante los 12 meses del año. En ambas viviendas la carga máxima de enfriamiento se registró el mes de abril, y fue de 601.3 kWh para la vivienda con techo tradicional y de 381.5 kWh para la vivienda con techo verde ventilado, lo cual implica una disminución de carga de enfriamiento del 36 %. La carga de enfriamiento mínima se presentó, en ambos casos, durante el mes de enero y fue de 236 kWh para la vivienda con techo tradicional y de 112.2 kWh para la vivienda con techo verde ventilado, representando una disminución de carga de enfriamiento del 52 %. La carga de enfriamiento anual de la vivienda con techo tradicional fue de 4590 kWh y la de la vivienda con techo verde ventilado fue de 2447.3 kWh, esto significa que el techo verde ventilado redujo en un 47 % la carga de enfriamiento de la vivienda simulada.

Tabla 6. 5. Carga de enfriamiento de las viviendas

Mes	Techo tradicional Carga de enfriamiento mensual (kWh)	Techo verde ventilado
Enero	235.95	112.15
Febrero	363.49	189.78
Marzo	339.40	184.83
Abril	601.30	381.46
Mayo	582.56	360.38
Junio	304.76	130.61
Julio	400.36	209.48
Agosto	341.43	161.50
Septiembre	289.53	124.08
Octubre	411.21	211.61
Noviembre	314.10	156.18
Diciembre	405.88	225.19
Consumo anual kWh	4589.99	2447.25

Capítulo 7

Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se estudió el comportamiento térmico de un Techo verde ventilado y sus beneficios potenciales al implementarse en una vivienda de referencia bajo las condiciones climáticas de la ciudad de Cuernavaca, Morelos, México (con clima cálido subhúmedo). De acuerdo a los resultados obtenidos, se concluye lo siguiente:

- La temperatura promedio anual de la vivienda se redujo de 26.3 °C a 25.3 °C al implementar el techo verde ventilado. El efecto de reducción de temperaturas, que generó el techo verde ventilado, solo se percibió en la planta alta de la edificación, en esta zona la temperatura promedio anual se redujo de 28.3 °C a 26.4 °C.
- Al implementar el techo verde ventilado, la vivienda registró todo el año temperaturas promedio mensuales dentro del intervalo de confort, mientras que, sin el techo verde ventilado, solo se tuvieron 6 meses con temperaturas de confort.
- La carga de enfriamiento anual se redujo de 4.59 MWh a 2.44 MWh al implementar el techo verde ventilado, lo cual implica una reducción del 47%.
- La ganancia térmica anual del techo se redujo de 5.16 MWh a 3.94 MWh al implementar el techo verde ventilado, esto significa una reducción del 24%.
- El techo verde ventilado mejora el desempeño térmico de las edificaciones al tener la capacidad de: 1) reducir la temperatura de los espacios interiores de la edificación, 2) reducir la ganancia térmica del techo, y 3) reducir la carga de enfriamiento de los espacios interiores de la edificación.

Recomendaciones

Se plantean las siguientes recomendaciones para realizar trabajos futuros relacionados al comportamiento térmico de los techos verde ventilados.

- Analizar el comportamiento del techo verde ventilado con diferentes alturas de canal de aire.
- Estudiar el comportamiento térmico del techo verde ventilado bajo otro tipo de condiciones climáticas.
- Realizar un estudio económico del techo verde ventilado y comparar el costo-beneficio con otros tipos de cubiertas y/o tecnologías de enfriamiento pasivo.
- Estudiar los beneficios ambientales que se generan al implementar el techo verde ventilado.
- Incluir nuevas plantas de estudio.
- Estudiar los requerimientos estructurales que se tendrían al implementar el techo verde ventilado a una escala real.
- Acoplar un modelo matemático de balance global a Energy Plus para simular el techo verde ventilado.

Bibliografía

Alpuche, M.; Ochoa, J.; y Marincic, I. (2010). Análisis térmico de viviendas económicas en México utilizando techos verdes. Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable.

Arregui Henk, L. J. (2016). El futuro de los techos verdes en la ciudad de Buenos Aires.

Ávila, A. (2019). Simulación de una vivienda con techo verde y su efecto en el confort Térmico. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica. Centro nacional de investigación y desarrollo tecnológico. Cuernavaca, Morelos.

Beltrán, A.; Vargas, M.; Pérez, A. y García, J. (2014). Confort térmico de techos verdes con *Cissus verticillata* (Vitaceae) en viviendas rurales tropicales. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas vol.5 Texcoco Sep./Nov.

Calixto-Aguirre, V. I., & Huelsz-Lesbros, G. (2018). Consumo de energía en edificios en México. Revista Legado de Arquitectura y Diseño, (24), 40-47.

Carreto, L. (2019). Simulación del comportamiento térmico de una cavidad con techo verde. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, Morelos.

