



Ciencia y Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.
Posgrado en CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE
CARACTERIZACIÓN Y ANÁLISIS EXPERIMENTAL
DE UN MATERIAL HIGROSCÓPICO INSPIRADO EN
LA ARQUITECTURA VERNÁCULA MAYA

Tesis que presenta

JENIFER ALEJANDRA TRIANO JUÁREZ

En opción al título de

DOCTOR EN CIENCIAS EN ENERGIA RENOVABLE

Mérida, Yucatán, México

2025

DECLARACIÓN DE PROPIEDAD

Declaro que la información contenida en las secciones de: Materiales y Métodos, Resultados y Discusión de este documento, proviene de las actividades de investigación realizadas durante el período que se me asignó para desarrollar mi trabajo de tesis, en las Unidades y Laboratorios del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y que, a razón de lo anterior, y en contraprestación de los servicios educativos o de apoyo que me fueron brindados, dicha información, en términos de la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, le pertenece patrimonialmente a dicho Centro de Investigación. Por otra parte, en virtud de lo ya manifestado, reconozco que de igual manera los productos intelectuales o desarrollos tecnológicos que deriven o pudieran derivar de lo correspondiente a dicha información, le pertenecen patrimonialmente al Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C., y se regirán, en todo caso, por lo dispuesto por la Ley Federal del Derecho de Autor y la Ley Federal de Protección a la Propiedad Industrial, en el tenor de lo expuesto en la presente Declaración.

Firma: _____



Jenifer Alejandra Triano Juárez

CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA DE YUCATÁN, A. C.
POSGRADO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE



RECONOCIMIENTO

Por medio de la presente, hago constar que el trabajo de tesis de Jenifer Alejandra Triano Juárez titulado **Caracterización y análisis experimental de un material higroscópico inspirado en la arquitectura vernácula maya**, fue realizado en la Unidad de Energía Renovable, en la línea de investigación en Conversión, Almacenamiento y Gestión de Energía, en el laboratorio de Sistemas Híbridos II del Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C. bajo la dirección del Dr. Luis David Patiño López perteneciente al Programa de Posgrado en Ciencias en Energía Renovable de este Centro y la codirección de la Dra. Norma Alejandra Rodríguez Muñoz del Centro de Investigación en Materiales Avanzados.

Atentamente



Dr. José Luis Hernández Stefanoni
Director de Docencia

Mérida, Yucatán, México, a 01 de septiembre de 2025

AGRADECIMIENTOS

A la Secretaría de Ciencias, Humanidades, Tecnología e Innovación por la beca otorgada para la realización de esta investigación (Número de becario 860376).

Al laboratorio Sistemas Híbridos II y al Cuarto de cultivo en la Unidad de Energía Renovable por el espacio para la medición de las propiedades higrotérmicas. Al Laboratorio-Taller en la Unidad de Materiales por permitir el uso de sus instalaciones para la realización de las pruebas de conductividad térmica, y al Taller de Instrumentación en el Departamento de Instrumentación por el uso de sus instalaciones y herramientas para la construcción del arreglo experimental. Al laboratorio de Geotecnia de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Yucatán (UADY) por el apoyo de la infraestructura e instrumentación y equipos para la realización de las pruebas de granulometría.

A mi comité tutorial, al Dr. Luis David Patiño López (CICY), a la Dra. Norma Alejandra Rodríguez Muñoz (CIMAV), al Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza (CICY), y al Dr. José Antonio Castillo Torres (IPN) por sus valiosos comentarios y sugerencias que han enriquecido el desarrollo de este proyecto de investigación.

A la Mtra. Karen Amely Hidalgo Escobedo por permitirnos esta colaboración que nació a partir del interés en la relevancia de su trabajo sobre la adaptación en la arquitectura moderna de los muros de *bajareque* característicos de la casa maya vernácula. Por ayudarnos con la elaboración de las muestras del material analizado en las diferentes etapas de este proyecto.

Al Dr. Carlos Emilio Vinajera (UADY) y a la Mtra. Marisela Chi (UADY) por su dirección técnica en la realización de las pruebas de granulometría. Al Dr. Fernando Hernández (CICY) por su apoyo en la caracterización del calor específico. A la Dra. Celene Espadas (CICY) por su apoyo técnico para el uso de sensores higrotérmicos. Al Mtro. Gabriel Pool (CICY) y al Mtro. Julio Lugo (CICY) por su apoyo para la construcción, calibración y montaje del sistema de adquisición de datos del arreglo experimental. Al Dr. Pedro Iván González por sus valiosos consejos. De igual forma agradezco a mis profesores, compañeros y todos a aquellos que me compartieron sus conocimientos y amablemente me ayudaron.

A mi familia, por el amor y la compañía. A mi hija, Aurorita, por ser inspiración y alegría cada día.

DEDICATORIA

A quién ha estado conmigo en todo momento apoyándome, acompañándome y dándome las fuerzas necesarias para ser perseverante. Sin ti nunca lo hubiese logrado. Esto es por ti y para ti Padre.

ÍNDICE

LISTADO DE SÍMBOLOS	iv
LISTADO DE TABLAS	viii
LISTADO DE FIGURAS	xi
RESUMEN	xix
ABSTRACT	xx
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES	7
1.1 Caracterización térmica e higroscópica de los materiales a base de tierra.	7
1.2 Estudio experimental del comportamiento térmico e higroscópico de los materiales a base de tierra.	14
OBJETIVO	15
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
CAPÍTULO 2 METODOLOGÍA	16
2.1 Descripción del material de estudio.	16
2.2 Etapa I: Caracterización de las propiedades del material a nivel laboratorio.	19
2.2.1 Obtención de la composición mineralógica y de la distribución granulométrica.	19
2.2.2 Medición de las propiedades termofísicas.	21
2.2.3 Medición de propiedades higroscópicas.	23
2.2.4 Medición del efecto del contenido de humedad sobre el comportamiento térmico.	27
2.3 Etapa II. Análisis de la transferencia de calor y humedad del material expuesto a las condiciones de aire exterior de un clima cálido sub-húmedo.	28
2.3.1 Definición y diseño del arreglo experimental.	28
2.3.2 Definición y construcción de la instrumentación para las celdas experimentales.	31
2.3.3 Construcción de las celdas experimentales.	39
2.3.4 Monitoreo del arreglo experimental.	45
2.3.5 Escenario de análisis sobre confort higrotérmico.	47
2.4 Etapa III. Análisis numérico de la transferencia de calor del material expuesto a las condiciones de aire exterior de un clima cálido sub-húmedo.	49
CAPÍTULO 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
3.1 Composición mineralógica y distribución granulométrica.	51

3.2 Propiedades termofísicas.	53
3.3 Propiedades higroscópicas.	61
3.4 Efecto del contenido de humedad sobre el comportamiento térmico.	73
3.5 Análisis de la transferencia de calor y humedad del material expuesto a las condiciones de aire exterior de un clima cálido sub-húmedo.	77
3.5.1 Periodo 1 del 29 de enero al 01 de febrero del 2024. Días con valores bajos de temperatura ambiente.	79
3.5.2 Periodo 2 del 24 al 27 de marzo del 2024. Días con valores altos de temperatura ambiente.	82
3.5.3 Comportamiento de la temperatura y humedad relativa en la celda con el muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i> .	86
3.5.4 Escenario de análisis sobre confort higrotérmico.	95
3.6 Análisis numérico de la transferencia de calor en las celdas experimentales.	97
3.7 Impacto del proyecto en el rescate de la práctica maya vernácula de construcción con tierra.	100
3.8 Temas complementarios de caracterización en su uso como material de construcción.	104
CONCLUSIONES.	107
BIBLIOGRAFÍA.	112
ANEXO A. HOJA DE DATOS DE LA PINTURA PERMEABLE AL VAPOR DE AGUA Y DE LA PINTURA IMPERMEABILIZANTE.	122
ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE EXPOSICIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO.	125
ANEXO C. TABLA DE PROPIEDADES DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.	127
ANEXO D. INSTRUMENTACIÓN DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES: SISTEMA DE ADQUISIÓN, REGISTRO Y ALMACENAMIENTO DE DATOS.	128
ANEXO E. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.	129
ANEXO F. ANÁLISIS DE ERROR DE MEDICIONES DE TEMPERATURA POR LA POSICIÓN DE LOS SENSORES EN EL EQUIPO GHP.	129
ANEXO G. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS TEMPERATURAS Y DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL MATERIAL EN ESTADO SECO Y CON DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD.	131
ANEXO H. CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA.	136

ANEXO I. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE INTERIOR DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES.		137
ANEXO J. DIFERENCIAL DE TEMPERATURA ENTRE EL PICO DE TEMPERATURA DEL AMBIENTE EXTERIOR Y EL PICO DE TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR.		143
ANEXO K. DESFASE TEMPORAL ENTRE EL PICO DE TEMPERATURA DEL AMBIENTE EXTERIOR Y EL PICO DE TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES.		145
ANEXO L. DIFERENCIAL DE TEMPERATURA ENTRE EL PICO DE TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EXTERIOR Y EL PICO DE TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE INTERIOR DEL MURO DE TIERRA Y DEL MURO DE BLOQUES DE CONCRETO.		147
ANEXO M. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN LAS SUPERFICIES INTERNAS DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES.		149
ANEXO N. COMPORTAMIENTO DE LA HR DENTRO DEL MURO A ESCALA REDUCIDA A BASE DE <i>PAK'LUUM</i> .		151
ANEXO O. COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIDOS Y SIMULADOS DE LA TEMPERATURA DE AMBIENTE INTERIOR DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES.		154
ANEXO P. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE AMBIENTE INTERIOR DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES (PERIODO SIMULADO).		159

LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolos	Descripción	Unidades
A	Área	m^2
Cp	Calor específico	$\text{J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$
d	Diámetro	m
dr	Ambiente de humedad relativa baja	-
D _w	Coeficiente de difusión líquido	$(\text{m}^2 \text{ s}^{-1})$
f	Fracción masa	Adimensional
FC	Factor de corrección	%
FD	Factor de decremento, $(\text{Ta}_{\text{máx}} - \text{Ta}_{\text{mín}}) / (\text{Ta}_{\text{máx}} - \text{Ta}_{\text{mín}})$	Adimensional
G	Cambio de masa	g
H	Altura	m
HR	Humedad relativa	%
HRa	Humedad relativa de ambiente exterior	%
HRai	Humedad relativa de ambiente interior	%
HRa _{máx}	Humedad relativa máxima en el ambiente exterior	%
HRa _{mín}	Humedad relativa mínima en el ambiente exterior	%
HRi _c	Humedad relativa en el ambiente interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto	%
HRi _t	Humedad relativa en el ambiente interior de la celda con el muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i> .	%
HRm _c	Humedad relativa dentro del muro de bloques huecos de concreto	%
HRm _t	Humedad relativa dentro del muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i> .	%
h _{lv}	Calor latente de vaporización	J kg^{-1}
HR	Humedad relativa	%, adimensional
I	Incertidumbre	%
I _{máx}	Irradiancia solar máxima	W m^{-2}
k	Constante de los modelos de isothermas de sorción	-
L	Espesor	m
m	Masa de muestra húmeda o en equilibrio con un determinado valor de humedad	kg
m _o	Masa de muestra seca	kg
n	Constante de los modelos de isothermas de sorción	Adimensional
P	Presión ambiente	Pa

P_s	Presión de vapor de saturación	Pa
P_0	Presión atmosférica estándar	Pa
Q	Flujo de calor	W
R	Recubrimiento permeable al vapor	-
R^2	Coeficiente de determinación	Adimensional
R_v	Constante de gas ideal para el agua	$J K^{-1} kg^{-1}$
S1, S2...S5	Sensores inmersos en el muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i>	-
S_c	Sensor centro	-
S_{cd}	Sensor central derecho	-
S_{si}	Sensor superior izquierdo	-
$S_{Int\ c}$	Temperatura en la superficie interna del muro de bloques huecos de concreto	$^{\circ}C$
$S_{Int\ t}$	Temperatura en la superficie interna del muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i>	$^{\circ}C$
t	Tiempo	s, h
tr	Desfase temporal entre el pico de temperatura de ambiente exterior y el pico de temperatura de ambiente interior	h
tr_{ai}	Desfase temporal entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura en el ambiente interior de la celda.	h
tr_m	Desfase temporal entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura dentro del muro	h
tr_{si}	Desfase temporal entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura en la superficie interna del muro.	h
T	Temperatura	$^{\circ}C$
T_a, T_{amb}	Temperatura de aire o ambiente exterior	$^{\circ}C$
$T_{a_m\acute{x}}$	Temperatura máxima de ambiente exterior	$^{\circ}C$
$T_{a_m\acute{n}}$	Temperatura mínima de ambiente exterior	$^{\circ}C$
T_{ai}	Temperatura de ambiente interior de las celdas experimentales	$^{\circ}C$
$T_{ai_m\acute{x}}$	Temperatura máxima de ambiente interior	$^{\circ}C$
$T_{ai_m\acute{n}}$	Temperatura mínima de ambiente interior	$^{\circ}C$
T_i	Temperatura de ambiente interior	$^{\circ}C$
T_{i_c}	Temperatura en el ambiente interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto	$^{\circ}C$

Ti _t	Temperatura en el ambiente interior de la celda con el muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i>	°C
T _m	Temperatura media	°C
T _{m_c}	Temperatura dentro del muro de bloques huecos de concreto	°C
T _{m_t}	Temperatura dentro del muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i>	°C
u	Contenido de humedad	kg kg ⁻¹ , %, kg m ⁻³
w _m	Contenido de agua monomolecular	kg kg ⁻¹
w _t	Ambiente de humedad relativa alta	Adimensional
WVT	Tasa de transmisión de vapor (Water Vapor Transmission).	g h ⁻¹ m ⁻²
x	Dirección x	-
Letras griegas		
δ _v	Permeabilidad al vapor de agua	kg m ⁻¹ s ⁻¹ Pa ⁻¹
δ*	Permeabilidad al vapor de agua aparente	m
λ	Conductividad térmica	W m ⁻¹ °C ⁻¹
μ	Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua	Adimensional
ρ	Densidad	kg m ⁻³
ρC _p	Capacidad calorífica volumétrica	kJ m ⁻³ °C ⁻¹
ξ	Capacidad de sorción	Adimensional
ΔHR _{ai}	Rango de humedad relativa en el ambiente interior de la celda	%
ΔHR _m	Rango de humedad relativa dentro del muro	%
Δt	Desfase temporal	h
ΔT	Diferencia de temperatura entre placa fría y caliente	°C
ΔT _{ai}	Diferencia entre la temperatura de ambiente interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto con respecto a la celda con el muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i>	°C
ΔT _{si}	Amplitud en la temperatura de la superficie interna	°C
ΔT _{a_e-i}	Diferencia de temperatura entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura en el ambiente interior de la celda	°C
ΔT _{si}	Diferencia de temperatura entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura en la superficie interna del muro	°C

Ω	Resistencia	ohm
----------	-------------	-----

Subíndices

0	Seco
a	Aire
c	Corregida
l	Agua
m	Muestra seca
p	Paja
r	Medida
t	Tierra
v	Vapor de agua

Siglas

BET	Modelo de Brunauer–Emmett–Teller
BTC	Bloque de tierra comprimida
DSC	Calorimetría diferencial de barrido (DSC, por sus siglas en inglés)
GAB	Modelo de Guggenheim, Anderson and de Boer
GHP	Placa caliente con guarda (por sus siglas en inglés <i>Guarded Hot Plate</i>)
MBV	Valor de amortiguamiento de humedad (por sus siglas en inglés <i>Moisture Buffering Value</i>)
PMV	Voto Medio Previsto o PMV (por sus siglas en inglés <i>Predicted Mean Vote</i>)
PPD	Índice de Porcentaje de Personas Insatisfechas o PPD (por sus siglas en inglés <i>Predicted Percentage of Dissatisfied</i>)

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1 Condiciones de secado de materiales de tierra.	8
Tabla 1.2 Caracterización de las propiedades térmicas e higroscópicas de los materiales de construcción de tierra.	13
Tabla 2.1 Caracterización de las propiedades del material de estudio.	19
Tabla 2.2 Soluciones salinas para obtener las humedades relativas de la prueba a $23 \pm 1^\circ\text{C}$.	25
Tabla 2.3 Modelos de ajuste de las isotermas de sorción.	26
Tabla 2.4 Calibración de los sensores de temperatura.	37
Tabla 2.5 Factores de corrección obtenidos de la calibración de los sensores de humedad.	38
Tabla 2.6 Especificaciones de los sensores de la estación meteorológica.	46
Tabla 2.7 Aislamiento térmico por la ropa para el caso de estudio.	48
Tabla 2.8 Temperatura y humedad relativa en un periodo de diciembre para el cálculo del PMV y PPD	48
Tabla 2.9 Temperatura y humedad relativa en un periodo de enero para el cálculo del PMV y PPD	48
Tabla 2.10 Propiedades termofísicas de los materiales de construcción de las celdas experimentales.	50
Tabla 3.1 Valores de la gravedad específica de las muestras de tierra.	53
Tabla 3.2 Valores de densidad aparente e incertidumbre del material sin y con acabado.	54
Tabla 3.3 Conductividad térmica de material sin acabado. Variables de cálculo, resultados y valores de incertidumbre.	55
Tabla 3.4 Conductividad térmica de material con capa de acabado. Variables de cálculo, resultados y valores de incertidumbre.	55
Tabla 3.5 Conductividad térmica obtenida y valores reportados en la literatura.	57

Tabla 3.6 Conductividad térmica del material con acabado a diferentes valores de temperatura media. Variables de cálculo, resultados y valores de incertidumbre.	58
Tabla 3.7 Calor específico en función de la temperatura para la tierra y paja.	60
Tabla 3.8 Calor específico obtenido y valores reportados en la literatura.	61
Tabla 3.9 Permeabilidad al vapor de agua. Prueba de ambiente seco.	62
Tabla 3.10 Permeabilidad al vapor de agua. Prueba de ambiente húmedo.	62
Tabla 3.11 Permeabilidad al vapor de agua obtenida y valores reportados en la literatura.	65
Tabla 3.12 Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ) obtenido y valores reportados en la literatura.	66
Tabla 3.13 Contenido de humedad de equilibrio a partir de la isoterma de adsorción higroscópica.	69
Tabla 3.14 Capacidad de sorción del material a partir de la isoterma de adsorción higroscópica	70
Tabla 3.15 Conductividad térmica del material a diferentes valores contenido de humedad (u) y de temperatura media (T_m). Variables de cálculo, resultados y valores de incertidumbre.	74
Tabla 3.16 Principales resultados obtenidos en los periodos analizados de las celdas experimentales.	85
Tabla 3.17 Principales resultados obtenidos de las celdas experimentales y resultados reportados en la literatura.	92
Tabla 3.18 Comparación entre la ΔT_{ai} calculada a partir de los resultados experimentales y simulados para los meses de febrero y mayo.	98
Tabla 3.19. Análisis de barrera para la mezcla <i>pak'luum</i> y la técnica de <i>bahareque</i> .	100
Tabla C.1. Valores de propiedades termofísicas y de transmisión de vapor de agua de algunos materiales de construcción.	127
Tabla F.1. Diferencias absolutas entre las mediciones de los sensores de cada placa.	129

Tabla J.1 Diferencial de temperatura en °C entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales.	142
Tabla K.1 Desfase temporal en horas entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales.	144
Tabla L.1 Diferencia de temperatura en °C entre el pico de temperatura de la superficie exterior y el pico de temperatura de la superficie interior del muro del material a base de <i>pak'luum</i> y del muro de bloques huecos de concreto.	146

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Vivienda maya vernácula con muros de bajareque [29,35]	2
Figura 2. Ejemplos de adaptación de la técnica de bajareque, de la mezcla de <i>pak'luum</i> o del <i>kankab</i> en la arquitectura moderna en la Península de Yucatán [42–44].	4
Figura 3. Ejemplos de adaptación de la técnica de bahareque, de la mezcla de <i>pak'luum</i> o del <i>kankab</i> en la arquitectura moderna en México a) paneles modulados de bajareque con entramado de bambú [25], b) módulos de bajareque para muros móviles [45], c) técnica pajareque [25], d) muros de concreto y módulos de bajareque [46], e) muros de concreto y bajareque en vivienda de dos pisos [47,48], f) acereque [47,48].	5
Figura 1.1 Moléculas de agua adsorbidas en diferentes tipos de minerales arcillosos y forma de porosidad [56].	9
Figura 1.2 Configuración experimental típica para la medición de las propiedades de sorción de vapor de agua [19].	10
Figura 1.3 Configuración experimental para determinar la permeabilidad al vapor de agua (Método del vaso) [54].	11
Figura 1.4 Configuración experimental modificada para el cálculo del MBV [3].	12
Figura 2.1 Muro híbrido propuesto: muro de carga (parte del muro pintada en color blanco) y muro no estructural con alero que lo protege (parte del muro pintada en color gris).	17
Figura 2.2 Material a base de tierra: a) tierra <i>kankab</i> , b) paja de trigo seca, c) mezcla húmeda de tierra-paja moldeada, d) muestra secada a condiciones ambientales, e) aspecto final de una muestra después de aplicar la capa de acabado.	18
Figura 2.3 Metodología para la caracterización y análisis higrotérmico del material.	18
Figura 2.4 Muestras de tierra <i>kankab</i> recolectadas en Yucatán y ubicación de las localidades correspondientes.	20
Figura 2.5 Muestras del material sin acabado: a) muestra #1, b) muestra #2 y c) muestra #3; muestras del material con acabado d) muestra #1, e) muestra #2 y f) muestra #3.	22
Figura 2.6. Prueba de permeabilidad al vapor de agua: a) Muestras del material de tierra, b) incorporación de un	24

recubrimiento permeable al vapor de agua, y c) arreglo experimental.

Figura 2.7 Muestras de material para la prueba de obtención de las isotermas de sorción.	26
Figura 2.8. Componentes del arreglo experimental: a) soporte metálico, b) guarda.	29
Figura 2.9 Componentes del arreglo experimental: a) marco estructural para los muros, b) muro del material a base de <i>pak'luum</i> , c) muro de bloques huecos de concreto.	30
Figura 2.10 Montaje de la guarda en el soporte metálico (a), y su acoplamiento al muro con su marco para el caso del material de tierra (b) y para el caso de referencia (c).	31
Figura 2.11 Distribución de los sensores de temperatura-HR dentro del muro del material a base de <i>pak'luum</i> .	32
Figura 2.12 Garita con sensor de temperatura y humedad relativa.	32
Figura 2.13 Sensor de temperatura: a) soldado al cable de datos, b) acoplamiento de funda protectora, y c) sellado con thermofit.	33
Figura 2.14 Sensor de temperatura y humedad relativa con funda metálica: a) cable de datos incluido sin blindaje, b) dimensiones y área de sensado, c) recubrimiento del cable con cinta de aluminio, y d) enrollado de cable estañado y recubrimiento con thermofit.	34
Figura 2.15 Sensor de temperatura y humedad relativa con funda de polietileno.	34
Figura 2.16 Tarjetas de adquisición de datos; a) tarjeta para la lectura de sensores analógicos y el convertidor analógico-digital, b) tarjeta para la lectura de sensores digitales y fuente de alimentación, c) vista lateral de ambas tarjetas ensambladas, y d) gabinetes para las tarjetas de adquisición de datos.	35
Figura 2.17 Tarjetas de almacenamiento de datos: a) componentes ensamblados, b) pantalla digital y teclado.	36
Figura 2.18 Relación resistencia vs temperatura obtenida de la calibración de los sensores de temperatura.	37
Figura 2.19 Curva de tolerancia de los sensores de humedad reportada por los fabricantes [85].	39
Figura 2.20 Soportes metálicos: a) estado inicial, y b) restaurado.	39

Figura 2.21 Construcción de las celdas experimentales: a) materiales para la estructura de la capa externa, b) estructura externa construida, c) guarda construida, d) celdas experimentales montadas en su soporte metálico, y e) marcos para la construcción de los muros.	40
Figura 2.22 Construcción del muro de material de tierra; a) vista lateral con la mezcla base, b) vista frontal con la mezcla base, c) vista posterior con la mezcla base, d) vista frontal con capa de acabado y bordes sellados, y e) colocación de la pintura (vista de la cara posterior).	42
Figura 2.23 Construcción del muro de referencia; a) colocación y pegado de los bloques huecos de concreto, b) colocación del revoco y termistor, y c) colocación de la pintura.	43
Figura 2.24 Instrumentación de las celdas experimentales; a) sensores de temperatura y humedad relativa en el ambiente interior, b) ubicación de los gabinetes para el sistema de adquisición de datos.	44
Figura 2.25 Montaje final del arreglo experimental.	44
Figura 2.26 Celdas experimentales: caras aisladas con superficies aluminizadas.	45
Figura 2.27 Estación meteorológica.	46
Figura 3.1 Difractograma de rayos-X de las muestras de tierra analizadas: k (caolinita), q (cuarzo), h (hematita), g (goetita) y a (anortita).	51
Figura 3.2 Curva de distribución granulométrica de las muestras de tierra recolectadas.	53
Figura 3.3. Valores de conductividad térmica y de incertidumbre de todas las pruebas de cada una de las muestras sin y con capa de acabado (-ac).	56
Figura 3.4 Valores de conductividad térmica y de incertidumbre del material con capa de acabado a diferentes valores de temperatura media.	58
Figura 3.5 Polinomio de ajuste para los valores promedio de la conductividad térmica en función de la temperatura media.	59
Figura 3.6 Análisis gráfico de la transmisión de vapor de agua. Prueba de ambiente seco.	62
Figura 3.7 Análisis gráfico de la transmisión de vapor de agua. Prueba de ambiente húmedo.	63

Figura 3.8 Material de tierra con agregado vegetal estudiado por a) Colinart et al. [17] y, b) en este trabajo.	64
Figura 3.9 Isotermas de sorción de la prueba 1 para todas las muestras del material de estudio (-R: muestras con recubrimiento permeable al vapor de agua).	67
Figura 3.10 Isotermas de sorción de la prueba 2 para todas las muestras del material de estudio (-R: muestras con recubrimiento permeable al vapor de agua).	68
Figura 3.11 Contenido de humedad de equilibrio de materiales a base de tierra.	71
Figura 3.12 Modelos de ajuste para la isoterma de adsorción higroscópica.	72
Figura 3.13 Modelo de ajuste para los valores promedio de la conductividad térmica en función del contenido de humedad (u) a una temperatura media de 24°C.	75
Figura 3.14 Valores de conductividad térmica a diferentes valores de contenido de humedad y de temperatura media y su correspondiente modelo de ajuste.	76
Figura 3.15 Comportamiento de las celdas experimentales del 29 de enero al 01 de febrero del 2024 (días con valores bajos de temperatura ambiente).	81
Figura 3.16 Comportamiento de las celdas experimentales del 24 al 27 de marzo del 2024 (días con valores altos de temperatura ambiente).	84
Figura 3.17 Comportamiento de temperatura y humedad relativa de las celdas experimentales bajo las condiciones de ambiente exterior de unas semanas de diciembre de 2023 y unas semanas de abril de 2024.	90
Figura 3.18 PMV y PPD calculado para un periodo de diciembre.	96
Figura 3.19 PMV y PPD calculado para un periodo de enero.	96
Figura 3.20 ΔT_{ai} de los valores medidos y ΔT_{ai} de los valores simulados de las celdas experimentales en el mes de febrero de 2024.	97
Figura 3.21 ΔT_{ai} de los valores medidos y ΔT_{ai} de los valores simulados de las celdas experimentales en el mes de mayo de 2024.	98
Figura 3.22 ΔT_{ai} calculado a partir de la simulación de las celdas experimentales para el periodo junio-noviembre de 2024.	99

Figura B.1. Valor promedio mensual de la variación de la temperatura ambiente.	124
Figura B.2. Valor promedio mensual de la variación de la humedad relativa.	124
Figura B.3. Valor promedio por día de la variación de la dirección del viento.	125
Figura B.4. Valor promedio de la variación de la dirección y velocidad del viento.	125
Figura D.1. Placa diseñada para la adquisición de datos de los sensores de temperatura RTD PT100: a) frente, b) reverso.	127
Figura D.2. Placa diseñada para la adquisición de datos de los sensores de humedad y temperatura SHT30: a) frente, b) reverso.	127
Figura D.3. Placa diseñada para el almacenamiento de datos de todos los sensores: a) frente, b) reverso	127
Figura G.1. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 1 sin capa de acabado (izquierda) y con capa de acabado (derecha).	131
Figura G.2. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 2 sin capa de acabado (izquierda) y con capa de acabado (derecha).	131
Figura G.3. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 3 sin capa de acabado (izquierda) y con capa de acabado (derecha).	132
Figura G.4. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 2 con capa de acabado a una temperatura media de 28.7°C (izquierda) y 30.5°C (derecha).	132
Figura G.5. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 2 con capa de acabado a una temperatura media de 32.5°C (izquierda) y 35.4°C (derecha).	133
Figura G.6. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 2 con capa de acabado a una temperatura media de 40°C (izquierda) y 43°C (derecha).	133

Figura G.7. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 3 con capa de acabado a una temperatura media de 24°C para un contenido de humedad de 4.4% (izquierda) y 6.1% (derecha).	134
Figura G.8. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 3 con capa de acabado a una temperatura media de 24°C para un contenido de humedad de 7.6% (izquierda) y 8.0% (derecha).	134
Figura I.1 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 10 al 23 de diciembre 2023.	136
Figura I.2 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 24 de diciembre al 6 de enero de 2024.	136
Figura I.3 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 7 al 20 de enero de 2024.	137
Figura I.4 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 21 de enero al 3 de febrero de 2024.	137
Figura I.5 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 4 al 17 de febrero de 2024.	138
Figura I.6 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 18 de febrero al 2 de marzo de 2024.	138
Figura I.7 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 3 al 16 de marzo de 2024.	139
Figura I.8 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 17 al 30 de marzo de 2024.	139
Figura I.9 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 31 de marzo al 13 de abril de 2024.	140
Figura I.10 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 14 al 27 de abril de 2024.	140

Figura I.11 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 28 de abril al 11 de mayo de 2024.	141
Figura I.12 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 12 al 25 de mayo de 2024.	142
Figura M.1 Comportamiento de la temperatura de la superficie interna del muro y de las caras aisladas de las celdas experimentales del 12 al 16 de diciembre de 2023.	148
Figura M.2 Comportamiento de la temperatura de la superficie interna del muro y de las caras aisladas de las celdas experimentales del 24 al 28 de marzo de 2024.	149
Figura M.3 Comportamiento de la temperatura de la superficie interna de la cara superior de las celdas experimentales del 24 al 28 de marzo de 2024.	149
Figura N.1 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de <i>pak'luum</i> en el mes de diciembre de 2023.	150
Figura N.2 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de <i>pak'luum</i> en el mes de enero de 2024.	150
Figura N.3 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de <i>pak'luum</i> en el mes febrero de 2024.	151
Figura N.4 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de <i>pak'luum</i> en el mes de marzo de 2024.	151
Figura N.5 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de <i>pak'luum</i> en el mes de abril de 2024.	152
Figura N.6 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de <i>pak'luum</i> en el mes de mayo de 2024.	152
Figura O.1 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de enero de 2024: valores medidos y valores simulados.	153
Figura O.2 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de febrero de 2024: valores medidos y valores simulados.	154

Figura O.3 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de marzo de 2024: valores medidos y valores simulados.	155
Figura O.4 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de abril de 2024: valores medidos y valores simulados.	156
Figura O.5 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de mayo de 2024: valores medidos y valores simulados.	157
Figura P.1 Temperatura de ambiente interior de la celda experimental con muro de bloques huecos de concreto (T_{i_c}) y de la celda experimental con muro del material a base de <i>pak'luum</i> (T_{i_t}) en el mes de junio (arriba) y en el mes de julio de 2024 (abajo).	158
Figura P.2 Temperatura de ambiente interior de la celda experimental con muro de bloques huecos de concreto (T_{i_c}) y de la celda experimental con muro del material a base de <i>pak'luum</i> (T_{i_t}) en el mes de agosto (arriba) y en el mes de septiembre de 2024 (abajo).	159
Figura P.3 Temperatura de ambiente interior de la celda experimental con muro de bloques huecos de concreto (T_{i_c}) y de la celda experimental con muro del material a base de <i>pak'luum</i> (T_{i_t}) en el mes de octubre (arriba) y en el mes de noviembre de 2024 (abajo).	160

RESUMEN

A la casa vernácula maya con muros de tierra, edificada en regiones de climas cálidos y húmedos de Mesoamérica, se le atribuyen condiciones de confort. Sin embargo, a pesar del incremento de las olas de calor y las sequías provocadas por el cambio climático, este tipo de construcción sostenible está en declive. La importancia de la preservación de esta práctica y su adaptación a la construcción moderna se fundamenta en su valor cultural y en las evidencias que pueden demostrar que la construcción con tierra es una alternativa sostenible, saludable y asequible, con un potencial relevante en la regulación de la temperatura y la humedad en las edificaciones.

Este trabajo aborda los primeros pasos hacia un uso moderno y sostenible de un material de tierra crudo inspirado en la mezcla de tierra y fibra (*pak'luum*) utilizada para construir los muros de la casa vernácula maya. Esto es, su caracterización, la cual abarcó la obtención de la granulometría y composición mineralógica, la medición de las propiedades térmicas e higroscópicas, y el estudio del efecto de la temperatura y contenido de humedad sobre las propiedades térmicas. Asimismo se analizó la evolución de la temperatura y humedad del material durante su exposición a las condiciones ambientales reales de un clima cálido sub-húmedo.

La tierra, conocida regionalmente como *kankab*, mostró un contenido de 4-15% de arcilla y como principal mineral arcilloso a la caolinita. En condiciones de humedad relativa alta, el material absorbió hasta un 8.1 % de su masa seca. La conductividad térmica presentó un rango de 0.186-0.314 W m⁻¹C⁻¹ entre su estado seco y su contenido de humedad máximo y, entre 24 y 36°C. Un muro a escala reducida construido con el material a base de *pak'luum* causó una reducción de hasta 2.4°C y 15% de humedad relativa en el interior de una celda experimental, y un tiempo de retraso de hasta 1.3 h mayor en la presencia de los picos de temperatura. Estos resultados en comparación con el efecto causado por un muro a escala reducida de bloques huecos de concreto.

Los hallazgos indican que el material a base de *pak'luum* exhibe excelentes propiedades térmicas y capacidad de regulación de humedad, desafiando prejuicios arraigados que persisten debido a la falta de datos científicos.

ABSTRACT

The traditional Mayan house with earthen walls, built in regions with warm and humid climates in Mesoamerica, is attributed with comfortable conditions. However, despite the increase in heat waves and droughts caused by climate change, this type of sustainable construction is in decline. The importance of preserving this practice and adapting it to modern construction is based on its cultural value and on evidence demonstrating that earthen construction is a sustainable, healthy, and affordable alternative, with significant potential for regulating temperature and humidity in buildings.

This work explores the initial steps toward a modern and sustainable use of a raw-earthen material inspired by the mixture of earth and fiber (*pak'luum*) used to build the walls of the Mayan vernacular house. That is, its characterization, which included obtaining its granulometry and mineralogical composition, measuring its thermal and hygroscopic properties, and studying the effect of temperature and moisture content on its thermal properties. The evolution of the material's temperature and humidity during exposure to the real-world environmental conditions of a warm, sub-humid climate was also analyzed.

The soil, known regionally as *kankab*, contained 4–15% clay, with kaolinite as the primary clay mineral. Under high relative humidity conditions, the material absorbed up to 8.1% of its dry mass. Thermal conductivity ranged from 0.186–0.314 W m⁻¹°C⁻¹ between its dry state and its maximum moisture content, and between 24 and 36°C. A wall constructed with the *pak'luum*-based material caused a reduction of up to 2.4°C and 15% relative humidity inside an experimental cell, and a delay time of up to 1.3 h longer in the presence of temperature peaks; analysis resulting from the comparison with the effect caused by a reduced-scale wall of hollow concrete blocks.

The findings indicate that the *pak'luum*-based material exhibits excellent thermal properties and moisture regulation capacity, challenging long-standing prejudices that persist due to a lack of scientific data.

INTRODUCCIÓN

En el confort térmico que es la sensación de comodidad o bienestar percibida por la mayoría de las personas de un lugar específico, influyen un conjunto de condiciones de temperatura, humedad relativa, velocidad del aire y radiación. De modo que, el concepto de *confort térmico* expresado más robustamente debe acompañarse del término *higrotérmico* [1]. La humedad no solo influye en el confort y en el consumo de energía destinada en alcanzarlo, sino también en la salud de los habitantes y en el deterioro de los materiales que conforman la envolvente del edificio [2,3]. Es importante entonces que los materiales o sistemas constructivos incluyan medidas no solo para regular la temperatura sino también para controlar la humedad. Una alternativa pasiva, es decir, que contribuye a crear condiciones de confort adaptándose a las condiciones del ambiente local sin el consumo de energía externa para su funcionamiento, que ha demostrado potencial para regular la temperatura y la humedad es la construcción con tierra. Su estructura porosa le confiere esta doble acción o capacidad higrotérmica (higroscópica + térmica) y, por otra parte, su origen natural la posicionan como una opción sustentable, que promueve la economía circular, de baja emisión de CO₂ y libre de componentes tóxicos [4–6]. Este conjunto de características ha hecho recobrar el interés en su aplicación, la cual había disminuido por problemas de durabilidad, resistencia mecánica, estética y la entrada de materiales prefabricados como son los bloques de concreto. Un número creciente de investigaciones se han enfocado en mejorar estos aspectos modificando y ampliando las técnicas de construcción con tierra [5,7], incorporando otros materiales como agregados minerales u orgánicos [8,9], agentes estabilizadores [10,11], recubrimientos externos [12], revocos o acabados de arcilla (para reducir su erosión) [13,14]. Todos estos cambios aunados a las particularidades de la tierra (en referencia a la proporción de sus componentes, tamaño y distribución de los granos) han dado lugar, a su vez, a un amplio rango en los valores de sus propiedades térmicas e higroscópicas [15,16]. En el comportamiento higrotérmico que un material en específico puede ofrecer, también influyen las características del diseño como son los espesores, la orientación, los materiales adyacentes y las condiciones climáticas de exposición [17–20]. Por lo tanto, para conocer el mecanismo de acción ante la transferencia de calor y humedad de un material a base de tierra, lo más recomendable es medir sus propiedades bajo las condiciones de interés. Esta caracterización en conjunto con el análisis acoplado del transporte de calor y humedad, ya sea mediante monitoreo experimental a condiciones de aire exterior o controladas, o bien, mediante estudios teóricos, permiten conocer y predecir el comportamiento higrotérmico del material.

Por otra parte, la tierra es uno de los materiales de construcción más primitivos, guarda un profundo significado simbólico y cultural como uno de los materiales principales utilizados en las construcciones vernáculas de muchas culturas [5,21,22]. La arquitectura de tierra es resultado de un cúmulo de conocimientos adquiridos a través de la experiencia durante la búsqueda de los materiales, diseños y técnicas constructivas más adecuados en términos estructurales y de habitabilidad [21]. Tal es el caso de la casa maya de tierra (Figura 1), cuya evidencia más antigua es de hace 3000 años y cuyo uso persiste hasta nuestros días. La casa maya vernácula ha sido descrita como una estructura perfecta y compleja resultante de un desarrollo lento y gradual a lo largo de siglos [23]. La tierra es uno de los materiales principales utilizados para la construcción de sus muros empleando la técnica de *bajareque* o *bahareque* [24]. Esta técnica conocida también como quinchá, tacuara, o fajina [25], consiste en un armazón de madera relleno con una mezcla húmeda compuesta de tierra y un agregado vegetal. En la Península de Yucatán, la mezcla de relleno conocida tradicionalmente como *pak'-kancab* o *pak'luum*, se trata de tierra *kancab* (vocablo maya que hace referencia a tierra roja amarillenta) mezclada con zacate o paja [26]. Aunque en esta región, las condiciones climáticas presentan valores altos de temperatura y humedad relativa [27], los testimonios de los habitantes de la casa maya de tierra coinciden en que el ambiente interior es agradable durante todo el día [28,29]. Si bien esta cualidad puede atribuirse a otros factores como el diseño de la casa y del techo se considera que la mezcla *pak'luum* utilizada en los muros influye en las condiciones de habitabilidad que se le atribuyen. Esta consideración se basa en los resultados positivos sobre el confort y el amortiguamiento térmico que se han obtenido a partir del análisis de la técnica de *bajareque* [30,31], incluso cuando su comportamiento térmico ha sido comparado contra el de otros sistemas constructivos como el ladrillo recocido o los bloques de concreto [32–34].



Figura 1. Vivienda maya vernácula con muros de *bajareque* [29,35].

Hoy en día, la casa maya de tierra se limita al campo y está ausente del paisaje urbano. Incluso las casas maya rurales están siendo reemplazadas por casas de concreto. Diversos factores podrían influir a su declive: el desconocimiento de sus cualidades; motivos prácticos y económicos como la creciente preferencia por materiales más duraderos, de menor mantenimiento y que reduzcan los tiempos de construcción; la falta de regulación del impacto ambiental de los sistemas constructivos, la falta de apoyo de los programas gubernamentales de vivienda social a las prácticas vernáculas y a la construcción sustentable. Los prejuicios y el estigma, como asociar las casa maya de tierra con la pobreza, el rezago social y considerar obsoleto el conocimiento antiguo, también contribuyen a su abandono [36]. En el capítulo 3 se desarrolla un análisis más profundo de dichas barreras. El abandono de esta práctica de construcción se está desarrollando a medida que el cambio climático se intensifica en la Península de Yucatán, cuyos registros históricos siempre han mostrado valores altos de temperatura y de humedad relativa, dando lugar a olas de calor y sequías sin precedentes [37,38]. Se prevé que estas condiciones se agraven incluso en los escenarios más optimistas [39]. Además, la red energética de la Península de Yucatán no está descarbonizada y sufre la presión del creciente uso de sistemas de aire acondicionado [40]. En estas circunstancias tan extremas, la construcción sostenible, baja en carbono y de bajo consumo energético, con propiedades de aislamiento térmico e higroscópicas, es una estrategia esencial [41].

En la Península de Yucatán, la evidencia con que se cuenta sobre la adaptación de la técnica de *bajareque*, de la mezcla de *pak'luum* o del *kankab* en la arquitectura moderna es su uso en acabados de muros [42,43] como se muestra en la Figura 2.a y Figura 2.b. Así como también su uso en muros híbridos donde la técnica de *bajareque* utiliza rejillas de madera reforzada y capas de acabado con fines estéticos y de durabilidad en combinación con estructuras de concreto [44], como se observa en la Figura 2.c y Figura 2.d. Sin embargo, ninguna de estas dos implementaciones reporta mediciones de confort higrotérmico ni caracterizaciones de las propiedades del *kankab* o de la mezcla *pak'luum*.

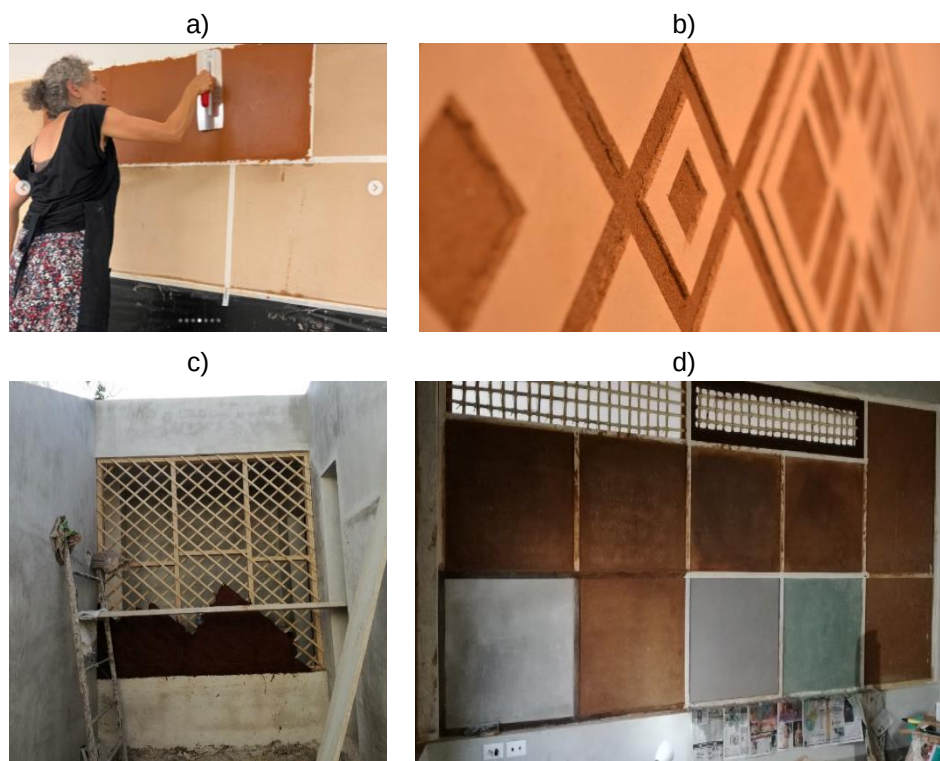


Figura 2. Ejemplos de adaptación de la técnica de *bajareque*, de la mezcla de *pak'luum* o del *kankab* en la arquitectura moderna en la Península de Yucatán [42–44].

La adaptación de la técnica de *bajareque* en la arquitectura moderna se ha desarrollado también en otras regiones de México. Dentro de la evidencia se encuentran los muros de *bajareque* contruidos a base de paneles modulados fabricados con una estructura reticular de bambú (Figura 3.a, lado izquierdo), lo cuales son rellenos con una mezcla de tierra arcillosa, paja, estiércol y baba de nopal. En la Figura 3.a (lado derecho) se muestra una edificación con estos muros [25]. Otras de las propuestas es el diseño de un módulo de *bajareque* para uso en muros divisorios removibles [45] que consiste en una estructura de madera de pino con un entramado de carrizo pintado con aceite el cual es relleno con una mezcla de tierra y paja seca (Figura 3.b, lado izquierdo), y se aplica una capa de aplanado compuesta de tierra y cabello (Figura 3.b, lado derecho). También se encuentra la técnica constructiva nombrada pajareque [25] la cual fue diseñada con la intención de emplear la técnica de *bajareque* de una forma más simple y de fácil ejecución. La técnica consiste en un entramado solo en sentido vertical (ver Figura 3.c, lado izquierdo) que se teje con fibras vegetales y son bañadas de una mezcla de tierra arcillosa y agua. En la Figura 3.c (lado derecho) se puede observar un muro construido con esta técnica. La adaptación en construcciones convencionales se ha realizado mediante la aplicación de los muros de *bajareque* en estructuras de concreto, como se describe en [46], y donde se observan los muros modulares de *bajareque* (Figura 3.d). En [47,48] también se presenta la construcción

de casas de *bajareque* de dos niveles con estructuras de concreto (ver Figura 3.e). En la iniciativa del sistema constructivo *acereque*, los muros de *bajareque* son combinados también con estructuras de acero como se observa en la Figura 3.f [47,48]. Sin embargo, en ninguna de estas referencias se muestra información sobre el comportamiento térmico e higroscópico de dichos sistemas constructivos a base de *bajareque*.

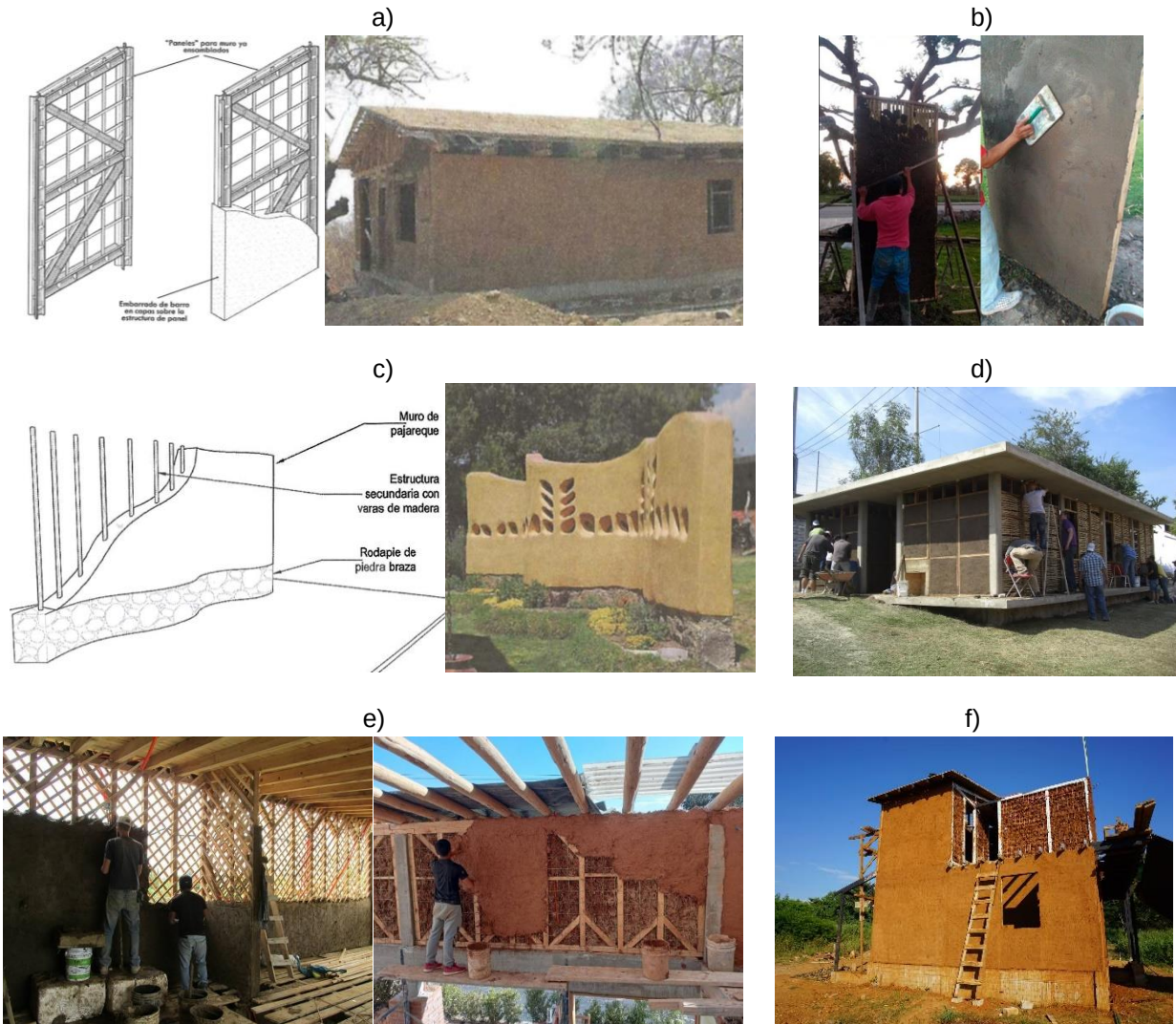


Figura 3. Ejemplos de adaptación de la técnica de bahareque, de la mezcla de *pak'luum* o del *kankab* en la arquitectura moderna en México a) paneles modulados de *bajareque* con entramado de bambú [25], b) módulos de *bajareque* para muros móviles [45], c) técnica pajareque [25], d) muros de concreto y módulos de *bajareque* [46], e) muros de concreto y *bajareque* en vivienda de dos pisos [47,48], f) *acereque* [47,48].

Con base por una parte, en las cualidades de confort atribuidas popularmente a la casa maya de tierra y, por otra parte, en el potencial de amortiguamiento térmico que puede ofrecer la técnica de *bajareque*, así como en las características higrotérmicas y de sostenibilidad asociadas a la

construcción con tierra, nace el interés de esta investigación. La cual se enfoca en caracterizar a un material de relleno de uso en muros híbridos, el cual fue propuesto por Hidalgo-Escobedo [43] y cuyos antecedentes de diseño y adaptación se encuentran en [44]. El material está inspirado en la mezcla de tierra *pak'luum*, de la cual no se cuentan con evidencias que confirmen y cuantifiquen sus cualidades térmicas e higroscópicas.

Además de contribuir en el rescate del patrimonio cultural, este trabajo pretende ser un punto de partida en la búsqueda de un material de construcción en la Península de Yucatán que, en comparación con los materiales predominantes (concreto, bloque hueco de concreto y ladrillo recocido), minimice el impacto ambiental en varios frentes: reduciendo la huella de carbono e hídrica, promoviendo una economía circular mediante el uso de componentes naturales y disponibles localmente; que su reutilización, reciclaje o eliminación tenga un mínimo impacto ambiental; y que ofrezca eficiencia energética para que la carga energética destinada al confort higrotérmico del edificio sea menor.