Castilla, M., Álvarez, J. D., Berenguel, M., Pérez, M., Rodríguez, F., & Guzmán, J. L. (2010). Técnicas de control del confort en edificios. Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI, 7(3), 5-24.

Celaya Aguilar, A. M. (2020). Hoja de ruta para la transición energética en el sector residencial en México (Master's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Cengel, Y. A., (2007). Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico, México D.F., McGraw-Hill.

Chagolla, L. (2017). Estudio de la transferencia de calor de techos verdes en edificaciones de México. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Mecánica. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico. Cuernavaca, Morelos.

Chen, J.M., A. Govind, O. Sonnentag, Y. Zhang, A.G. Barr y B. Amiro. (2006). Leaf area index measurements at Fluxnet- Canada forest sites. Agricultural and Forest Meteorology 140(1-4):257-268.

Chen, J.M., P.M. Rich, S.T. Gower, J.M Norman y S. Plummer. (1997). Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. Journal of Geophysical Research 102(D24): 29429-29443.

Ciampi, M., Leccese, F., & Tuoni, G. (2005). Energy analysis of ventilated and microventilated roofs. Solar Energy, 79(2), 183-192.

- Cuadrat, J.M.; Vicente-Serrano, S.M. y Sanz, M.A. (2005). Los efectos de la climatización en la isla de Zaragoza (España): La isla de calor y sus factores condicionantes. Boletín de la A.G.E. N° 40-2005, págs. 322-327
- Díaz, G., Lencinas, J. D., & del Valle, H. (2014). Introducción a la fotografía hemisférica en ciencias forestales. *Madera y bosques*, 20(1), 109-117.
- Dimoudi, A.; Androutsopoulos, A. y Lykoudis, S. (2006) Summer performance of a ventilated roof component. *Energy and Buildings*, Vol. 38, págs. 610-617.
- Djedjig, R., Ouldboukhite, S. E., Belarbi, R., & Bozonnet, E. (2012). Development and validation of a coupled heat and mass transfer model for green roofs. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 39(6), 752-761.
- Domingo, F., Villagarcía, L. y Were, A. 2002. ¿Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración?: estado actual y evolución. *Ecosistemas* 2003/1. España.
- Flocks, J., Escobedo, F., Wade, J., Varela, S., & Wald, C. (2011). Environmental justice implications of urban tree cover in Miami-Dade County, Florida. *Environmental Justice*, 4(2), 125-134.
- Gagliano, A., Patania, F., Nocera, F., Ferlito, A., & Galesi, A. (2012). Thermal performance of ventilated roofs during summer period. *Energy and Buildings*, 49, 611-618.
- Gavilán Casal, A. (2015). Análisis comparativo de la eficiencia energética en edificios existentes con diferentes herramientas de simulación energética.
- Giobellina, B.; Maristany, A.; Angiolini, S.; Medina, S.; Pomazán, S.; Celiz, Y. y Márquez, F., (2012). Rendimiento térmico de cubiertas verdes sobre techo de chapa en la ciudad de Córdoba Argentina. Acta del I Encuentro Nacional sobre Ciudad, Arquitectura y Construcción Sustentable.
- Harish, V. S. K. V., & Kumar, A. (2016). A review on modeling and simulation of building energy systems. *Renewable and sustainable energy reviews*, 56, 1272-1292.
- Heard, C. (1993). Notes on the typical house description as used with SUNCODE.
- Honjo, T.; Narita, K-I.; Sugawara, H.; Mikami, T.; Kimura, K. & Kuwata, N. (2003). Observation of cool island effect in urban park (Shinjuku Gyoen). In: 15ª Conferencia Internacional de Clima Urbano, 1-5 Sept., Polonia, 2003.
- Hu, L., Z. Gong, J. Li y J., Zhu. (2009). Estimation of canopy gap size and gap shape using a hemispherical photograph. *Trees* 23(5):1101-1108.
- IEA, (2021). World Energy Outlook 2020. International Energy Agency, Paris.
- Imran, H. M., Kala, J., Ng, A. W. M., & Muthukumaran, S. (2018). Effectiveness of green and cool roofs in mitigating urban heat island effects during a heatwave event in the city of Melbourne in southeast Australia. *Journal of Cleaner Production*, 197, 393-405.
- Incropera, F. P., (1999). Fundamentos de transferencia de calor, 4ta ed., México D.F., Prentice Hall
- Kern, D. Q., (1999). Procesos de transferencia de calor, México D.F., McGraw Hill Book Company, Inc.

Larsen, F.; Correa, E.N. y Lesino, G. (2003). Isla de calor urbana: efecto de los pavimentos. Informe de avance 2003. Laboratorio de Ambiente Humano y Vivienda, INENCO. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 7, Nº 2. Argentina.

Larsen, S. F., Filippín, C., & Lesino, G. (2015). Modeling double skin green façades with traditional thermal simulation software. *Solar Energy*, 121, 56-67.