La utilidad de obtener las propiedades y analizar el comportamiento higrotérmico del material es múltiple: 1) identificación del potencial del material para la transferencia y almacenamiento de calor y humedad bajo las condiciones de interés; 2) permitir comparar las propiedades del material con las propiedades de otros materiales a base de tierra y materiales convencionales; y 3) utilización de los resultados como datos de entrada en futuros estudios teóricos para el análisis de transferencia acoplada de calor y humedad. Considerando que el conocimiento de sus propiedades y de su comportamiento es la base para trabajar en la mejora de sus cualidades, este trabajo aborda los primeros pasos hacia un uso moderno y sostenible. De esta manera, el presente documento está organizado de la siguiente forma: en el capítulo 1 “Antecedentes”, se discuten trabajos que comparten los objetivos de caracterización térmica e higroscópica y/o cuyo material de estudio es a base de tierra. En el capítulo 2, “Metodología” se describen los métodos, estándares y arreglos experimentales mediante los cuales fue caracterizado y analizado el material de estudio. En el capítulo 3, “Resultados” se discuten los principales datos obtenidos y comportamientos observados, así como la importancia de los hallazgos en favor del rescate de la práctica maya vernácula de construcción con tierra. Además se plantea la conveniencia de un paso próximo enfocado en estimar la contribución del material en el confort higrotérmico y en el ahorro energético, así como propuestas de investigación dirigidas al mejoramiento de las cualidades y beneficios del material. Finalmente se presentan las conclusiones generales del proyecto.

CAPÍTULO 1

ANTECEDENTES

1.1 Caracterización térmica e higroscópica de los materiales a base de tierra.

Como se mencionó en la introducción, los materiales a base de tierra además del potencial que pueden ofrecer para regular la temperatura también han demostrado cualidades higroscópicas. Es decir, que pueden ser capaces de amortiguar o regular la humedad en un ambiente interior almacenando y liberando vapor de agua según la saturación de humedad en dicho ambiente. Por lo que, la literatura abordada sobre la caracterización de los materiales a base de tierra se enfoca en el comportamiento térmico e higroscópico, que son el interés de estudio en este proyecto.

Si bien las características térmicas e higroscópicas de los materiales a base de tierra han sido medidas en diversos trabajos, el uso de estos valores para estudio o comparación directa entre un material y otro no es completamente adecuado debido a las diferencias en cuanto a sus agregados (cuáles, que proporción), su estado (seco o nivel de contenido de humedad), las condiciones de prueba (temperatura y humedad relativa), el método o estándar de medición utilizado y las condiciones de preparación de las muestras. Además, la tierra en sí misma tiene características particulares: tamaño, forma y distribución de los granos, proporción de sus componentes y minerales presentes, especialmente los minerales arcillosos debido a su gran afinidad por las moléculas de agua. Por lo que, para una caracterización más confiable de un material de tierra en particular, especialmente si es un material compuesto, es recomendable medir sus propiedades bajo las condiciones de interés. Otra de las ventajas de medir las propiedades del material de interés, es poder utilizar estos valores como datos de entrada en caso de realizar un estudio numérico, lo cual podría mejorar la representatividad del caso a simular con respecto al modelo físico real. A pesar de que la construcción con tierra es una técnica de construcción antigua y extendida, su caracterización es escasa [19], por lo que la medición de sus propiedades contribuye a robustecer las bases de datos de los materiales a base tierra.

Generalmente, las propiedades termofísicas que se obtienen son: densidad (en estado seco), conductividad térmica del material en estado seco o en función de su contenido de humedad y temperatura así como el calor específico. El secado de la muestra es un paso importante para la obtención de las propiedades en estado seco. El rango de temperatura de secado recomendado para los materiales de tierra es de 40-110°C; el valor seleccionado no debe alterar la composición del material [17]. En la Tabla 1.1 se muestran las condiciones de secado que se han utilizado para algunos materiales a base de tierra.

La densidad de este tipo de materiales se determina a partir de muestras secas con forma volumétrica definida utilizando una balanza y calibrador vernier [12]. La conductividad térmica ha sido medida mayormente con el método de placa caliente con guarda, el método de la fuente de calor plana transitoria (disco caliente) y el método del hilo caliente [49–52]. El primero de ellos se ha utilizado para obtener la conductividad térmica en estado estacionario del material seco y los últimos dos para mediciones transitorias del material con diferentes contenidos de humedad. De modo que el efecto del contenido de humedad sobre la conductividad térmica también es analizado; en algunos casos para utilizar estos resultados como datos de entrada en los estudios numéricos con la intención de que el caso a simular sea más representativo del modelo de estudio y, según sea el caso, contribuya a lograr un mejor ajuste con los resultados experimentales [12,18,51,53]. En estudios sobre materiales de tierra compuestos donde se analiza el efecto de la proporción de los agregados, se obtiene también la conductividad térmica en función de la densidad [54]. El calor específico o capacidad calorífica de los materiales de tierra ha sido obtenido principalmente mediante el método termo-analítico de calorimetría diferencial de barrido (DSC) [12,17], el calorímetro tipo Calvet [51] o calculado a partir de la difusividad térmica [18]. Generalmente su valor se toma como una constante cuando el rango de variación de temperatura de medición no es excesivamente grande [12].

Tabla 1.1 Condiciones de secado de materiales de tierra.

Material	Temperatura y HR de secado	Estándar	Referencia
Arcilla + cáñamo	70°C, HR <10%	ISO 12570	[17]
Arcilla + paja	55 °C, HR de 5, 7 y 9%	ISO 12570	[54]
Bloques de tierra comprimida	105°C	-	[12]
Tierra apisonada	105°C	-	[55]
Ladrillo de tierra no cocido	105°C	-	[18]

Para el comportamiento higroscópico es analizada generalmente la capacidad de almacenamiento y la capacidad de transmisión de humedad mediante la determinación de las isothermas de sorción y la permeabilidad al vapor de agua. Es muy importante resaltar que, la capacidad de almacenamiento de humedad dentro del dominio higroscópico no indica la saturación total con agua líquida en el material. Como se podrá observar en los párrafos siguientes así como en el Capítulo 2, en la medición de ambas propiedades higroscópicas el material no entra en contacto directo con el agua líquida sino solamente se expone en un ambiente a diferentes niveles de humedad relativa. Por lo que el comportamiento higroscópico abarca principalmente una primera etapa que consiste en un proceso de adsorción de moléculas de agua sobre la superficie de las partículas de arcilla; y una segunda etapa de llenado de los

microporos y mesoporos, en estos últimos mediante condensación capilar (Figura 1.1) [56]. No obstante, se considera que el transporte de la humedad puede no estar limitado solamente a estos mecanismos de adsorción y condensación capilar. Sin embargo, un análisis detallado sobre los mecanismos participantes y el grado de influencia de cada uno de ellos están fuera del alcance de este trabajo. Con base a lo anterior, en este documento, se utilizará el término de adsorción de humedad o adsorción higroscópica para hacer referencia al proceso de ganancia de humedad en el análisis del comportamiento higroscópico.

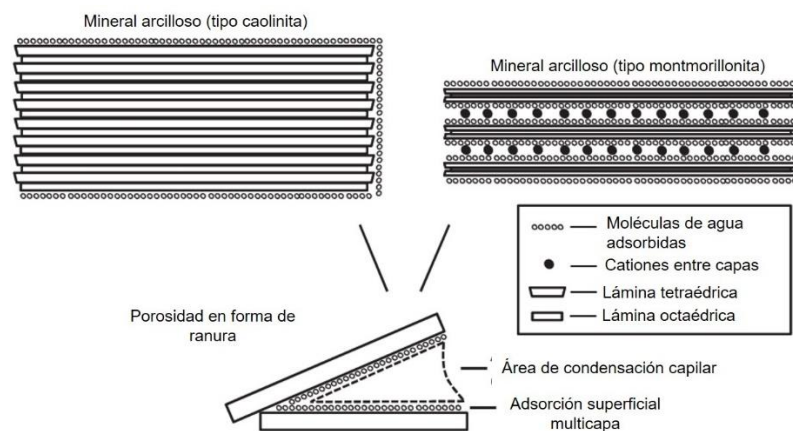


Figura 1.1 Moléculas de agua adsorbidas en diferentes tipos de minerales arcillosos y forma de porosidad [56].

Las isothermas de sorción han sido obtenidas mayormente por métodos gravimétricos cuyo procedimiento es descrito en el estándar ISO 12571:2013 “Comportamiento higrotérmico de materiales y productos de construcción - Determinación de las propiedades de sorción higroscópica” o en el ASTM 1498-04^a “Método de prueba estándar para las isothermas de sorción higroscópica de materiales de construcción”. Ambos procedimientos permiten determinar el contenido de humedad (u) de una muestra en equilibrio con un ambiente a una temperatura y humedad específicas comparando la masa de la muestra húmeda (m) con la masa de la muestra seca (m_0) mediante la siguiente ecuación $u = (m - m_0) / m_0$ (resultado en base seca). Nótese que la determinación correcta de los isothermas depende en gran parte de la medición de la masa de la muestra en estado seco [54]. El arreglo de medición consiste en probetas (recipientes herméticos), soluciones salinas saturadas (establecen los niveles de humedad relativa) y una balanza; o bien, en el uso de una cámara climática como se muestra en la Figura 1.2. Las isothermas de sorción corresponden a la curva obtenida durante la adsorción de humedad en una serie de valores de humedad relativa crecientes y, a la curva obtenida durante la liberación de humedad en una serie de valores de humedad relativa decreciente; ambos procesos a una temperatura constante. Las mediciones se realizan generalmente a una temperatura de 23°C o

25°C, y en un rango de humedad relativa de 30-98%. Es recomendable tomar las mediciones bajo valores de humedad representativos de las condiciones reales de aplicación del material, por ejemplo, dentro del rango delimitado por los valores mínimos y máximos de humedad relativa del ambiente climático de interés [57]. Las curvas de sorción son ajustadas con modelos teóricos como el de BET [12], el de GAB [58], el de Henderson [59], el Modificado de Chung-Pfost [60,61], el de Halsey [62], y el de Oswin [63]. El modelo de GAB es uno de los modelos más ampliamente usado y recomendado para materiales bio-compuestos (con agregados orgánicos) esto debido a la buena aproximación que muestra [64]. Por ejemplo, las isotermas de sorción de un material compuesto de arcilla y paja fueron mejor representadas con el modelo GAB en [54]. No obstante, en el trabajo de [12] sobre un material de tierra apisonada, el modelo BET mostró el mejor ajuste para la prueba de adsorción de humedad comparado con el modelo de GAB. Por lo que, es sugerido que el criterio de selección sobre qué modelo usar se base en la evaluación del ajuste que cada uno ofrece.

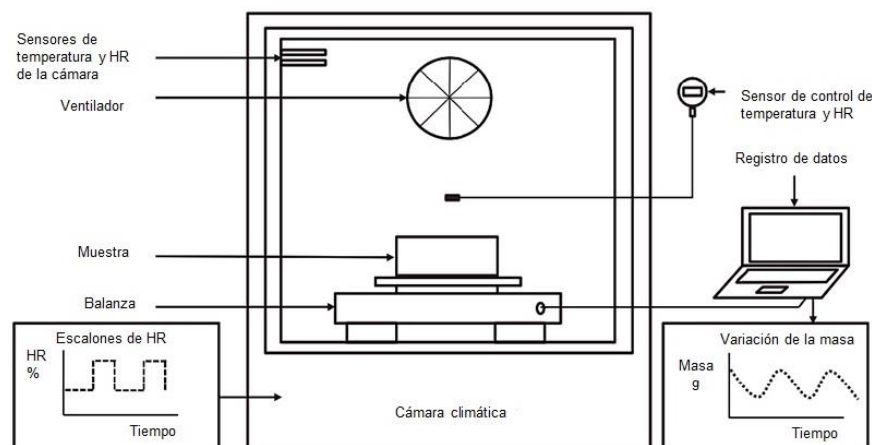


Figura 1.2 Configuración experimental típica para la medición de las propiedades de sorción de vapor de agua [19].

La permeabilidad al vapor de agua puede determinarse mediante el estándar ISO 12572:2016 “Prestaciones higrotérmicas de los productos y materiales para edificación. Determinación de las propiedades de transmisión de vapor de agua. Método del vaso”. También puede obtenerse con el ASTM E96/E96M-16 “Método de prueba estándar para la transmisión de vapor de agua de materiales”. El principio de medición es aplicable a todos los materiales y productos de construcción higroscópicos y no higroscópicos, incluidos los materiales de aislamiento y los que tienen revestimientos. Ambos procedimientos consisten en establecer un diferencial de humedad relativa (un gradiente de concentración que actúe como potencial impulsor para la transmisión de vapor) entre dos superficies del material para determinar la resistencia del material a la difusión de vapor de agua. Cuando los dos ambientes que establecen el diferencial de humedad relativa

están entre $0\% < HR < 50\%$ se le conoce como condición de vaso seco o desecante. Si los ambientes de prueba se encuentran entre $50\% < HR < 100\%$, se hace referencia a condiciones de vaso húmedo o método de agua. Ambos procedimientos se realizan a temperatura constante (generalmente a 23°C), y utilizando soluciones salinas saturadas (para alcanzar y mantener los valores de humedad relativa) o en su caso agua destilada (100% HR) (Figura 1.3). Los datos de permeabilidad reportados en la literatura corresponden a los valores obtenidos con alguna de las dos condiciones (vaso seco o húmedo), cuya selección está motivada por las condiciones ambientales de aplicación del material. En los trabajos de Labat et al. [54] y Medjelekh et al. [51], la permeabilidad al vapor de agua fue medida a partir de ambas condiciones (vaso seco y húmedo), y se observó que pueden existir diferencias significativas entre los resultados tal como es previsto en los estándares, además el uso de ambos valores como datos de entrada en simulaciones numéricas permitió un mejor ajuste con los resultados experimentales.

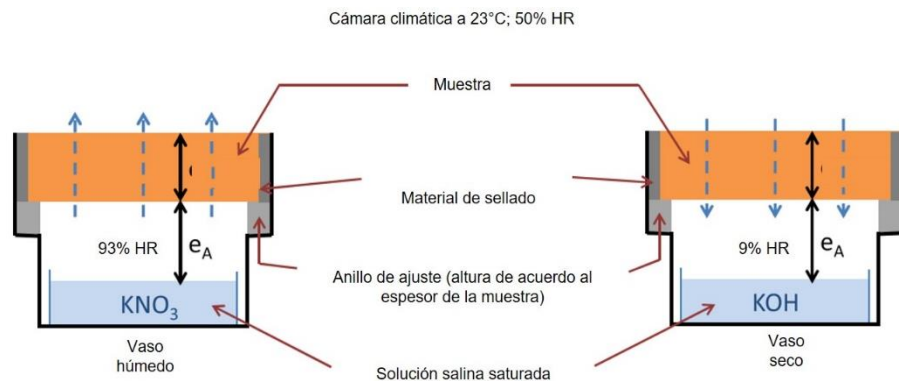


Figura 1.3 Configuración experimental para determinar la permeabilidad al vapor de agua (Método del vaso) [54].

Además de las isotermas de sorción, otro método para caracterizar la sorción dinámica de vapor de agua en los materiales porosos es el propuesto en el proyecto Nordtest [65] bajo el concepto de valor de amortiguamiento de humedad o más comúnmente conocido como MBV (por sus siglas en inglés, moisture buffering value). Este método es de los más utilizados, especialmente para materiales de construcción de tierra debido a que plantea un procedimiento simple para valorar la capacidad de absorción de humedad [14]. Este protocolo al igual que los isotermas de sorción se basa en monitorear los cambios gravimétricos en un material provocados al variar las condiciones de humedad relativa [19]. La configuración experimental típica para esta prueba es la misma que se utiliza para la obtención de las isotermas de sorción (Figura 1.2). El MBV es definido como la medida directa de la cantidad de vapor de agua adsorbido o liberado por un material higroscópico cuando se expone a una onda cuadrada en ciclos diarios: 8 h de humedad relativa alta (75%) seguido de 16 h de humedad relativa baja (33%) [3]. El protocolo considera

que estas condiciones de frontera propuestas se basan en el ambiente representativo de un dormitorio u oficina. En el trabajo de Zhang et al. [3], se adoptó y modificó el concepto de MBV y se propuso un arreglo experimental para obtener dicho valor que permitiera prescindir de una cámara climática de alta precisión requerida en el protocolo original, y probar el material a diferentes tipos de variaciones de humedad de acuerdo al ambiente real de exposición (Figura 1.4). En el trabajo se discute que los valores de humedad relativa propuestos en el método Nordtest (33 y 75%) no son representativos para todos los climas, por ejemplo, en los climas calurosos y húmedos, la humedad relativa externa puede ser mayor a 75%.



Figura 1.4 Configuración experimental modificada para el cálculo del MBV [3].

Otro de los protocolos de prueba sobre la dinámica de sorción de vapor es el estándar ISO 24353: 2008 “Rendimiento higrotérmico de materiales y productos de construcción: determinación de las propiedades de adsorción/desorción de humedad en respuesta a la variación de humedad”. Esta norma internacional describe un método de prueba que es aplicable a los materiales utilizados para atenuar la fluctuación de la humedad relativa interior. El procedimiento consiste en definir la eficiencia de adsorción/desorción de los materiales de construcción en condiciones de uno o varios ciclos, dicha eficiencia es medida como el cambio en la masa de una muestra al pasar de un espacio dado a otro de diferente humedad relativa a temperatura constante [66]. Sin embargo, el uso de este protocolo se encuentra muy escasamente reportado [19]. En la Tabla 1.2, se resumen las propiedades térmicas e higroscópicas que son incluidas principalmente en la caracterización de los materiales de construcción a base de tierra, así como los métodos que han sido aplicados para su obtención.

Tabla 1.2 Caracterización de las propiedades térmicas e higroscópicas de los materiales de construcción de tierra.

Propiedad	Estándar/ Método	Material	Referencia
Conductividad térmica	EN 12664 Placa caliente guardada	Arcilla + cáñamo	[17]
	EN ISO 22007. Método de la fuente de calor plana transitoria (disco caliente)	Ladrillo de arcilla no cocido	[51]
	ISO 12664 Placa caliente guardada	Arcilla + paja	[54]
	Método del hilo caliente	Bloque de tierra comprimida	[12] [53]
	ISO/DIS 22007-2:2015 Método de la fuente de calor plana transitoria (disco caliente).	Ladrillo de tierra no cocido	[18]
Calor específico	ISO 11357-4 Calorimetría diferencial de barrido (DSC)	Arcilla + cáñamo	[17]
	Calorímetro tipo Calvet	Ladrillo de arcilla no cocido	[51]
	Calorimetría diferencial de barrido	Bloque de tierra comprimida	[12] [53]
Permeabilidad al vapor de agua	Método del vaso	Arcilla + paja (zacate)	[54]
	ISO 12572 Método del vaso (seco)	Bloque de tierra comprimida	[12]
	EN ISO 12572 Método del vaso	Ladrillo de arcilla no cocido	[51]
	GB/T 17146-2015 Método del vaso (húmedo)	Ladrillo de tierra no cocido	[18]
	Método del vaso (seco)	Arcilla + cáñamo	[17]
Isotermas de sorción	ISO 12571 Propiedades de sorción higroscópica.	Arcilla + cáñamo	[17]
	Analizador de sorción dinámica de vapor	Arcilla + cáñamo	[17]
	NF EN ISO 12571	Bloque de tierra comprimida	[12]
	NF EN ISO 12571:2000 Método del vaso	Arcilla + cáñamo	[53]
	GB/T 20312-2006 Propiedades de sorción higroscópica	Ladrillo de tierra no cocido	[18]

1.2 Estudio experimental del comportamiento térmico e higroscópico de los materiales a base de tierra.

La caracterización de materiales a base de tierra se ha realizado también en modelos a escala y en edificaciones bajo condiciones controladas o a condiciones ambientales reales. Medjelekh et al. [51] evaluaron el amortiguamiento térmico y de humedad de un muro de ladrillos de arcilla (sin cocer) a escala real sujeto a varios escenarios transitorios de carga hídrica mediante una cámara climática doble. Este sistema permitió determinar el flujo de calor y masa a través del muro, así como los coeficientes superficiales de transferencia de calor y masa. A partir de la medición de los gradientes de temperatura y de humedad relativa a través del espesor fue posible analizar el efecto del calor latente. Sin embargo, a fin de analizar este efecto el estudio fue realizado bajo condiciones de frontera isotérmicas.

Soudani et al. [67] analizaron el rendimiento energético que pueden ofrecer unos muros de tierra apisonada de 50 cm de espesor a partir de mediciones “in situ” realizadas durante más de dos años en una edificación provista con un sistema de calefacción y habitada por cinco personas. En este estudio se midió la temperatura y humedad relativa interior y se calcularon las ganancias y pérdidas de calor. Los resultados mostraron que estos muros permitieron mantener el confort térmico con bajo consumo de calefacción gracias a su masa térmica. Sin embargo, en el estudio no se considera la influencia del contenido de humedad en el comportamiento térmico del muro de tierra.

Brambilla y Jusselme et al. [68] analizaron el comportamiento térmico de un muro de bloques de tierra comprimida a escala real. Los resultados mostraron una reducción en la temperatura interna de hasta casi 3°C, manteniendo una temperatura de ambiente interior confortable en conjunto con ventilación natural durante la noche. Sin embargo, en el análisis no se consideró el efecto de la humedad ni las condiciones ambientales externas, puesto que el objetivo del estudio fue solo definir el potencial de este material para prevenir el sobrecalentamiento en una oficina de acuerdo a estrategias de ventilación considerando solamente las ganancias de calor internas.

El conjunto de trabajos experimentales presentados en [69] sobre edificaciones cuya envolvente contiene materiales a base de tierra se puede observar que la mayoría de estos trabajos analizan solo el comportamiento térmico. Sin embargo el efecto combinado del transporte de calor y humedad a través de la envolvente de un edificio son fenómenos inseparables puesto que cada uno influye en el otro [2]. Esto ocurre principalmente en materiales porosos como la tierra y compuestos orgánicos, los cuales pueden ofrecer cualidades de aislamiento o masa térmica y, a

su vez, funciones de barrera de vapor o de control de humedad. Es notable entonces la importancia de tratar el transporte de calor y humedad de forma conjunta para determinar la respuesta que ejerce el material de interés ante las condiciones ambientales de exposición. Por lo anterior y con la finalidad de obtener resultados representativos y confiables, se han realizado trabajos experimentales donde el material es expuesto a variaciones de temperatura y humedad simultáneamente.

Zhang et al. [18] analizaron el comportamiento higrotérmico de una edificación construida con bloques de tierra ubicada en un clima desértico. Se analizó el efecto de este material sobre el ambiente interior para dos días de verano. Los resultados mostraron que, en comparación con un muro de ladrillos recocidos, un muro de tierra atenúa las fluctuaciones de la temperatura y de la humedad relativa de aire interior y reduce el consumo de energía por uso de calefacción, lo cual se atribuyó a la inercia térmica y la capacidad de almacenamiento de humedad de la tierra.

Fohagui et al. [70] monitorearon las condiciones de temperatura y humedad relativa en un ambiente interno de dos arreglos experimentales; uno construido con ladrillos de tierra (secados al sol) y otro construido con bloques de cemento. El arreglo de ladrillos de tierra mantuvo la humedad relativa entre 40-60% y la temperatura máxima en 24°C; mientras que el otro arreglo presentó una humedad relativa entre 10-40% y temperatura máxima en 29°C.

OBJETIVO

Identificar el potencial higrotérmico de un material inspirado en los muros de las casas mayas mediante el análisis de su respuesta a la transferencia de calor y humedad bajo las condiciones características de un ambiente cálido-subhúmedo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Conocer la capacidad del material para el transporte y almacenamiento de calor y humedad bajo condiciones controladas a nivel laboratorio.
- Analizar la variación espaciotemporal de la transferencia de calor y de humedad que ocurre a través material cuando es expuesto a condiciones en tiempo real de un clima cálido-subhúmedo.

CAPÍTULO 2

METODOLOGÍA

2.1 Descripción del material de estudio.

El material en estudio está inspirado en la mezcla húmeda de tierra y fibra vegetal, *pak'luum*, empleada en la técnica de construcción conocida como *bajareque* para construir los muros de la casa maya vernácula (Figura I.1). La mezcla de estudio está compuesta de tierra y paja de trigo (secada al sol) procedentes de la Península de Yucatán. La proporción de cada uno, se basa en una equivalencia de volumen; sin embargo, se estima que el porcentaje en masa de la paja es de 3 a 4%. La tierra utilizada se conoce tradicionalmente *kankab* o *kancab* y se explota a escala rural para la vivienda y la agricultura.

Como se podrá observar en secciones posteriores, se analizó la composición mineralógica y granulométrica de muestras de suelos recolectadas en regiones donde se ha construido los muros de la casa maya vernácula con *kankab*. Sin embargo, el análisis higrotérmico (metodología y resultados de este proyecto) se centró en muestras elaboradas con el suelo recolectado en Mérida, Yucatán, la mayor aglomeración urbana del estado, que sufre el efecto de isla de calor urbana y el consiguiente discomfort térmico [71,72]. A diferencia de las prácticas rurales de la Península de Yucatán, el suelo *kankab* de Mérida no se explota actualmente para fines habitacionales, ni agrícolas. Este aspecto motivó el enfoque en las muestras de Mérida, donde reside la mayoría de los yucatecos, y no existe un uso conflictivo del suelo *kankab* entre la vivienda y la agricultura.

La aplicación propuesta para este material es en muros híbridos, que constan de dos partes: un muro de carga (p. ej., de concreto armado) y un muro de entramado de madera (muro no estructural) relleno con una mezcla a base de tierra-paja y recubierto con una capa delgada de acabado. Si bien la arquitectura de tierra generalmente requiere muros gruesos y robustos, el espesor del muro híbrido propuesto es el de un muro convencional (entre 10 y 13 cm). Para mejorar la estabilidad e integridad del muro, el entramado de madera se compone de elementos verticales y horizontales que forman una malla (listones o tiras de madera de 1 a 2 cm de espesor), cuyo diseño favorece la adherencia de la mezcla. Como medida de protección para evitar el contacto directo con el agua (p. ej., lluvia), se propone la incorporación de un revestimiento para exteriores que permita la transmisión de vapor de agua. El revestimiento consiste en una pintura mineral a base de cal artesanal, que previene la condensación y es

altamente transpirable [73]. La hoja técnica de esta pintura se muestra en el Anexo A, donde se encuentran los valores de sus propiedades así como los estándares de medición aplicados. A partir de la información contenida se puede notar que la pintura es de uso para exteriores, muy resistente a la degradación por limpieza, y muy permeable al vapor de agua. No obstante, para garantizar la durabilidad del material se recomienda también el uso de elementos de sombreado externos, como toldos o aleros horizontales. La Figura 2.1 muestra un ejemplo de la implementación del muro híbrido con las características descritas que fue construido por Hidalgo-Escobedo y cuyos antecedentes de diseño y adaptación no convencional de muros de *bajareque* se encuentran en su trabajo [44]. No obstante, como punto de partida, se consideró adecuado enfocar este trabajo en la caracterización del material a base de tierra (mezcla principal + capa de acabado) sin considerar el entramado de madera. Es importante tenerlo en cuenta para la comprensión de este trabajo de aquí en adelante.



Figura 2.1 Muro híbrido propuesto: muro de carga (parte del muro pintada en color blanco), y muro no estructural en su a) entramado de madera en forma de malla, b) rellenado con el material a base de *pak'luum* y capa de acabado, y c) pintado en color gris y con un alero que lo protege.

Las muestras estudiadas se prepararon manualmente. La Figura 2.2.a y la Figura 2.2.b muestran los componentes principales. La longitud promedio de las fibras fue de aproximadamente 0.06 ± 0.01 m para la mezcla base. Se añadió agua gradualmente a la mezcla tierra-paja hasta alcanzar un estado moldeable. Se llenó un molde con la mezcla húmeda (Figura 2.2.c) y se dejó secar a temperatura ambiente entre 15 y 30 días. Durante el proceso de secado, se crearon grietas y fisuras (Figura 2.2.d), un resultado esperado en los materiales a base de tierra. Por consiguiente, se añadió a todas las superficies una capa de acabado de 2 mm de espesor, compuesta por una mezcla húmeda de tierra, paja más corta (0.015 ± 0.005 m) y arena, y se dejó secar nuevamente a temperatura ambiente. La Figura 2.2.e muestra el aspecto final de una muestra de $0.25 \times 0.25 \times 0.05$ m (largo x ancho x alto). Todas las muestras para las diferentes pruebas (las dimensiones de las muestras se describen en la sección correspondiente

a la propiedad medida) se prepararon siguiendo el proceso descrito anteriormente. La caracterización del material se desarrolló en tres etapas las cuales se encuentran resumidas en el esquema mostrado en la Figura 2.3 y se describen a detalle cada una de ellas en las secciones siguientes de este capítulo. Con base en las características de construcción del material (muro híbrido, uso de pintura para exterior y permeable al vapor de agua, y uso de elementos de sombreado), la fuente de humedad analizada es vapor de agua, por lo que la ganancia y pérdida de humedad corresponde a la absorción y desorción higroscópica (mecanismos que consisten en la fijación o liberación de moléculas de agua hacia o desde las superficies del material).

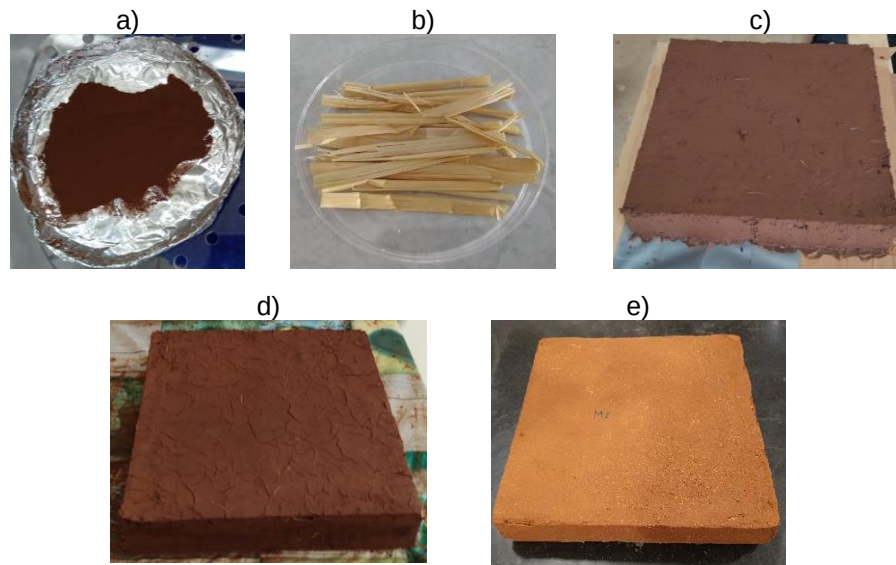


Figura 2.2 Material a base de tierra: a) tierra *kankab*, b) paja de trigo seca, c) mezcla húmeda de tierra-paja moldeada, d) muestra secada a condiciones ambientales, e) aspecto final de una muestra después de aplicar la capa de acabado.

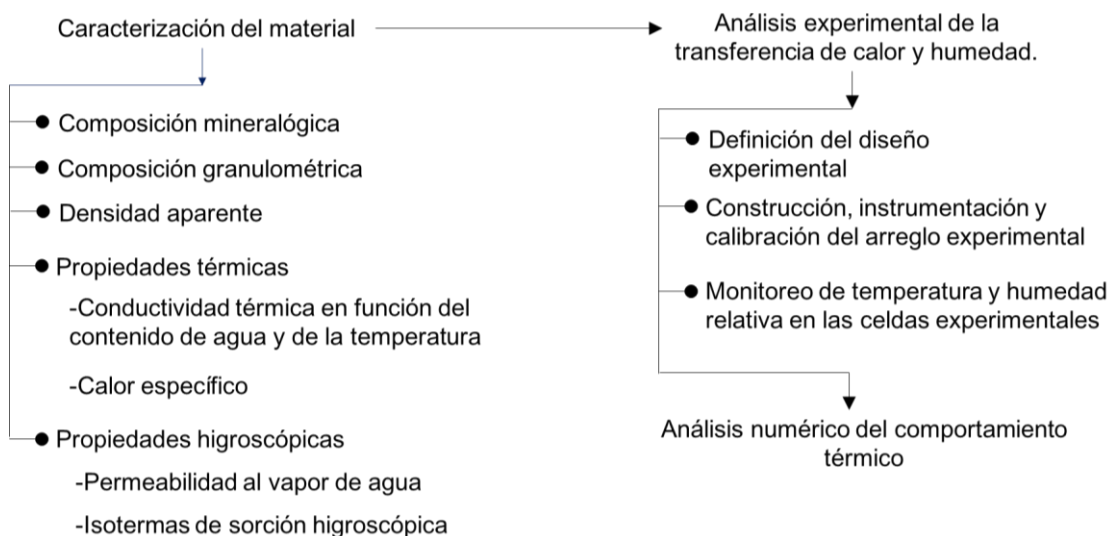


Figura 2.3 Metodología para la caracterización y análisis higrotérmico del material.

2.2 Etapa I: Caracterización de las propiedades del material a nivel laboratorio.

Esta etapa consiste en conocer la composición del material y medir en el laboratorio sus propiedades térmicas y las propiedades higroscópicas definidas en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Caracterización de las propiedades del material de estudio.

Estado de la muestra	Descripción	Propiedad	Estándar/método
Muestra seca	Las muestras son secadas en horno a 105°C y HR <10%, hasta que el cambio en la masa sea <0.1%.	Composición mineralógica	Difracción de rayos X
		Composición granulométrica	ASTM C136-06: Análisis de tamiz de agregados finos y gruesos. ASTM D422: Método del hidrómetro.
		Densidad	Uso de balanza digital y vernier digital. Grupos de muestras de diferentes dimensiones.
		Conductividad térmica	ASTM C-177-13: Método de placa caliente con guarda.
		Calor específico	Método de medición de área [74].
Muestra húmeda	Los niveles de HR de interés son alcanzados con el uso de soluciones salinas: 33.1 ± 0.2% (MgCl ₂) 52.9 ± 0.2% (Mg(NO ₃) ₂) 75.5 ± 0.1% (NaCl) 85.1 ± 0.3% (KCl) 97.6 ± 0.5% (K ₂ SO ₄)	Conductividad térmica	ASTM C-177-13 (Método de placa caliente con guarda) previo acondicionamiento a diferentes contenidos de humedad.
		Isotermas de sorción	ASTM C1498-04a
		Permeabilidad al vapor de agua	ASTM E96/E96M-16 Método desecante: 5-7% HR (gel sílice) y 52.9 ± 0.2% HR (Mg(NO ₃) ₂) a 23°C. Método de agua: 100% HR (agua) y 52.9 ± 0.2% HR (Mg(NO ₃) ₂) a 23°C.

2.2.1 Obtención de la composición mineralógica y de la distribución granulométrica.

El análisis de la composición mineralógica se realizó para muestras de suelo *kankab* recolectadas en cuatro localidades de Yucatán: los municipios rurales de Akil, Oxkutzcab y Santa Elena, y la ciudad de Mérida (Figura 2.4), lugares donde se han construido la casa maya vernácula a base de tierra. A cada muestra se le realizó una prueba de difracción de rayos X utilizando un difractómetro D2 Phaser Bruker® con radiación Cu K α ($\lambda=1.5418$ Å) operando a 30 kV y 10 mA

y a temperatura ambiente. El patrón de difracción correspondió a un barrido de 15 a 65° 2 θ , con tamaño de paso de 0,01° 2 θ y un paso de tiempo de 0.4 s. La identificación de las fases minerales se realizó utilizando la base de datos disponible en el software de procesamiento del difractómetro.

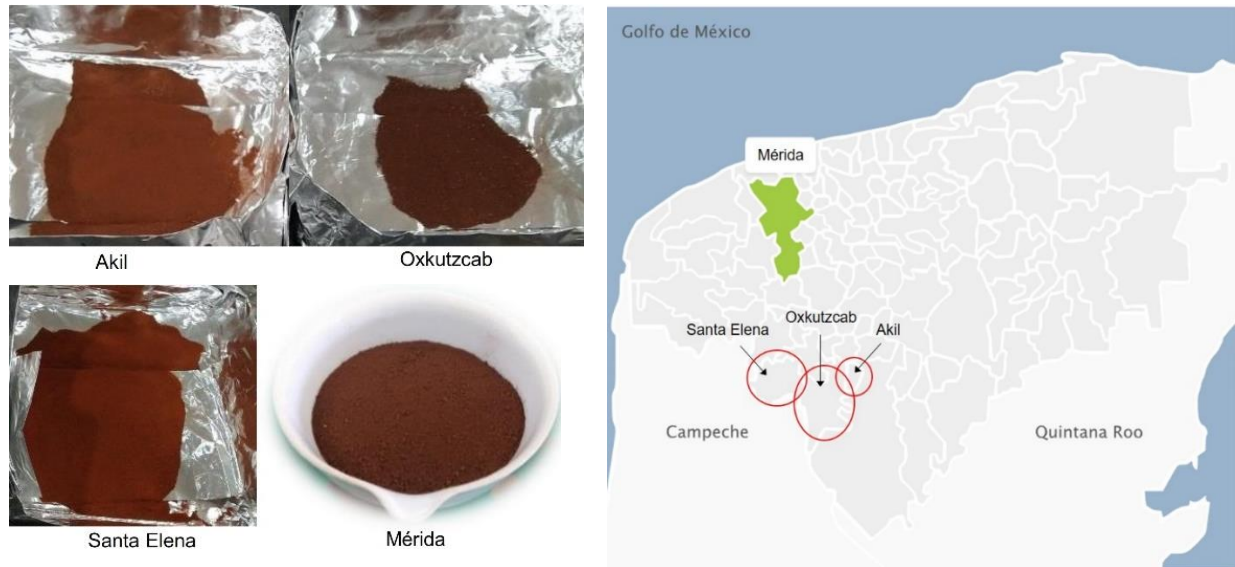


Figura 2.4 Muestras de tierra *kankab* recolectadas en Yucatán y ubicación de las localidades correspondientes.

Dentro de los aspectos que influyen en el comportamiento del material se encuentra la composición de la tierra en términos de la cantidad de arcilla, limo y arena. Por lo cual se identificó el tamaño de las partículas mediante un análisis granulométrico. Para esta prueba se analizaron las muestras recolectadas en los suelos de Akil, Oxkutzcab, Santa Elena y en la periferia de Mérida. El análisis consistió en un método mecánico mediante el cual se separan las partículas del suelo en sus diferentes tamaños con el uso de tamices de aberturas específicas progresivamente más pequeñas hasta llegar a la porción menor a 0.074 mm (tamiz no. 200) a la cual se le denomina como limo, arcilla y coloide o bien, partículas de grano fino. El proceso aplicado se basa en el estándar ASTM C136-06 “Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates”. De acuerdo a la muestra de suelo, se utilizó el tamiz no. 4, 10, 20, 40, 60, 100 y 200. En los resultados se expresa la proporción de una determinada fracción de granos que pasa por cada tamiz como porcentaje de la masa total de la muestra y se clasifica de la siguiente manera:

- Arena gruesa: pasa el tamiz no.4 y es retenida en el tamiz no. 10.
- Arena media: pasa el tamiz no. 10 y es retenida en el tamiz no.40.

- Arena fina: pasa el tamiz no. 40 y es retenida en el tamiz no. 200.
- Limos, arcillas y coloides: pasa el tamiz no.200.

Para esta fracción más fina (limos, arcillas y coloides), la distribución del tamaño de partícula fue determinado de acuerdo al ASTM D422 [75]. El proceso se basa en la relación de la velocidad de sedimentación y el tamaño de las partículas (Ley de Stokes). Dentro de los principales requerimientos se encuentra el uso de un hidrómetro, un agente defloculante, un agitador mecánico; así como conocer la gravedad específica del suelo. Debido a que este último valor no es conocido se determinó previamente de acuerdo al ASTM D854-06 [76].

2.2.2 Medición de las propiedades termofísicas

La densidad aparente del material, expresada como la relación entre la masa de una muestra seca y su volumen, se determinó a partir del valor promedio de los resultados de tres muestras con dos repeticiones cada una. Se analizaron dos grupos de muestras, el primer grupo fueron muestras del material sin capa de acabado, es decir, solo la mezcla tierra + paja (Figura 2.5.a, Figura 2.5.b y Figura 2.5.c). El segundo grupo consistió en las mismas muestras anteriores pero se les agregó una delgada capa de acabado (Figura 2.5.d, Figura 2.5.e y Figura 2.5.f). Las muestras fueron previamente secadas en un horno ventilado (marca Felisa, modelo FE-292AD, estabilidad $\pm 1^\circ\text{C}$) a 105°C . El proceso de secado concluía cuando el cambio de masa de la muestra era menor a 0.1% de la masa inicial de acuerdo a mediciones realizadas cada 24 h. Para la medición de la masa se utilizó una báscula Ohaus serie EB6 con precisión de 0.2 g, y para la medición de las dimensiones un calibrador digital de 6 pg, milimétrico y estándar con tolerancia de 0.05 mm.

La conductividad térmica se determinó mediante la técnica de Placa Caliente con Guarda (GHP, por sus siglas en inglés) de acuerdo al procedimiento descrito en el estándar ASTM C177-13 [77] “Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus”. Las características del equipo de GHP, así como su verificación y calibración se encuentran detallados en el trabajo de Pech-Can [78]. Se realizó una prueba de funcionamiento utilizando una muestra de acrílico. La conductividad térmica resultante fue $0.159 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ a una temperatura media (T_m) de 26.6°C . En las pruebas de validación reportadas por Pech-Can [78], los resultados de una muestra de acrílico fueron 0.166 , 0.168 y $0.160 \text{ W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ a T_m de 24.1 , 25.0 y 25.6°C , respectivamente. Las variaciones entre los resultados pueden atribuirse, en parte, a errores del instrumento de medición y, por otra parte, al control de las condiciones ambientales del laboratorio (como la temperatura

y humedad). Considerando que el valor obtenido y los valores reportados muestran diferencias entre 0.6-5.3%, así como a la incertidumbre de la medición, se puede confirmar la confiabilidad del funcionamiento actual del equipo GHP.

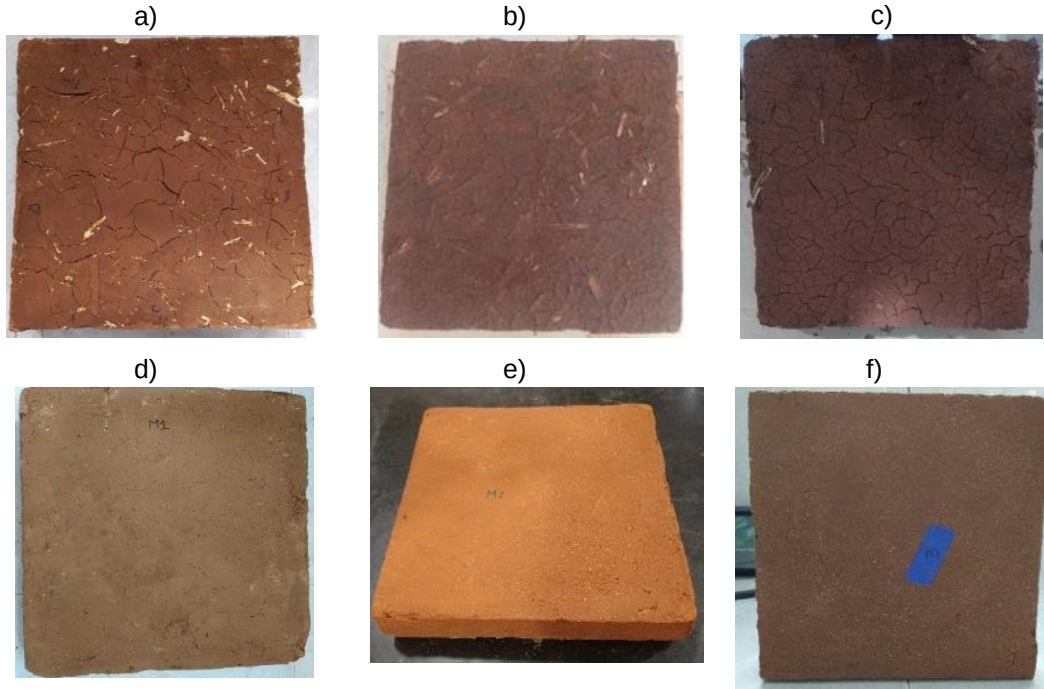


Figura 2.5 Muestras del material sin acabado: a) muestra #1, b) muestra #2 y c) muestra #3; muestras del material con acabado d) muestra #1, e) muestra #2 y f) muestra #3.

Las mediciones fueron realizadas a tres muestras del material (previamente secadas bajo el mismo proceso descrito en la sección de densidad) con tres repeticiones para cada una de ellas. Se consideró que en cada medición, la muestra estuvo sujeta a transferencia de calor unidimensional por conducción en estado estacionario, y el cálculo se basó en la ley de Fourier de acuerdo a la ecuación 2.1. Donde Q es el flujo de calor (W), A es el área de la muestra perpendicular al flujo de calor (m^2), ΔT es la diferencia de temperatura entre las placas ($^{\circ}C$) y L es el espesor de la muestra (m). El estado estacionario se asumió cuando la temperatura en cada una de las placas mostraba una variación menor a 0.2% del valor promedio entre periodos de 2 horas o, cuando el cambio en el valor de la conductividad era inferior al 1% en periodos de 2 h, la condición que ocurriera primero.

$$Q = \lambda A \frac{\Delta T}{L} \quad (2.1)$$

Con la finalidad de analizar el efecto de la temperatura sobre la conductividad térmica, se realizaron un conjunto de pruebas bajo el mismo procedimiento y criterios descritos anteriormente

y para las mismas muestras pero variando el valor de la temperatura media y en consecuencia también la diferencia de temperatura entre las placas.

El calor específico (C_p) del material, así como de sus componentes (tierra y paja) fue obtenido a partir del método de medición de área propuesto por Hernández-Sánchez [74] usando un calorímetro diferencial de barrido Perkin-Elmer DSC-7. Previo a la prueba, los materiales fueron sometidos a un proceso de trituración y secado a 105°C y posteriormente condicionados en un ambiente a $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ y $<10\%$ de HR. Las mediciones fueron realizadas para un rango de temperaturas de 20 a 55°C con intervalos de 5°C y dos repeticiones para cada componente. El calor específico de la mezcla tierra-paja y de la mezcla de acabado fueron calculados con la ecuación 2.2 [17,79]. Donde f_p es la fracción masa del agregado vegetal en la mezcla, los subíndices t y p indican tierra y paja.

$$C_{p_{t+p}} = f_p C_{p_p} + (1 - f_p) C_{p_t} \quad (2.2)$$

2.2.3 Medición de propiedades higroscópicas.

La interacción del material con la humedad requiere especial atención debido a su naturaleza porosa, a su contenido de arcilla (los minerales arcillosos tienen una alta afinidad a las moléculas de agua) y a que su ambiente de exposición presenta generalmente valores de humedad relativa superiores al 70%. Sin embargo, debido a las medidas de protección (uso de pintura para exterior y permeable al vapor de agua, y elementos de sombreado exteriores), se puede considerar que la fuente de humedad principal es el vapor de agua, por lo que las propiedades higroscópicas obtenidas fueron la permeabilidad al vapor de agua y las isotermas de sorción higroscópica.

La permeabilidad al vapor de agua fue medida de acuerdo al estándar ASTM E96/E96M-16 “Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials” [80]. El estándar propone dos métodos posibles para determinar la capacidad del material para la transmisión de vapor: método desecante (HR baja) y método de agua (HR alta). En ambos se busca establecer un gradiente de presión de vapor a través del material en un ambiente a temperatura constante y se miden periódicamente los cambios de masa. Con el fin de conocer la respuesta del material ante niveles de humedad baja y alta, lo cual se asemeja más a las condiciones reales a las que estará expuesto (por ejemplo, temporadas muy calurosas o de lluvias, o un ciclo diario), se realizó ambos métodos. Es decir, la capacidad de transmisión de vapor de agua del material se obtuvo para un ambiente seco y un ambiente húmedo. En la condición de ambiente seco, la superficie superior de la muestra se expuso a un ambiente controlado a $23 \pm 1^{\circ}\text{C}$ y $50 \pm 3\%$ de HR, mediante el uso

de una cámara a temperatura constante Binder KBW 720. La cara inferior del material estuvo en contacto con un ambiente de humedad baja controlado con gel sílice que permitió mantener el nivel de humedad entre 5-7%. Para la condición de ambiente húmedo, la superficie superior de la muestra estuvo expuesta a las mismas condiciones de la prueba anterior, mientras que la cara inferior fue sometida a un ambiente a 100% de HR con el uso de agua destilada. Las muestras utilizadas fueron de forma cilíndrica, de ~9.1 cm de diámetro y ~3.5 cm de espesor (Figura 2.6.a); dimensiones seleccionadas de acuerdo al estándar ASTM E96/E96M-16 [80] y a otros trabajos reportados de materiales semejantes [12,18,54]. Las muestras fueron previamente secadas bajo el mismo proceso descrito en la sección de densidad, y posteriormente acondicionadas en un ambiente a $23 \pm 1^\circ\text{C}$ y $<10\%$ de HR. Para analizar el efecto del revestimiento propuesto (pintura para exteriores que es permeable al vapor de agua) sobre la transmisión y almacenamiento de humedad, a cuatro de seis muestras se les agregó esta pintura en color blanco a una de sus caras (Figura 2.6.b). Las condiciones de la prueba fueron monitoreadas con dos sensores iButton® temperature/humidity logger DS1923 con mediciones cada 3600 s y cuatro sensores Toh tics con mediciones cada 600 s. La medición de la masa de las muestras a lo largo de la prueba se realizó con una balanza Adam HCB602H (lectura mínima de 0.01 g). En la Figura 2.6.c se muestra el arreglo experimental correspondiente.



Figura 2.6. Prueba de permeabilidad al vapor de agua: a) Muestras del material de tierra, b) incorporación de un recubrimiento permeable al vapor de agua, y c) arreglo experimental.

Las isothermas de sorción higroscópica fueron obtenidas según el ASTM C-1498 (ASTM 2010) “Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials” [81]. El cual se trata de un método gravimétrico que permite determinar el contenido de humedad de equilibrio de un material poroso cuando es expuesto, bajo temperatura constante, a diferentes niveles de humedad relativa en orden creciente (isoterma de adsorción) y en orden decreciente (isoterma de desorción). El comportamiento es expresado gráficamente mediante las curvas de adsorción y desorción. La pendiente de la curva de isoterma de adsorción representa la capacidad de sorción de humedad en el dominio higroscópico.

A partir del análisis de las condiciones ambientales a las que será expuesto el material en aplicaciones reales (ver Anexo B), se propuso realizar la prueba para cinco niveles de humedad relativa en un rango de 33 a 97% con el uso de soluciones salinas saturadas (Tabla 2.2) y a una temperatura constante de $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

Tabla 2.2 Soluciones salinas para obtener las humedades relativas de la prueba a $23 \pm 1^\circ\text{C}$.

Solución salina	Humedad relativa (%)		
	22°C	23°C	24°C
Cloruro de magnesio hexahidratado $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	32.98	32.92	32.86
Nitrato de magnesio $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	53.78	53.49	53.19
Cloruro de sodio NaCl	75.42	75.38	75.34
Cloruro de potasio KCl	84.74	84.56	84.38
Sulfato de potasio K_2SO_4	97.48	97.42	97.36

Para mantener el valor de temperatura constante (condición necesaria para la estabilidad de la HR proporcionada por las sales) se construyó una cámara con material aislante (hojas de poliestireno expandido de $1 \frac{1}{2}$ pg) y provista de un sistema para el control de temperatura. Este consistió en un arreglo de celda Peltier, disipadores y ventiladores con funcionamiento programado por un controlador de temperatura (Laird PR-59). Para monitorear las condiciones del ambiente interno, se incorporaron dos sensores iButton® temperature/humidity logger DS1923 con medición cada 3600 s y dos sensores DHT22 de temperatura y humedad con medición cada 60 s. La medición de masa de las muestras a lo largo de la prueba se realizó con una balanza Ohaus PA124C (lectura mínima de 0.0001 g). El contenido de humedad de equilibrio se alcanzaba cuando la diferencia entre dos mediciones de masa consecutivas (cada 24 h) era menor a 0.1% y fue expresado sobre base seca de acuerdo con la ecuación 2.3. Donde, u es el contenido de humedad (kg kg^{-1}), m es la masa promedio de las muestras en equilibrio (kg) y, m_0 es la masa de las muestras secas (kg).

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \quad (2.3)$$

Se elaboraron seis muestras de $0.05 \times 0.05 \times 0.03$ m con la mezcla base (tierra + paja) y la capa de acabado (tierra + paja + arena). Como se observa en la Figura 2.7, tres de las seis muestras fueron pintadas con el mismo recubrimiento en color blanco empleado en la prueba de permeabilidad al vapor de agua (a fin de analizar su efecto sobre la capacidad de adsorción y desorción de humedad en el material).

La capacidad de sorción (ξ) del material, expresada en la ecuación 2.4 y obtenida a partir de la pendiente de la curva de la isoterma de adsorción, puede expresarse como adimensional o en kg m^{-3} (esto solo si el contenido de humedad está dado también en kg m^{-3}). La importancia de esta variable es debido a su utilización en los modelos del transporte acoplado de calor y masa.

$$\xi = \frac{\Delta u}{\Delta \text{HR}} \quad (2.4)$$



Figura 2.7 Muestras de material para la prueba de obtención de las isothermas de sorción.