Lee, S.; Park, S.; Yeo, M. y Kim, K. (2009). An experimental study on airflow in the cavity of a ventilated roof. *Building and Environment*, Vol. 44, págs. 1431-1439.

Li, D.; Zheng, Y.; Liu, C.; Qi, H. y Liu, X. (2016). Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters. *Sustainable Cities and Society*, vol. 22, págs. 86-93.

Liberati, P., Spiga, M., & Zappavigna, P. (2009). Optimization of ventilated roofs for livestock housing. *International communications in heat and mass transfer*, 36(5), 432-437.

Lima, T., (2019). Estudio transitorio de un techo ventilado para condiciones climáticas de México. Tesis de Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica. Centro Nacional de Investigación y Desarrollo tecnológico.

Lima-Téllez, T., Chávez, Y., Hernández-López, I., Xamán, J., & Hernández-Pérez, I. (2022). Annual thermal evaluation of a ventilated roof under warm weather conditions of Mexico. *Energy*, 246, 123412.

Luyando, E. (2008). ¿Puede una ciudad modificar su clima? Conferencia de los Miércoles de Divulgación, organizada por el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM. *Atmósfera de la UNAM*. 06/09/2008. México.

Marasco, D. E., Culligan, P. J., & McGillis, W. R. (2015). Evaluation of common evapotranspiration models based on measurements from two extensive green roofs in New York City. *Ecological Engineering*, 84, 451-462.

Minke, G. (2004). *Techos verdes. Planificación, ejecución, consejos prácticos*. Montevideo, Uruguay: Fin de siglo.

Nicol F. (2004). Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. *Energy and Buildings*. 36, 628–637.

NOM-020-ENER-2011. Norma Oficial Mexicana. Eficiencia energética de edificaciones. Envolvente de edificios para uso habitacional.

Oberndorfer, E.; Lundholm, J.; Bass, B.; Coffman, R. R.; Hoshi, H. and Dunnett, N. (2007). Green roofs as urban ecosystems: ecological structures, functions, and services. *BioSci*. 57:10-14.

Oke, T. (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1982, Nº 108, p. 1-24.

Ordóñez, E. y Pérez, M. (2015). Green roofs and white roofs thermal performance comparison using IR techniques. *Acta universitaria* vol.25 no.5 México sep. /oct.

Ordóñez, E.; Zetina, C. y Pérez, M. (2012). Plant Survival and coverage in green roofs during the seasonal drought in Yucatan. *Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán*, Vol. 16, No.2.

Rich, P.M. (1990). Characterizing plant canopies with hemispherical photographs. *Remote Sensing Reviews* 5:13-27.

SENER. (2020). Balance nacional de energía 2019. México: Secretaría de planeación y transición energética

Smith, P. y Romero, H. (2016). Factores explicativos de la distribución espacial de la temperatura del aire de verano en Santiago de Chile. *Revista de Geografía norte Grande*, 63.45-62.

Šuklje, T., Hamdy, M., Arkar, C., Hensen, J. L., & Medved, S. (2019). An inverse modeling approach for the thermal response modeling of green façades. *Applied energy*, 235, 1447-1456.

Šuklje, T., Medved, S., & Arkar, C. (2016). On detailed thermal response modeling of vertical greenery systems as cooling measure for buildings and cities in summer conditions. *Energy*, 115, 1055-1068.

Tzuc, M.; Hernández, I.; Macias, M.; Bassam, A.; Xamán, J. y Cruz, B. (2019). Multi-gene genetic programming for predicting the heat gain of flat naturally ventilated roof using data from outdoor Environmental monitoring. Vol. 138, págs.106-117.

Wong, Nyuk Hien y YU, Chen. (2005). Study of green areas and urban heat island in a tropical city. *Habitat Internacional*, 2005, vol. 29, pp. 547-558.

Yang, J., Pyrgou, A., Chong, A., Santamouris, M., Kolokotsa, D., & Lee, S. E. (2018). Green and cool roofs' urban heat island mitigation potential in tropical climate. *Solar Energy*, 173, 597-609.

Zhang, T. y Yang, H. (2019). Heat transfer pattern judgment and thermal performance enhancement of insulation air layers in building envelopes. *Applied Energy*. 250, págs. 834-845

Zhao, M., Tabares-Velasco, P. C., Srebric, J., Komarneni, S., & Berghage, R. (2014). Effects of plant and substrate selection on thermal performance of green roofs during the summer. *Building and Environment*, 78, 199-211.

Zingre, K.; Wan, S.; Wong, S.; Toh, W. y Lee, I. (2015). Modelling of cool performance for double-skin roofs in tropical Climate, *Energy*, Vol. 82, págs. 813-826.

Zingre, K.; Wan, S.; Wong, S.; Toh, W. y Lee, I. (2015). Modelling of cool performance for double-skin roofs in tropical Climate, *Energy*, Vol. 82, págs. 813-826.