En la literatura se encuentran reportados varios modelos matemáticos que describen la relación entre el contenido de humedad de equilibrio y la humedad relativa en materiales higroscópicos. Hay modelos teóricos como el de Guggenheim, Anderson and de Boer conocido como el modelo GAB, hay otros semi-empíricos como el de Chung y Pfof y Henderson, así como modelos totalmente empíricos como el de Oswin. Estos modelos junto con el de Halsey fueron analizados con la finalidad de ajustar los datos experimentales obtenidos. Las expresiones matemáticas de estos modelos se encuentran en la Tabla 2.3. El ajuste del modelo a los resultados experimentales se desarrolló por el método de mínimos cuadrados. El criterio de selección se basó en el modelo con el coeficiente de determinación (R^2) de valor mayor.

Tabla 2.3 Modelos de ajuste de las isothermas de sorción.

Modelo de isoterma de sorción	Expresión matemática	Referencia
GAB	$u = \frac{w_m \cdot n \cdot k \cdot \text{HR}}{(1 - k \cdot \text{HR})(1 - k \cdot \text{HR} + n \cdot k \cdot \text{HR})}$	[58]
Henderson	$u = \left(- \left(\frac{1}{k \cdot T} \right) \cdot \text{Ln}(1 - \text{HR}) \right)^{\left(\frac{1}{n} \right)}$	[59]
Chung-Pfof modificado	$u = k + n \cdot \text{Ln}(-\text{Ln}(\text{HR}))$	[60,61]
Halsey	$u = \left(\frac{-k}{\text{Ln}(\text{HR})} \right)^{\frac{1}{n}}$	[62]
Oswin	$u = k \left(\frac{\text{HR}}{1 - \text{HR}} \right)^n$	[63]

Donde u: contenido de humedad de equilibrio (kg kg^{-1}), T:temperatura ($^{\circ}\text{C}$), w_m , n, k: constantes de los modelos.

2.2.4 Medición del efecto del contenido de humedad sobre el comportamiento térmico.

En capítulos y secciones anteriores se ha mencionado la naturaleza porosa del material de estudio así como su contenido de arcillas las cuales dentro de sus características se encuentra la afinidad a las moléculas de agua. Por lo que resulta importante conocer el efecto del contenido de humedad del material sobre su conductividad térmica. La relevancia de esta información se debe también a que el material en su aplicación real, como elemento constructivo, estará expuesto a un ambiente donde se predominan valores de humedad relativa mayores a 70% como puede observarse en el Anexo B. De tal forma que, se puede suponer que el material a las condiciones ambientales de aplicación nunca estará en estado seco sino que siempre mantendrá un cierto contenido de humedad.

Con base a la instrumentación disponible, la medición de la conductividad térmica en función del contenido de humedad en el material se realizó bajo la técnica de Placa Caliente con Guarda [77] misma que se utilizó para la obtención de la conductividad térmica del material en estado seco. La diferencia principal en el procedimiento se encuentra en el tratamiento previo de la muestra, puesto que después del proceso de secado se llevó a un ambiente controlado de humedad relativa mediante el uso de un recipiente hermético y soluciones salinas saturadas. El análisis del contenido de humedad se realizó midiendo periódicamente la masa de la muestra expresando dicho contenido porcentual en base seca (ecuación 2.3). El criterio de equilibrio consistió en alcanzar cambios de masa menores a 1% de la masa inicial entre periodos de 24 h. Al cumplirse este criterio la muestra fue recubierta o envuelta inmediatamente con dos capas de papel film transparente (espesor <0.25 mm), esto con la finalidad de reducir lo más posible la pérdida de humedad del material debido a la duración de las pruebas (medición en estado estacionario). En el trabajo de Ferroukhi et al. [82] donde también obtuvieron la conductividad térmica de una material a diferentes contenidos de humedad mediante pruebas en estado estacionario, aplicaron el mismo tipo de recubrimiento a las muestras.

Las pruebas se realizaron solo con la muestra #3 (mostrada en la Figura 2.5) y buscando una temperatura media de 24°C. Los valores iniciales de contenido de humedad analizados fueron 4.4%, 6.1%, 7.1% y 8.0% y las soluciones salinas utilizadas para el acondicionamiento de la muestra fueron cloruro de sodio (NaCl), cloruro de potasio (KCl) y sulfato de potasio (K_2SO_4). Estos valores de contenido de humedad representan el equilibrio de la muestra expuesta a niveles altos de humedad relativa (74%-95%). Como extensión a este estudio para cada valor de contenido de humedad se realizaron pruebas con otros dos valores de temperatura media, 32°C

y 36°C aproximadamente, los cuales se definieron de acuerdo a las temperaturas características del clima cálido subhúmedo en la ciudad de Mérida, Yucatán y, teniendo en consideración las temperaturas que pueden alcanzar las placas del instrumento de medición de modo que se evite la condensación de agua en las muestras y en dichas placas.

2.3 Etapa II: Análisis de la transferencia de calor y humedad del material expuesto a las condiciones de aire exterior de un clima cálido sub-húmedo.

Esta etapa consistió en diseñar, construir, instrumentar y calibrar un arreglo experimental destinado al análisis del intercambio de calor y de humedad entre el material de estudio y sus alrededores mediante mediciones en tiempo real de temperatura y humedad relativa (dentro del material y del aire de ambiente interior). El arreglo experimental se trató principalmente de un muro a escala reducida construido con el material de estudio. La cara posterior del muro quedó en contacto con un espacio cerrado con paneles de material aislante en representación al ambiente interno de un espacio cerrado a temperatura y humedad relativa no controlada. La cara frontal estaba expuesta a las variaciones ambientales de una región con clima cálido-subhúmedo. Las superficies laterales del muro estuvieron en contacto con un marco de madera del mismo espesor el cual cumplió una función doble; por una parte servir como soporte estructural al muro puesto que, como se ha mencionado anteriormente, el fin de aplicación real del material de estudio es para muros de relleno. Por otra parte, el comportamiento aislante de la madera ayudaría a reducir la transferencia de calor y humedad en dichas superficies de modo que la transferencia de energía pueda ser considerada unidimensional. De aquí en adelante, al arreglo conformado por el muro, su marco de madera y el espacio delimitado por material aislante se hará referencia como celda experimental. La instrumentación de dicha celda experimental consistió en sensores de temperatura colocados sobre la superficie del muro en contacto con el ambiente exterior y sobre la superficie en contacto con el ambiente interior. Asimismo, dentro del muro (a diferentes profundidades) y en el ambiente interior de la celda se colocaron sensores de temperatura y de humedad relativa.

2.3.1 Definición y diseño del arreglo experimental.

Como primer paso se definió el diseño experimental y las dimensiones de cada uno de sus componentes. Se tomó como punto de partida las dimensiones de un soporte metálico existente y cuyas características favorecieron la conveniencia de su uso. La Figura 2.8.a muestra dicho soporte metálico que permitió que la celda experimental estuviera a cierta altura y se evitara daños causados por ejemplo, por posibles encharcamientos de agua, así también para facilitar

su manejo y transporte. La Figura 2.8.b ilustra el espacio aislado que representa un ambiente interno y que funciona como una guarda puesto que promueve el flujo de calor unidimensional (solo a través del muro). Para tal fin, este elemento fue construido con una capa de triplay de 0.009 m de espesor que estará expuesta al ambiente exterior y por dos capas internas de poliestireno extruido (Foamular® 250) de 0.027 m de espesor cada una. El espacio interno resultante mide 0.634 m x 0.634 m x 0.597 m.

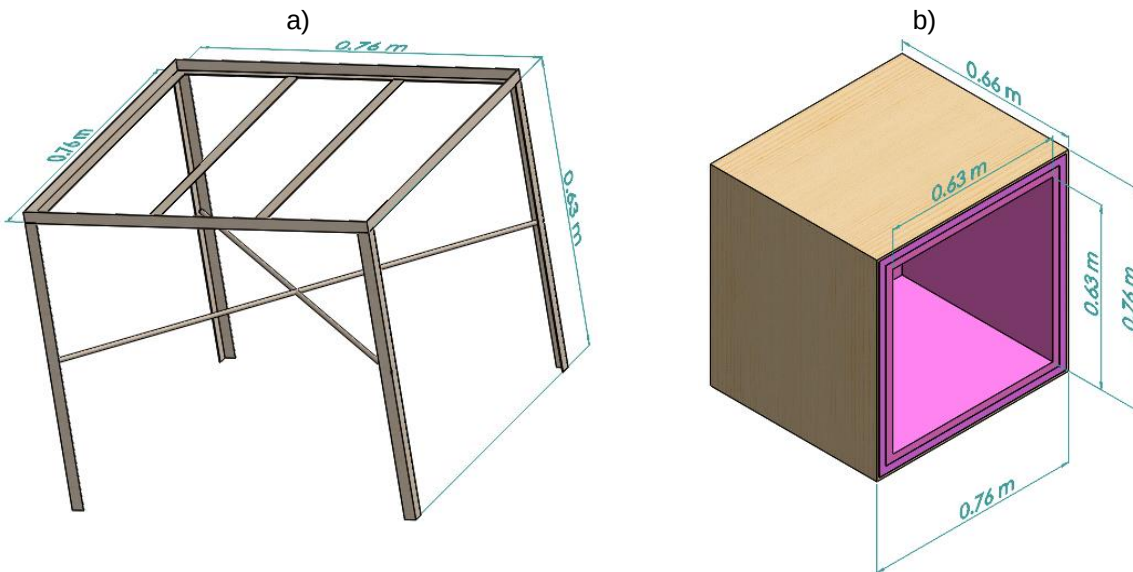


Figura 2.8. Componentes del arreglo experimental: a) soporte metálico, b) guarda.

En la Figura 2.9.a se muestra el marco de madera con función estructural y de aislamiento para el muro. Se observa también que el muro del material a base de la mezcla *pak'luum* mide 0.64 m x 0.64 m de superficie y 0.10 m de espesor (Figura 2.9.b). Con la finalidad de identificar el potencial del material de tierra para regular la temperatura y humedad del ambiente exterior en comparación con un sistema constructivo convencional en la región, se construyó otra celda experimental con las mismas dimensiones e instrumentación pero en este caso el muro fue de bloques huecos de concreto. Las dimensiones de los bloques fueron de 0.395 m x 0.197 m x 0.092 m y el muro fue recubierto con una capa de revoco de concreto de 0.004 m sobre la superficie frontal y posterior (Figura 2.9.c). Es claro que ambos muros tienen una estructura diferente, puesto que el muro de tierra es macizo y homogéneo mientras que el muro de bloques huecos de concreto (tiene cavidades). Por lo que es importante tener en cuenta que, en el muro del material a base de la mezcla *pak'luum* la transferencia de calor ocurre principalmente por conducción. Mientras que, en el muro de bloques huecos de concreto la transferencia de calor involucra la interacción de los mecanismos de conducción, de convección y de radiación. No

obstante, como se mencionó anteriormente, el propósito de esta parte experimental de la investigación es comparar el potencial del material de tierra contra el de un material de construcción de uso muy común en la región. En la Figura 2.10 se ilustra el montaje de los componentes del arreglo experimental. Se observa inicialmente la colocación de la guarda sobre el soporte metálico (Figura 2.10.a), posteriormente se muestra el acoplamiento del conjunto marco-muro ya sea el caso del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* (Figura 2.10.b) o del muro de bloques de hormigón y concreto (Figura 2.10.c).

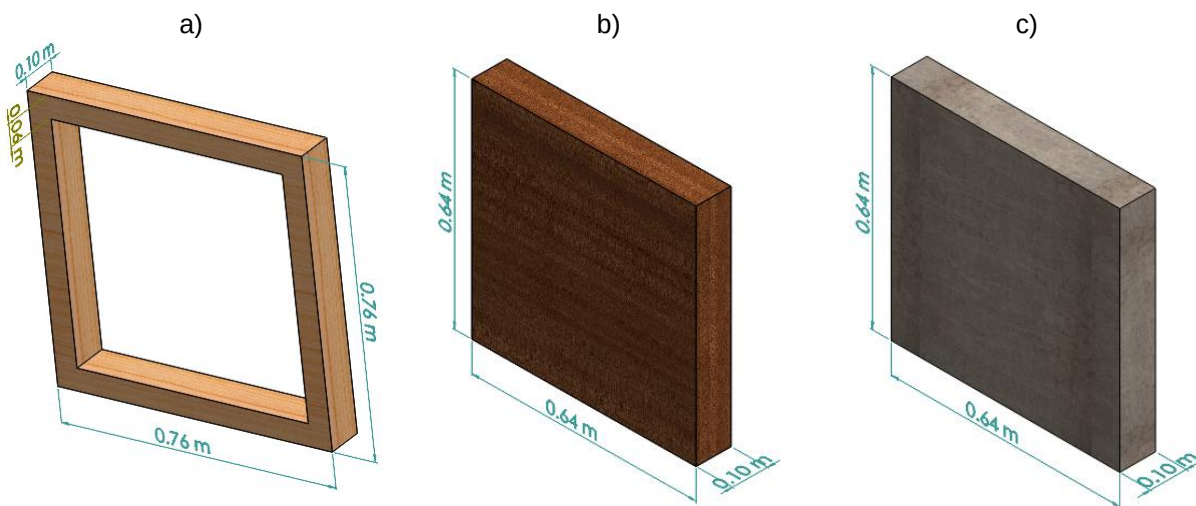


Figura 2.9 Componentes del arreglo experimental: a) marco estructural para los muros, b) muro del material a base de *pak'luum*, c) muro de bloques huecos de concreto.

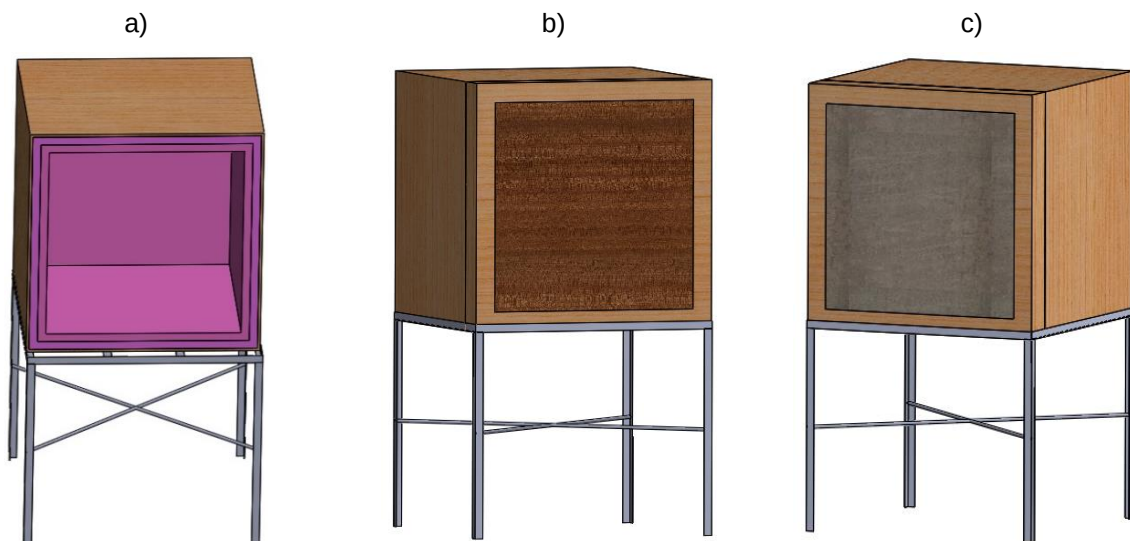


Figura 2.10 Montaje de la guarda en el soporte metálico (a), y su acoplamiento al muro con su marco para el caso del material de tierra (b) y para el caso de referencia (c).

2.3.2 Definición y construcción de la instrumentación para las celdas experimentales.

Con base en las variables de interés por obtener y analizar, las celdas experimentales se instrumentaron con sensores de temperatura y sensores de humedad relativa cuya distribución se describe a continuación.

Celda experimental con muro del material a base de la mezcla *pak'luum*: se colocaron sensores de temperatura y humedad relativa en cinco diferentes profundidades dentro del espesor del muro en un área central; como puede observarse en la Figura 2.11 los sensores tienen una separación de 0.03 m entre sí en dirección horizontal y perpendicular al espesor del muro. Esta distancia se decidió considerando que los sensores debían estar separados una longitud al menos dos veces el valor de la distancia entre un sensor y otro en dirección horizontal a lo largo del espesor del muro (0.5-1.5 cm), de tal manera que las mediciones fuesen representativas del medio circundante. En la Figura 2.11 se puede notar también que la zona de medición de cada sensor es de 0.01 m de longitud, por ejemplo, el sensor 1 (S1) mide la temperatura y humedad relativa que ocurre a una profundidad de 0.005 a 0.015 m en dirección de la superficie exterior hacia la superficie interior del muro. Por otra parte, en la cara frontal y en la cara posterior del muro, es decir, sobre la superficie hacia el ambiente exterior y sobre la superficie hacia el ambiente interior se colocó un termistor en el punto central y a una profundidad de 0.002 ± 0.001 m. En el espacio interior de la guarda se colocaron tres sensores de temperatura y humedad relativa a la altura media central pero a 0.003 y a 0.02 m de distancia desde la cara posterior del muro y otro en el centro de la celda. Estos sensores cerca del muro permiten analizar el comportamiento del transporte de vapor de agua en una zona donde se considera ocurren los gradientes mayores. Además, en las cinco superficies internas de la guarda se instaló un termistor en cada una de ellas de modo que sea posible observar el comportamiento de la temperatura en la superficie interna tanto del muro de estudio como de la guarda.

Celda experimental con muro de bloques y concreto: en este caso solo hay un sensor de temperatura y humedad relativa en el interior del muro puesto que está reportado que la permeabilidad al vapor de agua del concreto comparada con la de la tierra puede ser hasta más de 10 veces menor [83,84]. Por lo que, se considera que el gradiente de humedad es menos significativo que en el muro del material a base de la mezcla *pak'luum*. El sensor interno está en el punto medio central, el cual se encuentra dentro de una de las cavidades de un bloque. Asimismo se instaló un termistor sobre la superficie de la cara frontal y otro sobre la superficie de la cara posterior del muro a una profundidad de 0.002 ± 0.001 m. En el espacio interior de la

guarda se colocaron tres sensores de temperatura y humedad a la misma altura media central pero a 0.003 m, a 0.02 m de distancia desde la cara posterior del muro y otro en el centro de la celda. Se instaló también un termistor en cada una de las cinco superficies internas de la guarda a fin de observar el comportamiento de la temperatura en la superficie interna tanto del muro de estudio como de la guarda.

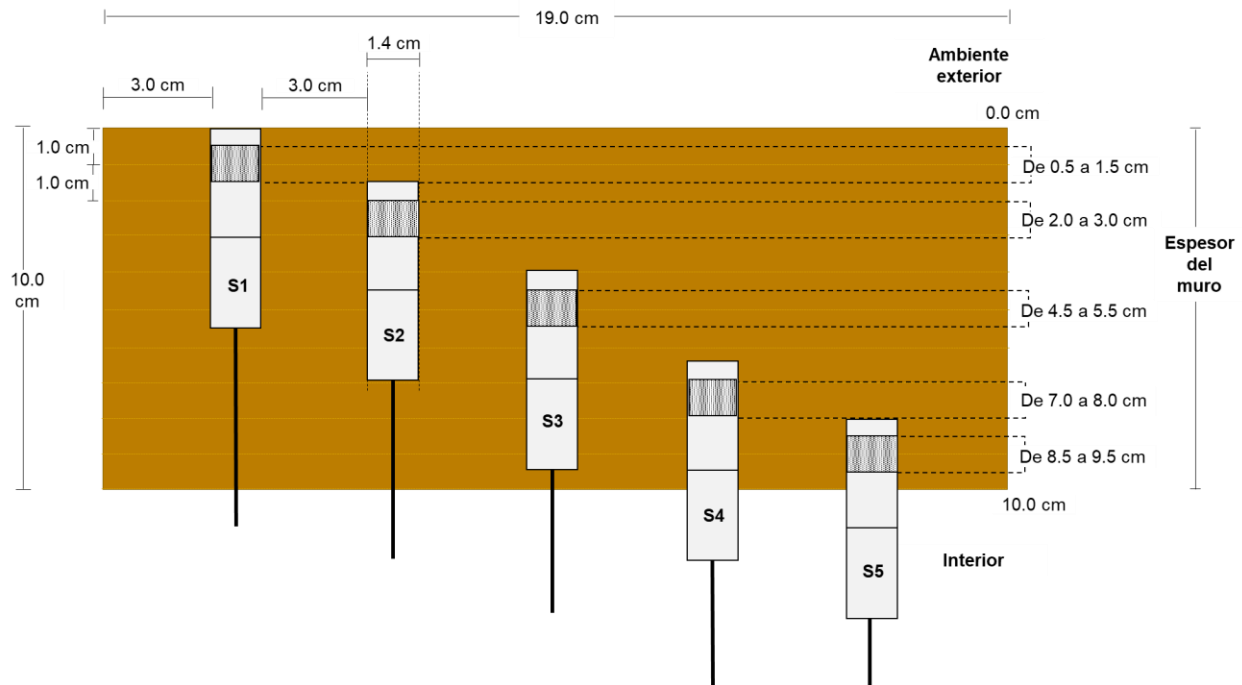


Figura 2.11 Distribución de los sensores de temperatura-HR dentro del muro del material a base de *pak'luum*.

Con la finalidad de monitorear la temperatura y humedad relativa de aire exterior en el sitio donde fue ubicado el arreglo experimental, se instaló un sensor de temperatura y humedad relativa dentro de un dispositivo construido para protegerlo de la lluvia y de la radiación solar y que comúnmente se le llama garita (Figura 2.12).



Figura 2.12 Garita con sensor de temperatura y humedad relativa.

Para la medición de la temperatura se utilizaron sensores de tipo RTD PT100 (de película delgada, clase A, rango de medición: -50 a 300°C, dimensiones de 0.0024 m x 0.0020 m). En cuanto a la medición de la humedad relativa se utilizaron los sensores SHT30 (rango de medición:

0-100%, precisión de $\pm 3\%$, diámetro de 0.014 m y longitud de 0.057 m) los cuales miden también la temperatura (rango de medición: -40 a 125°C y precisión de $\pm 0.3^\circ\text{C}$).

En la Figura 2.13 se muestra el proceso de ensamblaje de los termistores, el cual inició con la soldadura del termistor a un cable de datos con base en una técnica de medición de cuatro hilos (Figura 2.13.a). Como medida de protección por posibles daños que pudiera sufrir el sensor o la soldadura, se consideró incorporar una funda protectora cilíndrica de acero inoxidable como se observa en la Figura 2.13.b (previamente el sensor se cubrió con grasa conductora). Posteriormente se añadió un fragmento de thermofit para sellar la unión de la funda con el cable de datos (Figura 2.13.c).

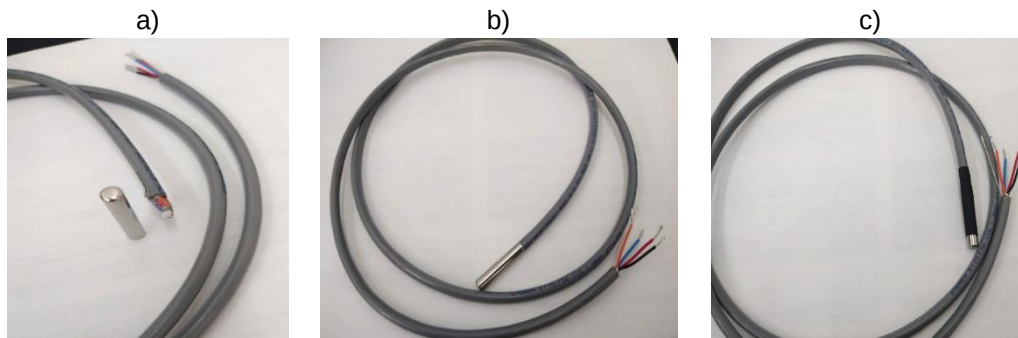


Figura 2.13 Sensor de temperatura: a) soldado al cable de datos, b) acoplamiento de funda protectora, y c) sellado con thermofit.

Los sensores de temperatura y humedad elegidos son los SHT30 (marca Sensirion), los cuales se pueden encontrar comercialmente con una funda protectora metálica, porosa y resistente al agua (ver Figura 2.14.a); características que influyeron en su selección puesto que, algunos de estos sensores estarán inmersos en el muro del material a base de la mezcla *pak'luum* por lo que deben resistir condiciones de alta humedad y evitar su colapso. En la Figura 2.14.b se muestran las dimensiones del sensor. Obsérvese que la superficie porosa mide 0.03 m, sin embargo, como el interés es analizar el gradiente de humedad se dejó una superficie de sensado de 0.01 m, lo demás fue sellado. El sensor tiene incluido su cable de datos pero sin blindaje por lo que se tomaron algunas medidas a fin de reducir la posible señal de ruido que pudiera afectar la lectura de dichos sensores. Esto consistió en revestir el cable de datos con una cinta de aluminio (Figura 2.14.c) y posteriormente se añadió un cable de cobre estañado calibre 22 en forma de espiral a lo largo del cable y finalmente se cubrió con thermofit (Figura 2.14.d). Estos sensores con funda protectora metálica fueron utilizados para instrumentar la celda experimental del material de tierra y el muro de bloques huecos de concreto, sin embargo para el ambiente interior de la celda experimental de referencia fue utilizado el mismo tipo de sensor (SHT30) pero con una funda

protectora de polietileno. Debido que al adquirirlo no incluía cable de datos, le fue soldado un cable basado en una técnica de medición de cuatro hilos. En la Figura 2.15 se muestra dicho sensor con el cable de datos instalado.

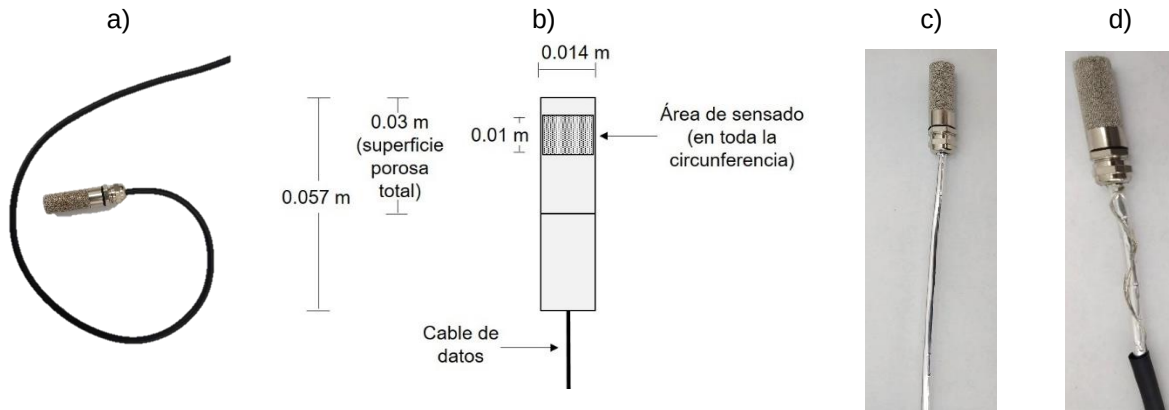


Figura 2.14 Sensor de temperatura y humedad relativa con funda metálica: a) cable de datos incluido sin blindaje, b) dimensiones y área de sensado, c) recubrimiento del cable con cinta de aluminio, y d) enrollado de cable estañado y recubrimiento con thermofit.



Figura 2.15 Sensor de temperatura y humedad relativa con funda de polietileno.

La recolección y monitoreo de los datos obtenidos por los sensores se trata de un sistema autónomo y propio del proyecto. Los equipos de adquisición de datos comerciales necesitan el uso de un sistema de cómputo para el registro y almacenamiento de la información, además de que el número de canales es limitado y va de acuerdo al costo los cuales son elevados. Mientras que, el sistema construido para este proyecto tiene la capacidad de leer, registrar, almacenar y permitir la visualización en sitio y remota de la información en tiempo real a un costo significativamente menor que los equipos comerciales y, además, tiene la flexibilidad de incluir el número de canales que se requieran sin incrementar significativamente el costo. El diseño y construcción de este sistema estuvo a cargo del departamento de Instrumentación que se encuentra en el Centro de Investigación Científica de Yucatán. Su funcionamiento y operación se puede resumir como sigue: su proceso operativo inicia con las tarjetas de adquisición de datos, una de ellas se encarga de leer y procesar la señal analógica, en el caso de los RTD PT100, y la

otra de la lectura de los sensores digitales (en el caso de los sensores de temperatura y humedad SHT30). Seguidamente los datos son trasferidos a una tarjeta encargada de almacenar y visualizar en tiempo real la información mediante una unidad micro SD, una pantalla y un teclado. Además mediante señal inalámbrica de internet los datos son enviados al Drive de Google. Cada celda experimental cuenta con sus tarjetas de adquisición y su tarjeta de almacenamiento. En el Anexo D se muestran las placas de circuito impreso las cuales fueron la plataforma base para la construcción de las tarjetas electrónicas. En la Figura 2.16.a, Figura 2.16.b y Figura 2.16.c se muestran los dos pares de tarjetas de adquisición de datos con todos los componentes ensamblados para cada una de las celdas experimentales. Se puede observar también que los sensores se encuentran conectados. Teniendo en cuenta que este sistema funciona en condiciones ambientales externas, fue necesario el uso de gabinetes dentro de los cuales se pudieran proteger estas tarjetas a fin de evitar daños físicos que afectasen su operación. Por lo que se construyeron unos gabinetes con tubería de PVC de 4 pg con sus respectivos coples y tapas; en estas últimas se instalaron conectores de nailon con cierre en rosca (para un cierre hermético) para la entrada y salida de los cables de los sensores (Figura 2.16.d).

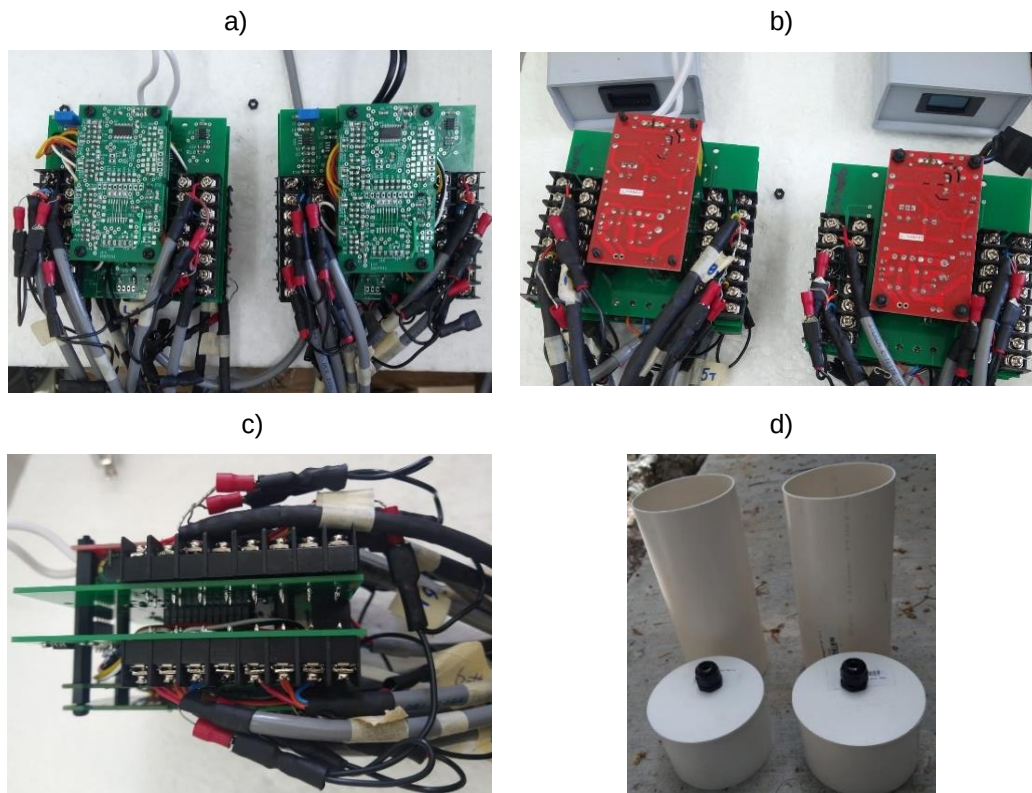


Figura 2.16 Tarjetas de adquisición de datos; a) tarjeta para la lectura de sensores analógicos y el convertidor analógico-digital, b) tarjeta para la lectura de sensores digitales y fuente de alimentación, c) vista lateral de ambas tarjetas ensambladas, y d) gabinetes para las tarjetas de adquisición de datos.

Por otra parte, en la Figura 2.17 se puede observar una de las tarjetas de almacenamiento de datos. Estas tarjetas cuentan con una pantalla digital y un teclado para la visualización en tiempo real de las mediciones de temperatura y humedad de todos los sensores. Como se ha mencionado anteriormente, los datos son enviados al Drive de Google y además son guardados en una unidad micro SD.

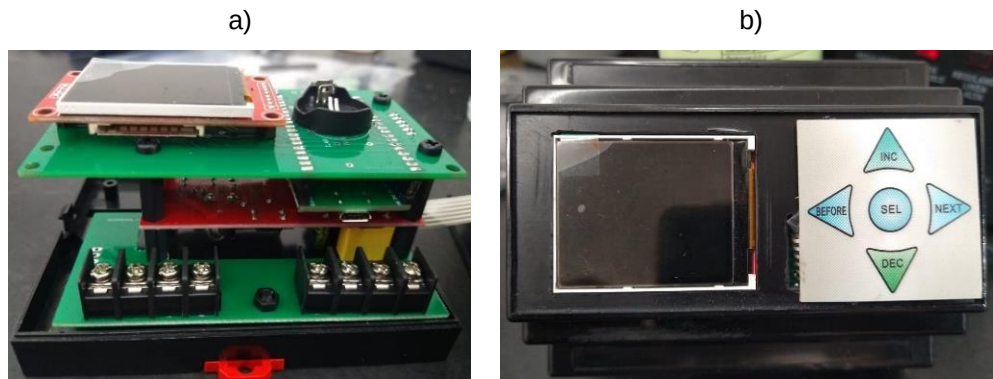


Figura 2.17 Tarjetas de almacenamiento de datos: a) componentes ensamblados, b) pantalla digital y teclado.

Calibración de los sensores de temperatura y de humedad

Como se ha mencionado anteriormente los sensores de temperatura son los RTD PT100 cuyas especificaciones técnicas mencionan que fueron construidos de acuerdo a la norma DIN EN 60751. De un total de 15 sensores fueron seleccionados aleatoriamente cinco de ellos con la finalidad de calibrar 6 puntos de temperatura cuyos valores se considera representan el rango de temperaturas que pueden alcanzarse en la aplicación experimental. Se utilizó un baño de circulación refrigerado PolyScience SD07R-20-A11B (rango de temperatura -20 a 170°C , estabilidad $\pm 0.04^{\circ}\text{C}$) y un multímetro Fluke 287 True-RMS (rango/resolución $500.00\ \Omega$). En la Tabla 2.4 se muestran los valores de resistencia reportados en la norma DIN EN 60751 y los valores promedio obtenidos durante la calibración para cada temperatura analizada. En la Figura 2.18 se muestra gráficamente la relación obtenida de la resistencia medida vs temperatura y el modelo de ajuste correspondiente que, como puede observarse mostró un comportamiento totalmente lineal ($R^2=1$). La ecuación obtenida es necesaria para su uso en la configuración o programación de los termistores (procesamiento de las lecturas).

Tabla 2.4 Calibración de los sensores de temperatura.

Temperatura (°C)	Resistencia (ohm) de acuerdo a DIN EN 60751	Resistencia (ohm) medida
10	103.90	104.03
20	107.79	107.86
30	111.67	111.70
40	115.54	115.53
50	119.40	119.39
70	127.08	127.20

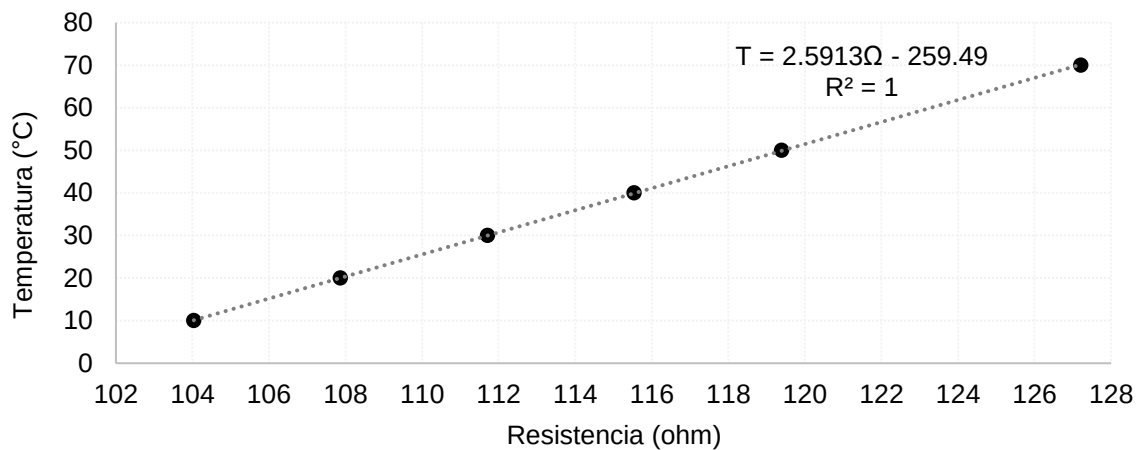


Figura 2.18 Relación resistencia vs temperatura obtenida de la calibración de los sensores de temperatura.

La calibración de la temperatura y humedad relativa de los sensores digitales se realizó simultáneamente. Para ello, los sensores se colocaron dentro de un recipiente hermético cubierto con placas de poliestireno de 1 ½ pg cuyo ambiente interior mantenía cierta humedad relativa mediante el uso de soluciones salinas saturadas. Este arreglo se encontraba en un ambiente a temperatura constante de 25°C. Con la finalidad de cuantificar las posibles diferencias entre las lecturas de temperatura de los sensores digitales (sensores de temperatura-humedad relativa) y de los sensores analógicos (termistores), estos últimos se agregaron al recipiente de prueba. La calibración se realizó para cinco valores de humedad relativa con un periodo de prueba de 24 h para cada uno. En la Tabla 2.5 se muestran los factores o ecuaciones de corrección determinados con base al análisis de resultados y definidos de acuerdo a rangos de humedad relativa. Se observa también la ecuación general para obtener el valor corregido de la humedad relativa (indicado con el término HR_c) a partir de la lectura directa del sensor (indicado con el término HR_r) y del factor de corrección (indicado con el término FC). A partir de la curva de tolerancia reportada por el fabricante y principalmente a los resultados de la calibración realizada, se identificó que las

lecturas en un ambiente con una humedad relativa constante menor a 5% mostraron generalmente valores 5% mayores. En este caso el factor de corrección aplicable a la lectura del sensor sería -5%. Sin embargo, usar este factor de corrección causaría valores negativos. Como solución se estableció que, en caso de que la lectura directa de humedad relativa del sensor sea menor a 5%, la humedad corregida será igual a 1% ($HR_c = 1\%$ si $HR_r < 5\%$). En caso de que la lectura directa de humedad relativa del sensor o el valor de la humedad corregida sea mayor a 99%, la humedad corregida será igual a 99% ($HR_c = 99\%$ si HR_r o $HR_c > 99\%$). Esto implica que el valor máximo de humedad relativa, 100%, será visualizado como 99%, esto ha sido establecido por cuestiones de conveniencia de la codificación. Este conjunto de rangos de humedad relativa con sus respectivos factores de corrección fueron ingresados en el código de programación de las tarjetas de adquisición de datos. De tal manera que los datos almacenados y visualizados correspondan a los valores corregidos (HR_c).

Tabla 2.5 Factores de corrección obtenidos de la calibración de los sensores de humedad.

Rango de HR	Factor o ecuación de corrección (F_c)
$5\% \geq HR_r \leq 57\%$	$F_c = -5.00$
$57\% > HR_r \leq 74\%$	$F_c = (0.1765 * HR_r) - 15.059$
$74\% > HR_r \leq 79\%$	$F_c = (0.80 * HR_r) - 61.20$
$79\% > HR_r \leq 87\%$	$F_c = (0.375 * HR_r) - 27.625$
$87\% > HR_r \leq 99\%$	$F_c = 5.00$
$HR_c = HR_r + F_c$	

Los factores de corrección obtenidos para los rangos que abarcan desde 57 a 95% de humedad relativa están dentro de la tolerancia que reporta el fabricante (Figura 2.19). Sin embargo, nótese que para el rango de 10 a 57% de humedad relativa, el factor de corrección propuesto (5%) es ligeramente mayor a la tolerancia máxima dada por el fabricante (4.5%). En el caso de valores de 0 a 5% y de 95 a 100%, el fabricante muestra valores de tolerancia de ± 3.5 a $\pm 7.5\%$, respectivamente. Sin embargo, los factores de corrección propuestos para esos rangos fueron definidos buscando que los valores corregidos (HR_c) estuvieran dentro de la escala estándar de humedad relativa (de 0 a 100%).

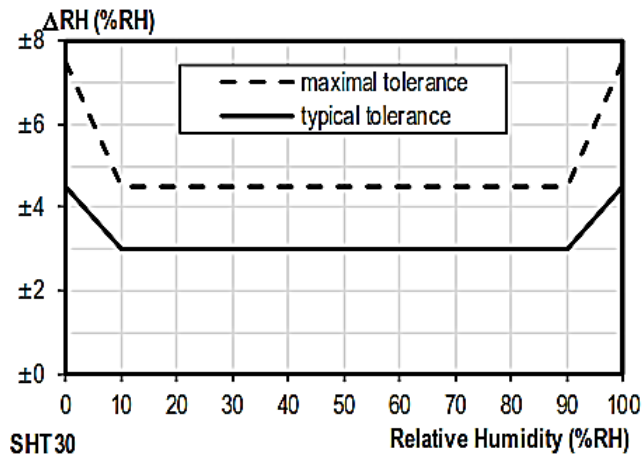


Figura 2.19 Curva de tolerancia de los sensores de humedad reportada por los fabricantes [85].

En cuanto a la comparación de las lecturas de temperatura entre los termistores y los sensores digitales de temperatura-humedad relativa, se observó que generalmente la lectura de los sensores digitales fue mayor que la de los termistores, pero estas diferencias estuvieron entre 0.01 y 0.54°C y con mayor frecuencia entre 0.10 y 0.30°C. Por lo que se decidió no aplicar factores de corrección para las mediciones de temperatura.

2.3.3 Construcción de las celdas experimentales.

Una vez finalizada la propuesta de diseño y definida las dimensiones del arreglo experimental se continuó con la etapa de construcción. En la Figura 2.20.a se observa el aspecto inicial de los soportes metálicos puesto que fueron reutilizados de otro proyecto efectuado años atrás. La Figura 2.20.b muestra dichos soportes después de haber sido restaurados.

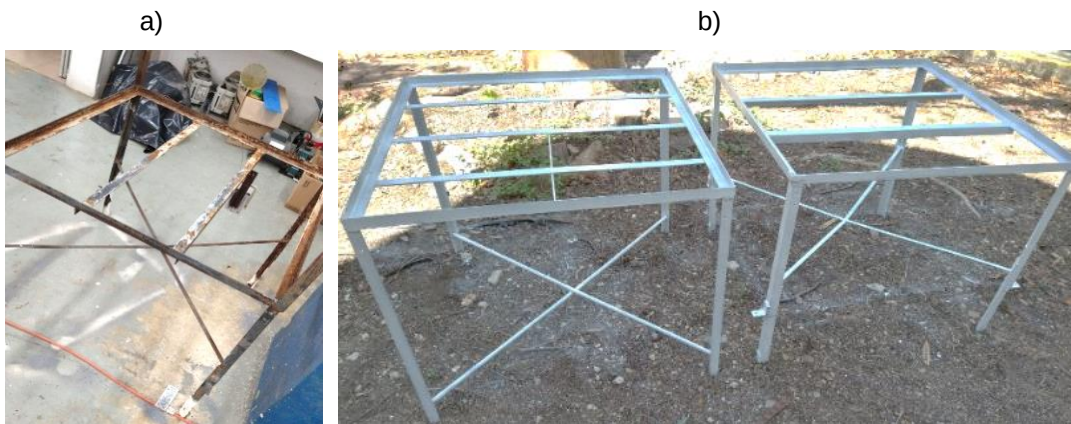


Figura 2.20 Soportes metálicos: a) estado inicial, y b) restaurado.

En la Figura 2.21.a se muestran los cortes de triplay y las barras de madera utilizados en la construcción de la capa exterior de la guarda. En la Figura 2.21.b se observa la envolvente exterior de la guarda ya construida a la cual se le ha aplicado un impermeabilizante color blanco como protección contra la absorción o filtraciones de agua en caso de lluvias, por ejemplo, puesto que como se ha mencionado esta capa exterior es de triplay. El uso de impermeabilizante también ayudó a sellar las uniones entre una cara y otra así como cualquier espacio que pudiera causar entrada de agua o de vapor, puesto que, de acuerdo a la finalidad de las pruebas a realizar, la hermeticidad del arreglo experimental es muy importante. Posteriormente se fueron colocando las dos capas internas de poliestireno extruido (Figura 2.21.c). En la Figura 2.21.d se muestran las dos guardas construidas y montadas en el soporte metálico correspondiente y en la Figura 2.21.e los marcos de madera para cada uno de los muros; obsérvese que a estos marcos también se les aplicó el mismo impermeabilizante utilizado para las capas externas de triplay.

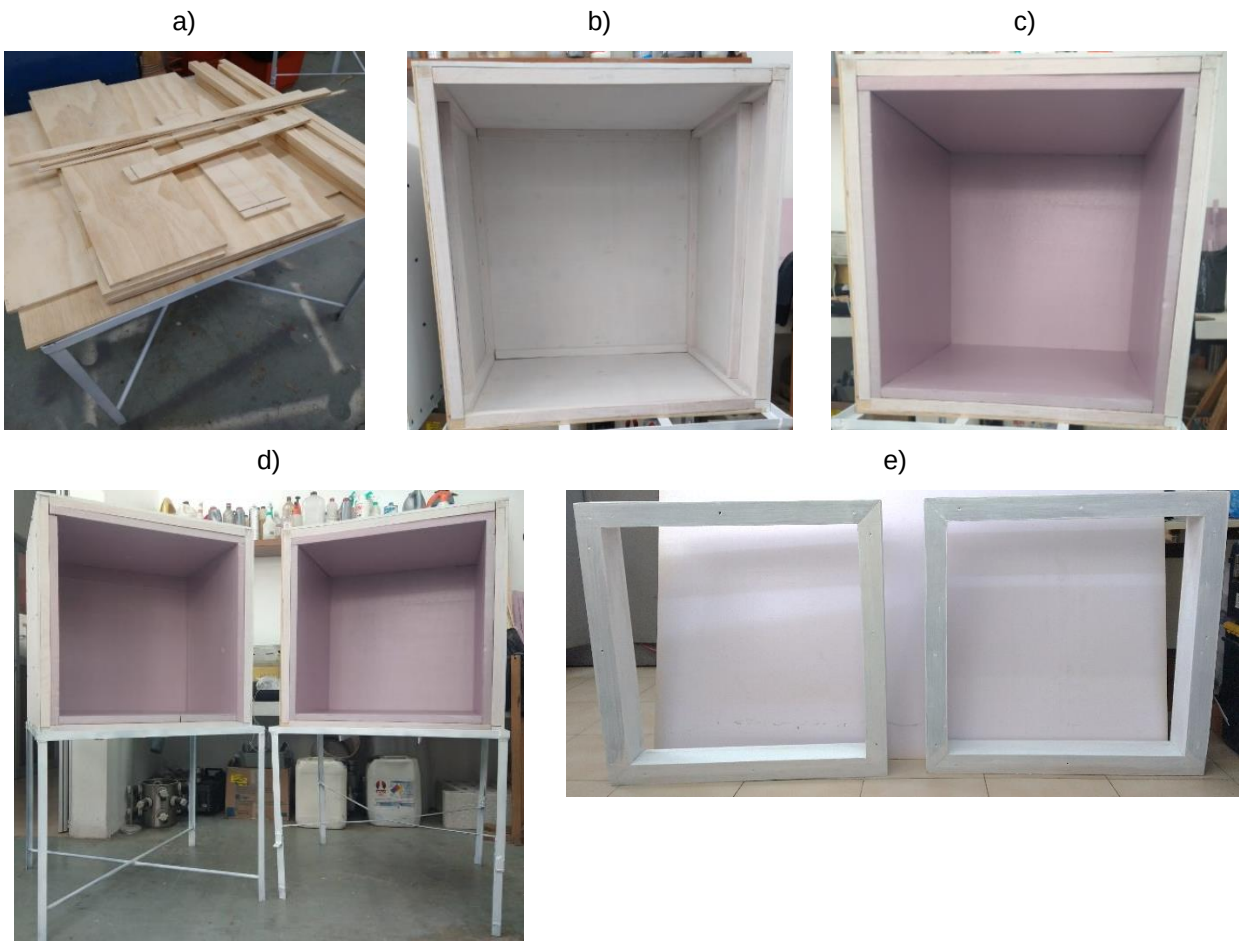


Figura 2.21 Construcción de las celdas experimentales: a) materiales para la estructura de la capa externa, b) estructura externa construida, c) guarda construida, d) celdas experimentales montadas en su soporte metálico, y e) marcos para la construcción de los muros.

Posteriormente con cada marco de madera se construyó el muro correspondiente. En la Figura 2.22 se muestra el proceso de construcción del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* el cual fue de forma manual y artesanal. La primera etapa consistió en ir rellinando el marco con la mezcla base o principal compuesta de tierra *kankab*, paja de trigo seca (longitud de 0.06 ± 0.01 m) y agua (previamente mezclados), al llegar a la altura media del marco, se colocaron los sensores de temperatura y humedad espaciados en el espesor del muro (~ 0.10 m). En la Figura 2.22.a, Figura 2.22.b y Figura 2.22.c se muestra el aspecto lateral, frontal y posterior del muro al finalizar su aplicación en el marco. Nótese la ubicación de los sensores inmersos de temperatura y humedad en la Figura 2.22.c. El muro se dejó secar a condiciones ambientales en un lugar sombreado alrededor de 15 días. Posteriormente se incorporó la capa de acabado de 0.002 ± 0.001 m compuesta de una mezcla de tierra *kankab*, paja de trigo seca (0.02 ± 0.01 m), arena y agua. En ese momento se colocó un termistor en el punto medio central de cada superficie del muro de modo que quedasen cubiertos por la capa de acabado. Nuevamente el muro se dejó secar a condiciones ambientales en un lugar sombreado alrededor de 4 días, tras lo cual se observó una separación de aproximadamente 0.002 m entre el material y el marco de madera debido a la contracción del material durante el secado. Por lo que en todos los bordes de ambas superficies (frontal y posterior) se colocó un sellador acrílico color blanco (Acrilastic®). En la Figura 2.22.d se muestra la apariencia frontal del muro con la capa de acabado y el sellador colocado en los bordes. La última etapa de preparación del muro consistió en pintar sus superficies con el recubrimiento de color blanco que es pintura para exteriores que es permeable al vapor de agua (Figura 2.22.e).

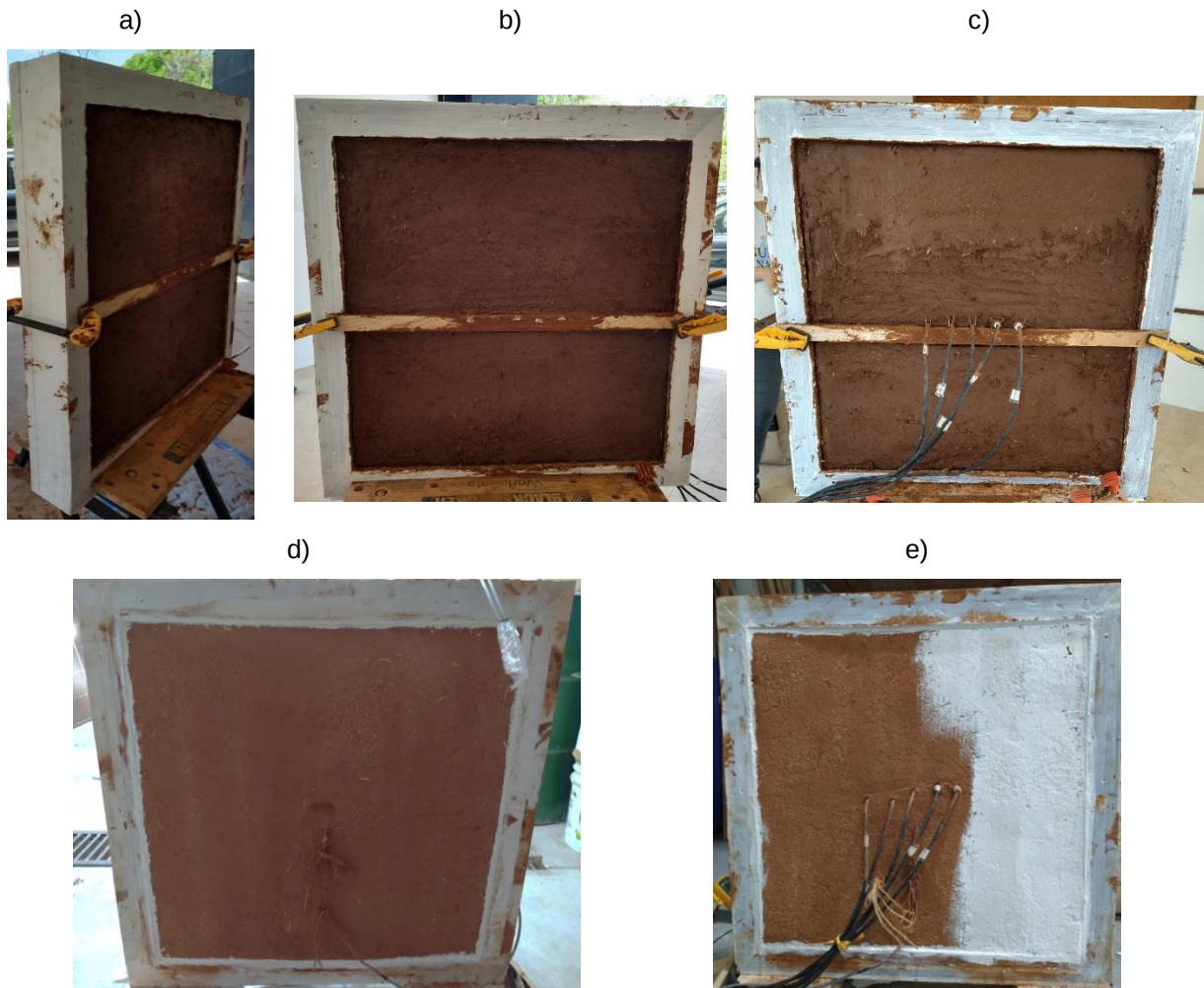


Figura 2.22 Construcción del muro de material de tierra; a) vista lateral con la mezcla base, b) vista frontal con la mezcla base, c) vista posterior con la mezcla base, d) vista frontal con capa de acabado y bordes sellados, y e) colocación de la pintura (vista de la cara posterior).

Para la construcción del muro de referencia se utilizaron bloques comerciales marca Mitza de $0.092 \times 0.197 \times 0.395$ m con tres huecos que, de acuerdo al fabricante son elaborados con concreto hidráulico vibrocomprimido y agregados. Los bloques fueron pegados entre sí con una mezcla de cemento, arena, grava y agua (Figura 2.23.a). Posteriormente sobre ambas caras del muro (superficie frontal y posterior) se incorporó un revoco de 0.004 m hecho con una mezcla de cemento, arena y agua y se aprovechó de colocar un termistor en el punto medio central de cada superficie del muro para que quedaran cubiertos por el revoco a una profundidad de 0.002 ± 0.001 m (Figura 2.23.b). Las propiedades termofísicas de los bloques huecos de concreto así como las del concreto se muestran en la Tabla 2.7. El muro se dejó secar a condiciones ambientales en un lugar sombreado durante 10 días. Junto al termistor colocado en la cara posterior del muro se hizo un orificio que permitiera la colocación de un sensor de temperatura y humedad en ese punto

medio central del muro que coincidía con una de las cavidades uno de los bloques. Después se pintaron ambas superficies del muro con la pintura para exteriores color blanco que es permeable al vapor de agua (Figura 2.23.c).

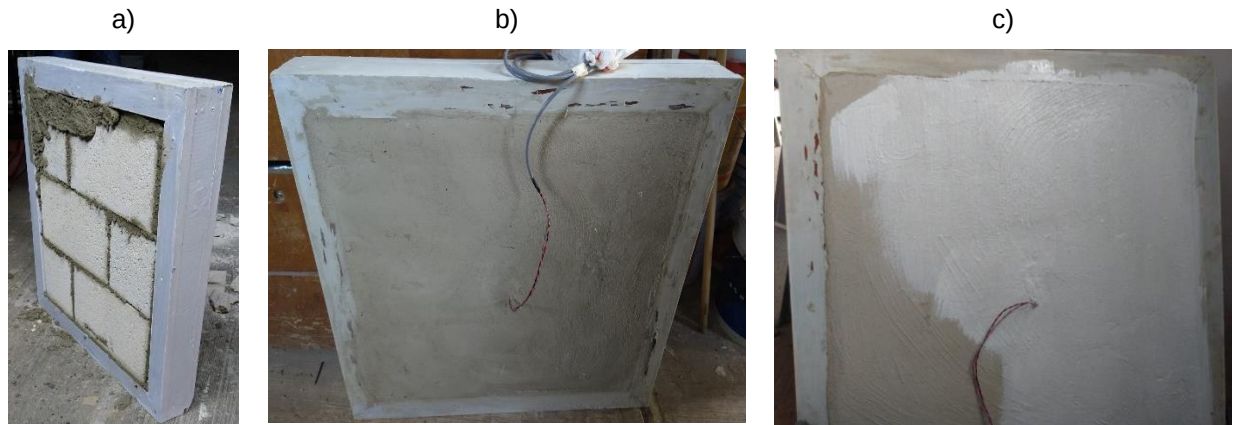


Figura 2.23 Construcción del muro de referencia; a) colocación y pegado de los bloques huecos de concreto, b) colocación del revoco y termistor, y c) colocación de la pintura.

Se instalaron los termistores y los sensores de temperatura-humedad relativa (Figura 2.24) en el interior de las guardas las cuales finalmente se acoplaron al muro y soporte correspondiente. En las uniones entre guarda y muro se colocó sellador acrílico e impermeabilizante a fin de mejorar la hermeticidad del interior. En la Figura 2.25 se muestra el montaje final del arreglo experimental. Los muros de estudio fueron orientados en dirección este para considerar principalmente, el efecto en el material de tierra de las primeras horas de la irradiancia solar en la humedad adsorbida durante la noche. De modo que, la evaporación de la humedad almacenada en el material (impulsada por la ganancia de calor por parte de la radiación solar), pudiese llevarse a cabo en las mañanas antes de que la humedad adsorbida en el material iniciara a liberarse debido a la disminución de la humedad en el ambiente exterior en las horas de sol posteriores y cuyo su valor más bajo es alcanzado durante los picos de temperatura. Además se observó que los vientos se mantienen generalmente constantes en la dirección este a una velocidad promedio mayormente entre 1 y 4 m s^{-1} (Anexo B). En la Figura 2.25 se puede observar también que entre las celdas experimentales se ubicó la garita construida para proteger los sensores de temperatura y de humedad relativa destinados a monitorear las condiciones de aire exterior.

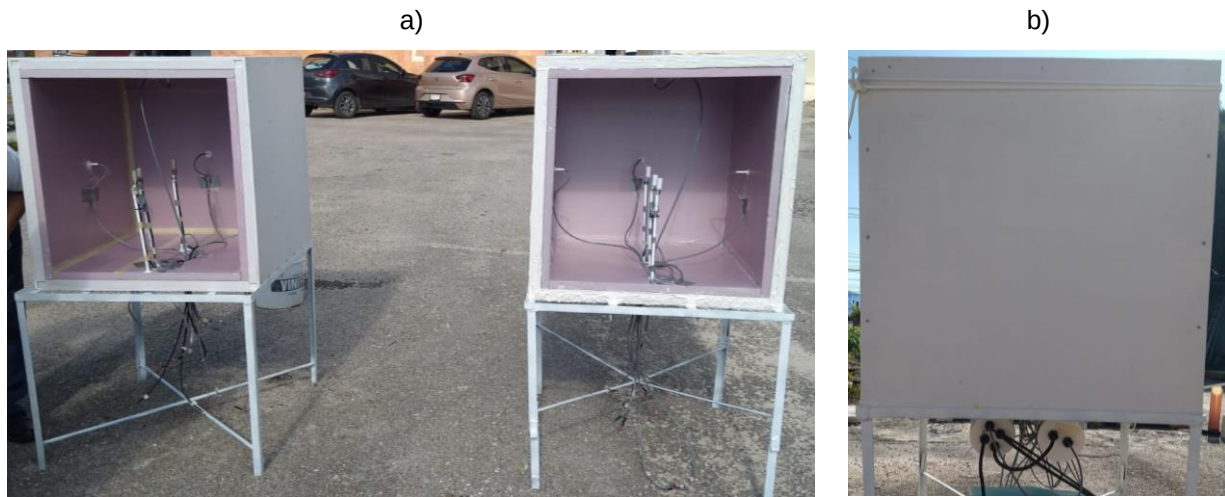


Figura 2.24 Instrumentación de las celdas experimentales; a) sensores de temperatura y humedad relativa en el ambiente interior, b) ubicación de los gabinetes para el sistema de adquisición de datos.



Figura 2.25 Montaje final del arreglo experimental.

La pintura impermeabilizante que cubre las caras aisladas de ambos módulos (Kover Pro Blanco), de acuerdo a datos del fabricante, tiene un valor de reflectancia de 0.78. Con el fin de reducir lo más posible la ganancia de calor por parte de la irradiancia solar en estas caras aisladas, se colocaron hojas de polietileno aluminizado (de 12 micrones de espesor) como se observa en la Figura 2.26. La pintura permeable al vapor aplicada en la superficie del muro del material a base

de la mezcla *pak'luum* y del muro de bloques huecos de concreto tiene un valor de reflectancia solar de 82.2%.



Figura 2.26 Celdas experimentales: caras aisladas con superficies aluminizadas.

2.3.4 Monitoreo del arreglo experimental.

Las variables ambientales de interés (temperatura, humedad relativa, radiación solar, velocidad y dirección del viento) fueron monitoreadas con las lecturas de una estación meteorológica (HOBO U30 Onset) (Figura 2.27). Las especificaciones de los sensores se muestran en la Tabla 2.6. La lectura de datos se realizó cada 10 s, sin embargo eran promediados para su almacenamiento cada 10 min. La estación meteorológica se ubicó a 4 m de distancia de las celdas experimentales. El monitoreo de datos inició en agosto de 2023 y concluyó el 25 de mayo de 2024. Sin embargo, los datos recolectados de agosto a noviembre de 2023 no son considerados en el análisis puesto que se han destinado como un periodo previo de estabilización de los muros con las condiciones ambientales. De tal manera que el análisis de los resultados solo abarca del 10 de diciembre de 2023 al 25 de mayo de 2024. Debido a la cantidad de datos registrados, para el análisis fue seleccionado un periodo de invierno y un periodo de primavera. A partir de las mediciones de las condiciones ambientales en tiempo real, se identificó que, uno de los periodos con los valores más bajos de temperatura de invierno (entre 26 y 30°C) fue del 29 de enero al 1 de febrero de 2024. Para la selección del periodo de primavera, se observó que, si bien en el mes de mayo se presentaron picos de temperatura mayores (entre 38-45°C) que en marzo (entre 38-42°C), los picos de humedad generalmente fueron de 80% en mayo y de 85-90% en marzo. Por lo que se consideró al mes de marzo como un periodo representativo de las condiciones más cálidas de la zona de estudio y de la temporada de primavera. De tal forma que, el segundo

periodo de análisis fue del 24 al 27 de marzo de 2024; en estos días la temperatura ambiente fue más alta comparada con el periodo de análisis mencionado anteriormente (del 29 de enero al 1 de febrero de 2024).



Figura 2.27 Estación meteorológica.

Tabla 2.6 Especificaciones de los sensores de la estación meteorológica.

Tipo de sensor	Modelo y marca	Especificaciones
Temperatura	S-THB-M002 Onset	Sensor de temperatura/HR. Rango de medición: -40°C a 75°C . Exactitud: $\pm 0.21^{\circ}\text{C}$ de 0° a 50°C . Resolución: 0.02°C en 25°C .
Humedad relativa	S-THB-M002 Onset	Sensor de temperatura/HR. Rango de medición: 0-100%. Exactitud: $\pm 2.5\%$ de 10% a 90%. $\pm 5\%$ para HR $< 10\%$ y HR $> 90\%$. Resolución: 0.1%.
Radiación solar	S-LIB-M003 Onset	Piranómetro de silicón. Rango de medición: 0 a 1280 W m^{-2} . Exactitud: $\pm 10 \text{ W m}^{-2}$ o $\pm 5\%$. Resolución: 1.25 W m^{-2} . Rango espectral: 300 to 1100 nm.
Velocidad del viento	S-WSA-M003 Onset	Rango de medición: 0 to 45 m s^{-1} . Exactitud: $\pm 1.1 \text{ m s}^{-1}$ o $\pm 4\%$ de lectura. Resolución: 0.38 m s^{-1} .
Dirección del viento	S-WDA-M003 Onset	Rango de medición: 0 a 355° . Exactitud: $\pm 5^{\circ}$. Resolución: 1.4° .

2.3.5 Escenario de análisis sobre confort higrotérmico.

Considerando por una parte que, el comportamiento térmico e higroscópico del material de estudio fue analizado en celdas experimentales a escala reducida y, por otra parte, que los resultados no fueron escalados para su equivalencia en una edificación real. Una alternativa que permitió visualizar el efecto acoplado de los resultados de la temperatura y de la humedad relativa obtenidos en el ambiente interior de las celdas experimentales fue el planteamiento de un escenario ficticio que consistió en suponer que en el interior de dos edificios cualesquiera (con las mismas características constructivas y dimensiones) se presentaron las condiciones de temperatura y humedad relativa obtenidas en el interior de las celdas experimentales. Sin embargo, es muy importante tener en cuenta que los resultados sobre el confort higrotérmico obtenidos de este escenario ficticio son también ficticios puesto que no corresponden a los resultados que se obtendrían en una edificación real. Dentro de los métodos que existen para determinar el confort higrotérmico se encuentra el Voto Medio Previsto o PMV (por sus siglas en inglés *Predicted Mean Vote*) [86] basado en estudios con cámaras en condiciones controladas. En este método se predice el valor medio de la sensación subjetiva de un grupo de personas en un ambiente específico tomando en cuenta el nivel metabólico y la vestimenta. La escala del PMV tiene un rango de sensación térmica de 7 puntos, desde - 3 (frío) a +3 (caliente), donde el 0 representa una sensación térmica neutra. Asimismo con el índice de Porcentaje de Personas Insatisfechas o PPD (por sus siglas en inglés *Predicted Percentage of Dissatisfied*) se puede predecir cuánta gente está insatisfecha en dicho ambiente [87]. Dentro de la información que se requiere para calcular estos valores se encuentran: temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, nivel metabólico y nivel de aislamiento térmico por la ropa de los ocupantes. Para el caso de estudio se estableció un nivel metabólico de 70 W m^{-2} el cual corresponde a la actividad sedentaria de vivienda, escuela u oficina. El nivel de aislamiento térmico por la ropa que se definió se muestra en la Tabla 2.7. Mediante una herramienta de cálculo disponible en línea [88] se estimó el PMV y el PPD. El procedimiento de cálculo se describe en la ISO 7730: “Ergonomía del entorno térmico: Determinación analítica e interpretación del bienestar térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y los criterios de bienestar térmico local” [89].

Las condiciones analizadas pertenecen a las mediciones de un periodo de diciembre y un periodo de enero. La Tabla 2.8 y la Tabla 2.9 muestran dichos valores que son los picos de temperatura y la humedad relativa en el momento de esos picos. Estos periodos fueron seleccionados debido a los límites de temperatura permitidos por el método.

Tabla 2.7 Aislamiento térmico por la ropa para el caso de estudio.

Prenda	Clo	$m^2 \text{ } ^\circ\text{C W}^{-1}$
Calzoncillos	0.04	0.006
Camisa manga corta	0.09	0.029
Pantalón normal	0.25	0.039
Calcetines	0.02	0.003
Zapato suela fina	0.02	0.003
Aislamiento total	0.42	0.08

Tabla 2.8 Temperatura y humedad relativa en un periodo de diciembre para el cálculo del PMV y PPD.

Día	Celda con muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i>		Celda con muro de bloques huecos de concreto	
	Temperatura* ($^\circ\text{C}$)	HR** (%)	Temperatura* ($^\circ\text{C}$)	HR** (%)
10	31.2	74.9	32.1	86.9
11	26.7	74.7	27.2	86.9
12	25.9	77.5	26.7	88.6
13	28.2	74.1	28.4	86.4
14	30.9	73.5	31.5	86.19
15	31.4	74.6	32.3	86.37
16	30.1	76.5	30.6	87.42
17	27.3	74.1	27.8	85.77
18	28.7	72.8	29.5	85.54
19	28.6	73.9	29.5	86.11
20	27.5	72.3	28.9	85.56
21	28.1	73.6	29.3	86.18
22	30.6	73.2	31.7	86.19
23	29.8	73.8	30.9	84.55

*Valor máximo (pico)

**Valor correspondiente al momento en que ocurre el pico de temperatura.

Tabla 2.9 Temperatura y humedad relativa en un periodo de enero para el cálculo del PMV y PPD.

Día	Celda con muro del material a base de la mezcla <i>pak'luum</i>		Celda con muro de bloques huecos de concreto	
	Temperatura* ($^\circ\text{C}$)	HR** (%)	Temperatura* ($^\circ\text{C}$)	HR** (%)
1	31.0	68.8	32.3	84.0
2	32.0	67.8	33.0	83.5
3	31.3	66.8	32.3	82.0
4	32.2	66.0	33.2	81.5
5	31.6	70.8	32.8	83.2
6	34.9	69.8	34.8	84.5
7	28.0	72.0	28.1	85.7
8	30.7	69.3	31.9	83.3
9	32.0	71.2	33.0	84.8
10	31.2	67.0	32.3	82.0
11	33.5	66.8	34.9	81.7
12	36.5	68.5	37.4	81.5
13	30.0	70.5	30.4	84.0

*Valor máximo (pico)

**Valor correspondiente al momento en que ocurre el pico de temperatura.

2.4 Etapa III: Análisis numérico de la transferencia de calor del material expuesto a las condiciones de aire exterior de un clima cálido sub-húmedo.

El comportamiento térmico de las celdas experimentales fue obtenido numéricamente con el uso del software libre EnergyPlus (versión 9.2.0) [90] el cual usa un algoritmo de elementos finitos. Este software ha sido utilizado en el análisis de materiales a base de tierra donde se ha obtenido la evolución en el tiempo de la temperatura del ambiente interior de un recinto a partir de la densidad, la conductividad térmica y el calor específico del material [18]. Estas propiedades fueron las que se obtuvieron en la etapa de caracterización del material a nivel laboratorio.

La simulación se realizó con la finalidad de extender a un año completo el análisis de los resultados obtenidos experimentalmente (10 de diciembre de 2023 al 25 de mayo de 2024). Si bien el modelo físico simulado presenta la misma geometría, dimensiones y materiales de las celdas experimentales reales así como los elementos de sombreado circundantes, es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos numéricamente solo contemplaron las ganancias y pérdidas de energía causadas por la transferencia de calor. En el caso de la celda con el muro de bloques huecos de concreto, estos resultados obtenidos considerando solo el comportamiento térmico y no la transferencia y almacenamiento de humedad podrían, bajo un análisis cuidadoso y con base a la baja permeabilidad del concreto, ser aceptados como válidos. Mientras que, los resultados obtenidos para la celda con el muro del material a base de la mezcla *pak'luum* pudieran tener una variación mayor debido a que como se mencionó, la solución del modelo no consideró el efecto de la transferencia y almacenamiento de humedad cuyo efecto podría ser significativo en el material de tierra dada su característica higroscópica. No obstante, se estima que para las características del caso de estudio (especialmente para el valor alto de reflectancia solar del muro del material a base de la mezcla *pak'luum*) esta variación no es de gran magnitud puesto que en el análisis experimental se observó que el transporte de humedad a través del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* tuvo un impacto mayor en el comportamiento de la humedad relativa del ambiente interior y no así en la temperatura de dicho ambiente.

El modelo físico corresponde a una geometría tridimensional sobre el plano x-y-z y presenta las dimensiones, características y orientación de las celdas experimentales construidas, así como los elementos de sombreado más cercanos. Para las condiciones de frontera (de Robin o de tercer tipo) se utilizó una base de datos climáticos de la ciudad de Mérida. Se consideró un flujo de infiltración por área de superficie exterior de 0.003 m s^{-1} . La Tabla 2.10 contiene los valores de las propiedades termofísicas de los materiales involucrados y que fueron utilizados como datos de entrada en el software. Para este estudio se consideró que los materiales de ambas celdas

son homogéneos e isotrópicos, que la densidad, la conductividad térmica y el calor específico son valores constantes. Debido a que EnergyPlus no resuelve sistemas constructivos no homogéneos, para el caso de los bloques huecos de concreto, se utilizó un valor de conductividad térmica estimado a partir de un valor de resistencia térmica reportado (Tabla 2.10). Para la conductividad térmica del material de tierra, influenciada por la temperatura y el contenido de humedad, se utilizó un valor constante. Esta decisión se basó en un estudio previo sobre el efecto de la conductividad térmica en el comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas. Este estudio previo consistió en analizar para el mes de diciembre y el mes de mayo, dos valores de conductividad térmica (para cada mes), los cuales correspondían a los valores promedio considerando el efecto de la temperatura y del contenido de humedad del muro durante cada mes (resultantes del monitoreo). Fueron seleccionados estos dos meses porque son aquellos que presentaron las diferencias mayores en las condiciones de temperatura y contenido de humedad dentro del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* durante el periodo de análisis de datos (diciembre de 2023 a mayo de 2024). Para el mes de diciembre, los valores de conductividad térmica analizados fueron 0.254 y 0.275 W m⁻¹°C⁻¹. La diferencia máxima entre los resultados de las simulaciones realizadas con cada valor fue de 0.05°C. Para el mes de mayo, los valores analizados fueron 0.250 y 0.282 W m⁻¹°C⁻¹.

La diferencia máxima entre los resultados de ambas simulaciones fue de 0.04°C. Por lo tanto, se decidió utilizar a 0.282 W m⁻¹°C⁻¹ como un valor representativo de la conductividad térmica del muro del material a base de la mezcla *pak'luum*.

Tabla 2.10 Propiedades termofísicas de los materiales de construcción de las celdas experimentales.

Propiedad	Espesor (m)	Densidad (kg m ⁻³)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Calor específico (J kg ⁻¹ °C ⁻¹)	Absortancia solar (-)
Concreto	0.010	1800 ^a	1.350 ^a	1000 ^a	0.2 ^b
Bloque hueco de concreto	0.090	790 ^c	0.560 ^d	1000 ^e	0.7 ^f
Material a base de la mezcla <i>pak'luum</i>	0.100	1156 ^g	0.282 ^g	1460 ^g	0.2 ^b
Triplay	0.009	700 ^h	0.150 ^h	1420 ^h	0.2 ⁱ
Foamular®	0.054	25 ^j	0.0280 ^j	1450 ^k	-

^a Valor reportado en [91].

^b Valor de la pintura permeable al vapor de agua cuyo valor fue proporcionado por el fabricante (ver Anexo A).

^c Valor estimado con datos de la masa y volumen proporcionados por el fabricante [92].

^d Valor estimado a partir del valor de resistencia térmica reportado en [93].

^e Valor estimado al partir del rango de valores reportado en [94].

^f Valor reportado en [95].

^g Valores obtenidos en este trabajo.

^h Valor reportado en [96].

ⁱ Valor correspondiente a la pintura impermeabilizante cuyo valor fue proporcionado por el fabricante (ver Anexo A).

^j Valor reportado por fabricante [97].

^k Valor estimado a partir de los valores reportados en [98–100].

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Composición mineralógica y distribución granulométrica.

A partir de la manipulación y análisis de un conjunto de datos de difracción de rayos X de minerales de referencia (minerales que comúnmente se encuentran en materiales a base de tierra o muestras de suelo) y del difractograma obtenido de las cuatro muestras de suelo *kankab* recolectadas, se encontró en todas las muestras la presencia principalmente de caolinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$), cuarzo (SiO_2), hematita (Fe_2O_3) y goetita (FeO_2H) como se observa en la Figura 3.1. En la muestra de Mérida se encontró también anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

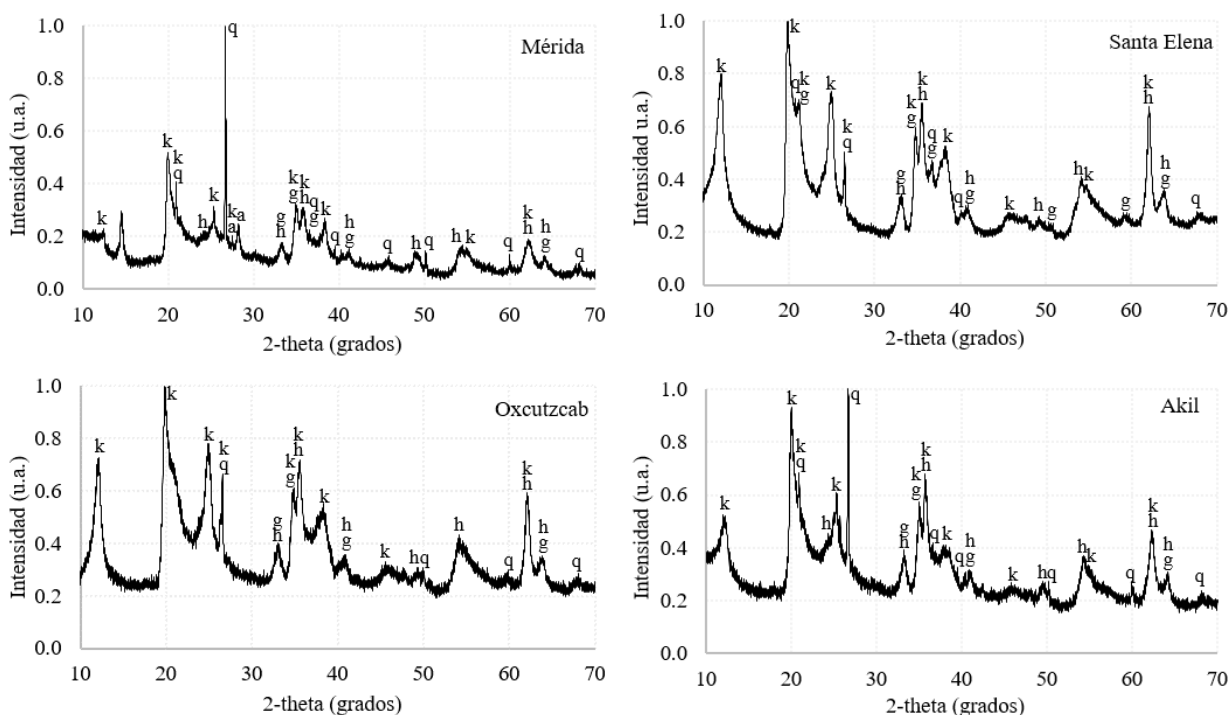


Figura 3.1 Difractograma de rayos-X de las muestras de tierra analizadas: k (caolinita), q (cuarzo), h (hematita), g (goetita) y a (anortita).

Los grupos de minerales de arcilla como la caolinita tienen generalmente una alta afinidad a las moléculas de agua la cual a su vez puede ser mayor o menor dependiendo del mineral arcilloso. Por ejemplo, la montmorillonita (otro grupo de mineral arcilloso) tiene un área superficial mayor de adsorción de moléculas de agua debido a su espacio interlamilar activo. Sin embargo, esta característica incrementa la histéresis de sorción de vapor de agua del material [56] y su respuesta expansiva, los cuales son comportamientos no favorables para uso constructivo en lugares con altos niveles de humedad. En cambio, la respuesta de contracción-hinchamiento de

la caolinita es baja. Para ambientes de alta humedad lo conveniente es que el material amortiguador tenga una adecuada capacidad de adsorción, y también de desorción para que su capacidad de almacenamiento esté disponible para el siguiente periodo de niveles altos de humedad (por ejemplo, diariamente). El comportamiento de la histéresis del material será abordado en la sección de las isothermas de sorción, puesto que las curvas de adsorción y desorción ayudan a identificar la presencia de histéresis en el material.

La composición granulométrica de las muestras de suelo *kankab* recolectadas en la periferia de la ciudad de Mérida, en Akil, en Oxkutzcab y en Santa Elena se representa gráficamente en la Figura 3.2. Para las cuatro muestras el porcentaje mayoritario, 74-81%, fue arena. Sin embargo, como se puede observar, se trata principalmente de arena fina. El porcentaje restante, 19-26%, fue limo y arcilla. La tierra recolectada en la periferia de Mérida mostró el mayor contenido de limo (26%), las muestras de Oxkutzcab y Akil presentaron valores muy cercanos (15 y 14%), y Santa Elena el contenido más bajo (6%). En cuanto al contenido de arcilla, en orden descendente se encontraron las muestras colectadas en Santa Elena (15%), Mérida (6%), Oxkutzcab (5%) y Akil (4%). En la Tabla 3.1 se presentan los valores obtenidos de gravedad específica que fueron utilizados para determinar a partir de la fracción de partículas finas el porcentaje de arcilla y el porcentaje de limo.

León-Arteta, 1991 [101] presenta dos análisis de perfil de k'an-k'ab por horizontes de muestras recolectadas en los suelos del estado de Yucatán. En el primero de ellos se muestran porcentajes de arena, limo y arcilla de 8-27%, 10-29% y 44-82%, respectivamente, de acuerdo al horizonte genético. En el segundo análisis se reportan porcentajes de arena, limo y arcilla para este mismo tipo de tierra de 7-12%, 13-63% y 24-78%, respectivamente. Por otra parte, en el trabajo de González y Vega, 2002 [102] se presenta el análisis granulométrico realizado a una muestra de suelo nombrada como *kancab*, donde se observa un 87% de arena y 13% de finos (limo y arcilla). Inicialmente se puede observar que la composición granulométrica del *kankab* presentada en ambos trabajos es diferente, en el primer caso el mayor porcentaje es arcilla y en el segundo el mayor porcentaje es arena. En el caso de los resultados obtenidos para las muestras de tierra analizadas se observa que son más cercanos a los valores reportados por González y Vega, 2002 [102]. Estos resultados obtenidos son consistentes con las proporciones recomendadas para las técnicas de construcción con tierra apisonada o compactada, esto es, 30-80% arena, 10-30% limo y 5-35% arcilla [103]. Para la construcción con tierra cruda, es fundamental el contenido de arena, limo y arcilla del suelo así como una proporción adecuada de cada uno de ellos.

Cualquiera que sea la técnica constructiva, el contenido de arcilla es indispensable debido a sus propiedades aglutinantes.

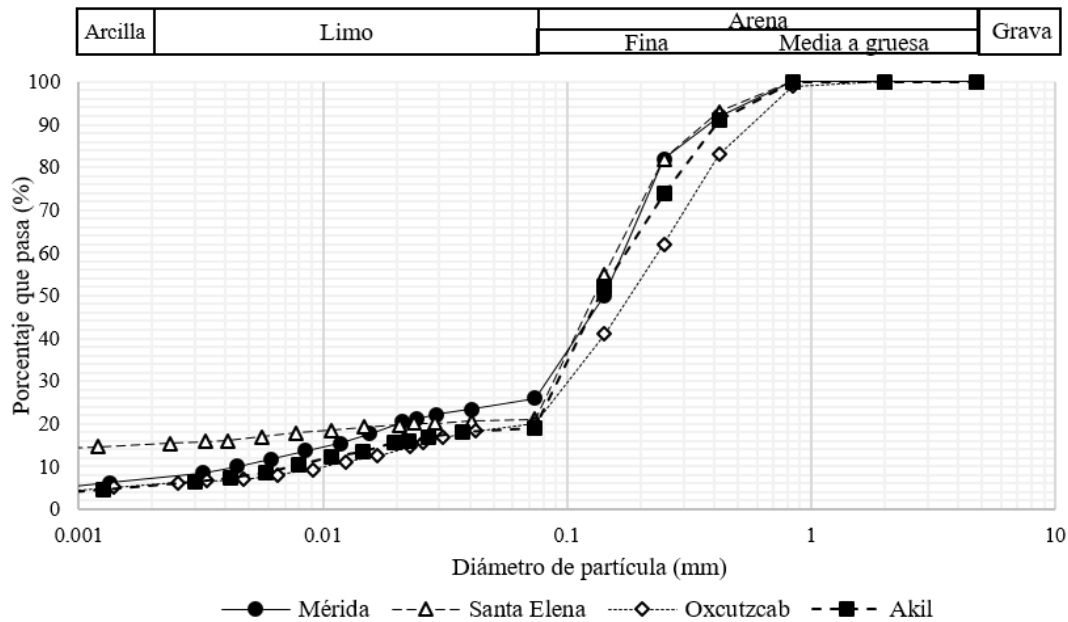


Figura 3.2 Curva de distribución granulométrica de las muestras de tierra recolectadas.

Tabla 3.1 Valores de la gravedad específica de las muestras de tierra.

Muestra	Gravedad específica	Error (%)
Mérida	2.28	1.87
Santa Elena	2.21	0.78
Oxcutzcab	2.10	1.12
Akil	2.52	0.75

3.2 Propiedades termofísicas.

Los resultados y valores de incertidumbre obtenidos de la densidad aparente se resumen en la Tabla 3.2, donde se puede observar un valor promedio de $1061.32 \pm 23.8 \text{ kg m}^{-3}$ y $1156.35 \pm 28.5 \text{ kg m}^{-3}$ para el material sin y con capa de acabado, respectivamente. Entre los resultados para el caso del material sin capa de acabado se pueden observar diferencias de hasta 5% entre el resultado de cada muestra y el valor promedio. Para el caso del material con la capa de acabado la máxima diferencia entre el resultado de cada muestra y el valor promedio fue de 2%. Se considera que, las diferencias, fueron causadas por variaciones en el volumen y en la masa de la muestra seca. El proceso de elaboración de las muestras es manual y empírico, lo cual implica que el procedimiento no sigue un control estricto en la fuerza de compactación o el contenido de cada componente de la mezcla (el criterio se basa en proporción por volumen).

Los valores típicos reportados sobre la densidad de la tierra apisonada o compactada están entre 1700-2200 kg m⁻³. En los casos de tierra arcillosa con paja o fibra estos valores están entre 1400-1600 kg m⁻³ [5,13]. Sin embargo, en estas referencias no se menciona la proporción de fibra agregada. En el trabajo de Laborel-Préneron et al. [79] se reportan densidades de 1537 ± 5 y 1100 ± 49 kg m⁻³ para una tierra compactada con 3 y 6% fracción masa de paja, respectivamente. Estos resultados son muy cercanos a la densidad obtenida del material de estudio sin y con acabado (1061 ± 24 kg m⁻³ y 1156.35 ± 28.5 kg m⁻³). Se considera que el tipo de tierra (arcillosa, limosa, arenosa) y la fuerza de compactación influyen en la diferencia de los resultados a pesar de tener valores cercanos de contenido en masa de paja (la proporción en masa de la paja en el material de estudio es ~3%). Comparado con materiales convencionales como el ladrillo rojo recocido (sólido o hueco), los bloques de concreto o el concreto, el valor de densidad del material de estudio es menor (ver Anexo C).

Tabla 3.2 Valores de densidad aparente e incertidumbre del material sin y con acabado.

Muestra	Masa (kg)	Volumen (m ³)	Incertidumbre (%)	Densidad (kg m ⁻³)
1	3.022	0.002718	1.810	1111.86 ± 20.12
2	3.077	0.002982	2.663	1031.75 ± 27.48
3	3.041	0.002923	2.291	1040.35 ± 23.83
1-ac*	3.733	0.003152	1.976	1184.09 ± 23.40
2-ac	3.740	0.003269	2.860	1144.13 ± 32.72
3-ac	3.736	0.003275	2.570	1140.82 ± 29.32

*-ac indica material con capa de acabado.

La conductividad térmica del material sin y con capa de acabado, se determinó a partir de mediciones realizadas a tres muestras (previamente secadas bajo el mismo proceso descrito en la sección de densidad aparente) con tres repeticiones para cada una de ellas. Las características de las pruebas, así como sus resultados y análisis de incertidumbre (más detalles en el Anexo EAnexo F) se resumen en la Tabla 3.3 y Tabla 3.4, asimismo pueden observarse en la Figura 3.3. La duración de las pruebas fue de 20-22 h y el estado estacionario se alcanzó 14-16 h después de haber iniciado las mediciones (Anexo G). La temperatura media que se buscó en cada una de las pruebas fue 24°C y una diferencia de temperaturas entre placas de al menos 10°C según indicaciones de la norma ASTM C177-13 [77]. Sin embargo, como se puede observar en las tablas, existen variaciones en estos valores (entre 0.5 y 1.4°C), causados principalmente por la estabilización de las temperaturas de la placa caliente (por parte de la fuente de alimentación) de acuerdo a la respuesta térmica de la muestra. Se considera que, estas variaciones en el flujo de calor influyeron en la variabilidad de los valores de la propiedad (este mismo efecto se presenta en los resultados reportados por Pech-Can [78]). Nótese que las

pruebas con la muestra 1 sin acabado tienen las variaciones mayores entre los resultados, pero también las variaciones mayores entre los valores de flujo de calor, T_m y ΔT . Por otra parte, se observa que, la elaboración manual de las muestras no causó variaciones notables en los resultados. La conductividad térmica promedio del material sin y con capa de acabado fue $0.147 \pm 0.004 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ y $0.193 \pm 0.006 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$, respectivamente.

Tabla 3.3 Conductividad térmica de material sin acabado. Variables de cálculo, resultados y valores de incertidumbre.

Muestra	Espesor (m)	Área (m ²)	Flujo de calor (W)	ΔT (°C)	T_m (°C)	I (%)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)
1	0.04617	0.05887	1.386	8.8	23.1	2.613	0.1241 ± 0.0032
1			2.639	11.5	24.5	2.341	0.1803 ± 0.0042
1			2.632	12.6	25.2	2.284	0.1636 ± 0.0037
2	0.04687	0.06363	2.268	11.5	24.9	3.042	0.1366 ± 0.0041
2			2.450	13.1	25.5	3.049	0.1375 ± 0.0041
2			2.408	12.2	24.8	3.088	0.1450 ± 0.0044
3	0.04617	0.06332	2.408	12.2	24.8	2.740	0.1438 ± 0.0039
3			2.408	11.4	24.7	2.788	0.1535 ± 0.0042
3			2.380	11.6	24.8	2.848	0.1490 ± 0.0042

* T_m : temperatura media, ΔT : diferencia de temperatura entre placas, λ : conductividad térmica, I: incertidumbre.

Tabla 3.4 Conductividad térmica de material con capa de acabado. Variables de cálculo, resultados y valores de incertidumbre.

Muestra	Espesor (m)	Área (m ²)	Flujo de calor (W)	ΔT (°C)	T_m (°C)	I (%)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)
1	0.05173	0.06093	2.552	10.7	24.3	2.602	0.2031 ± 0.0052
1			2.552	10.6	24.3	2.603	0.2041 ± 0.0053
1			2.552	10.5	24.3	2.604	0.2062 ± 0.0053
2	0.05050	0.06473	2.408	10.5	24.1	3.532	0.1790 ± 0.0063
2			2.436	10.6	24.4	3.497	0.1791 ± 0.0062
2			2.552	10.0	24.1	3.644	0.1993 ± 0.0072
3	0.05040	0.06498	2.436	10.0	24.1	3.125	0.1887 ± 0.0058
3			2.436	10.0	24.1	3.164	0.1887 ± 0.0059
3			2.552	10.2	24.2	3.063	0.1934 ± 0.0059

En la Tabla 3.5 se comparan los resultados obtenidos para el material base (es decir, sin acabado) y algunos valores reportados en la literatura. En el material analizado por Laborel-Préneron et al. [79] aunque la proporción de paja (3%) es muy cercana a la proporción utilizada en este proyecto (3-4%), la densidad del material es mayor, lo cual parece influir en la conductividad térmica; no obstante, estos valores están en un rango muy cercano a los resultados

aquí obtenidos. En el trabajo de Colinart et al. [17] la proporción de agregado vegetal es 20 veces mayor mostrando en consecuencia densidades bajas comparado con el material de este proyecto, lo cual a su vez puede explicar que el rango de la conductividad térmica sea también menor. En el trabajo de Labat et al. [54] no se menciona la fracción en masa de la fibra vegetal incorporada; sin embargo con base en las densidades y en las imágenes mostradas del material se puede afirmar que es una fracción significativamente mayor que causa valores bajos de conductividad térmica. Comparada con materiales convencionales como el ladrillo rojo recocido (sólido o hueco) o el concreto, la conductividad térmica del material de estudio es significativamente menor (ver Anexo C); cercana al valor de la madera y del concreto con agregado de fibra, y con un potencial de aislamiento también cercano a los bloques de concreto mejorados con perlita o vermiculita.

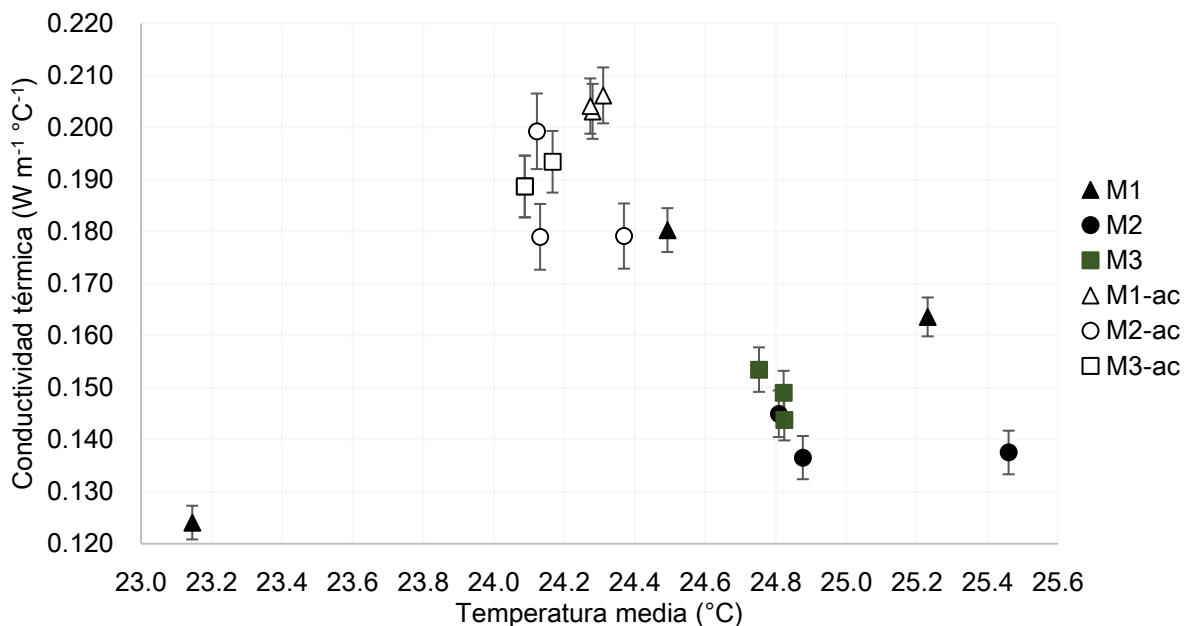


Figura 3.3. Valores de conductividad térmica y de incertidumbre de todas las pruebas de cada una de las muestras sin y con capa de acabado (-ac).

En cuanto al efecto de la temperatura sobre la conductividad térmica, el rango de temperatura analizado fue de 21 a 43°C. Los resultados presentados en la Tabla 3.6 y Figura 3.4 corresponden a la muestra #2. Se observa que los valores de conductividad térmica incrementan con la temperatura media. Siendo así que el valor menor y mayor, 0.153 a 0.236 W m⁻¹ °C⁻¹ (considerando la incertidumbre), se encontraron en la temperatura media mínima y máxima, respectivamente. Esto es una variación máxima de 54%. A partir de los valores promedio de los resultados obtenidos para cada temperatura media se realizó el ajuste de los datos a un modelo lineal. El ajuste, la ecuación y el valor R² correspondientes se muestran en la Figura 3.5.

Tabla 3.5 Conductividad térmica obtenida y valores reportados en la literatura.

Referencia	Material	Fracción en masa de agregado (%)	ρ (kg m ⁻³)	T _m (°C)	ΔT (°C)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Método de medición
Este trabajo	Tierra + paja	2.2 - 2.5	1061 ± 24	23.1-25.4	8.7-13.1	0.147 ± 0.004	GHP (equipo construido)
[79]	Tierra + paja	3 6	1537 ± 5 1100 ± 49	25	10	0.280 ± 0.02 0.140 ± 0.01	GHP (aparato comercial)
[54]	Tierra arcillosa + paja	No mencionado	403 ± 14 449 ± 18 531 ± 30	25	10	0.099 ± 0.007 0.104 ± 0.002 0.120 ± 0.005	GHP (aparato comercial)
[17]	Tierra arcillosa + cáñamo	42 44 42 53 34	205 ± 8 272 ± 26 283 ± 2 304 ± 6 345 ± 13	23	10	0.097 ± 0.005 0.093 ± 0.005 0.100 ± 0.002 0.076 ± 0.004 0.090 ± 0.000	GHP (equipo construido)

* ρ : densidad, T_m: temperatura media, ΔT : diferencia de temperatura entre placas, λ : conductividad térmica.

Tabla 3.6 Conductividad térmica del material con acabado a diferentes valores de temperatura media. Variables de cálculo, resultados y valores de incertidumbre.

Tm (°C)	ΔT (°C)	Flujo de calor (W)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	I (%)	λ^- (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	λ^+ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)
21.50	8.83	1.80	0.159	3.74	0.153	0.165
21.37	8.43	1.80	0.167	3.76	0.160	0.173
21.14	8.10	1.80	0.173	4.33	0.166	0.181
24.59	10.77	2.41	0.174	4.17	0.167	0.182
24.13	10.50	2.41	0.179	3.53	0.173	0.185
24.37	10.61	2.44	0.179	3.50	0.173	0.185
28.43	12.63	3.37	0.208	3.28	0.201	0.215
28.69	12.84	3.37	0.204	3.33	0.198	0.211
30.51	14.75	3.96	0.209	3.21	0.203	0.216
30.55	14.61	3.85	0.206	3.22	0.199	0.212
32.54	16.69	4.68	0.219	3.16	0.212	0.226
33.07	17.41	4.68	0.210	3.06	0.203	0.216
36.00	21.64	5.94	0.214	3.06	0.208	0.221
36.49	22.05	5.94	0.210	3.00	0.204	0.216
39.03	25.83	7.20	0.217	2.91	0.211	0.224
39.95	25.96	7.20	0.216	2.91	0.210	0.223
39.59	26.00	7.20	0.216	2.92	0.210	0.222
43.59	31.73	9.02	0.222	2.95	0.215	0.222
43.13	30.87	9.02	0.228	3.69	0.212	0.236

Tm: temperatura media, ΔT: diferencia de temperatura entre placas, λ: conductividad térmica, I: incertidumbre, λ⁻ y λ⁺: valor superior e inferior de la conductividad térmica de acuerdo al valor de incertidumbre.

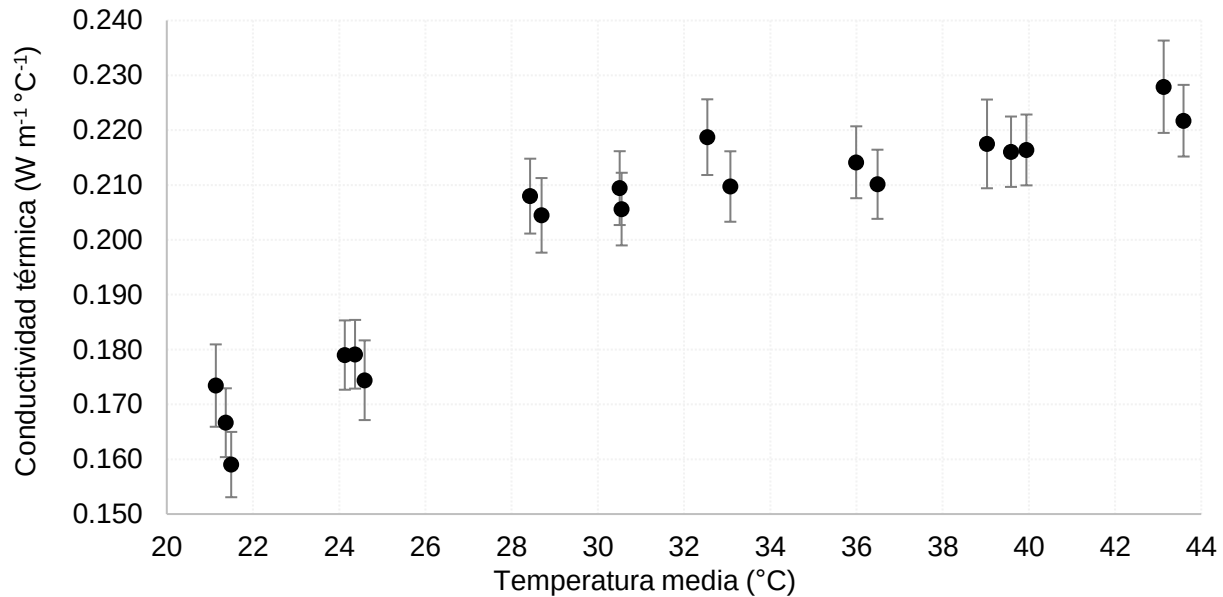


Figura 3.4 Valores de conductividad térmica y de incertidumbre del material con capa de acabado a diferentes valores de temperatura media.

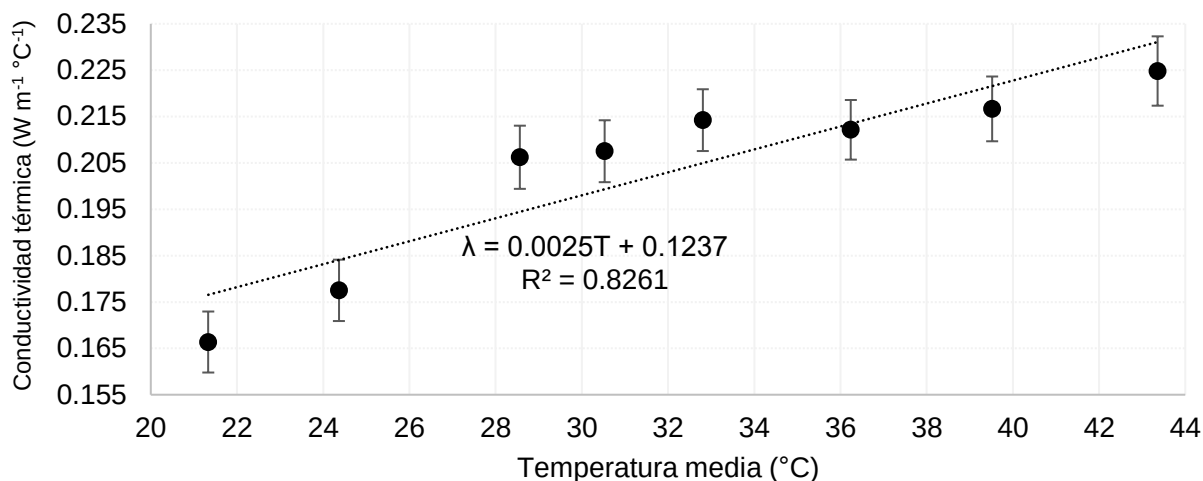


Figura 3.5 Polinomio de ajuste para los valores promedio de la conductividad térmica en función de la temperatura media.

Los valores promedio del calor específico y su error correspondiente se presentan en la Tabla 3.7. Debido a que solo se hicieron tres corridas por cada muestra y que el ruido de la señal es relativamente grande, se determinó el error como la distancia entre el valor mayor de C_p menos el valor menor de C_p dividido entre dos. El error experimental estuvo influenciado por el ruido que presentaba el DSC durante las pruebas. El error de la paja fue mayor que el de la tierra, se considera que esto se debe a que la masa de la muestra de la paja (~4 mg) es pequeña en comparación con la de la tierra (entre 19 mg y 30 mg), ya que la intensidad de la señal del DSC depende de la masa. Se considera que el acondicionamiento realizado a la paja para esta prueba pudo haber afectado las mediciones, particularmente el tamaño de la fibra. Por lo que, se realizó nuevamente pruebas para la paja, esta vez triturando más finamente la muestra. En la Tabla 3.8 se puede observar que los valores del calor específico y de error obtenidos fueron menores. Por lo que estos últimos resultados fueron los utilizados para el cálculo del calor específico de la mezcla tierra + paja. En el intervalo de 20 a 55°C, el C_p promedio de la tierra fue $1.44 \pm 0.11 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y para la paja en el intervalo de 20 a 45°C fue $1.97 \pm 0.20 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$. El valor calculado del C_p de la mezcla tierra + paja fue $1.46 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ y el C_p de la capa de acabado fue $1.00 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

De acuerdo a la Tabla 3.8, se observa que estos resultados no muestran diferencias significativas con los valores reportados. En el caso de la paja, el valor de C_p obtenido es mayor al rango de valores reportados. En [104] reportan un valor de $1.63 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ el cual es muy cercano al resultado obtenido para la paja de estudio considerando también la incertidumbre de la medición ($1.97 \pm 0.20 \text{ J g}^{-1} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$). De igual forma como se ha argumentado anteriormente, es importante considerar el efecto del porcentaje de arena, limo y arcilla de la tierra, así como las características, contenido y tipo de fibra vegetal al momento de comparar los resultados obtenidos con los valores

reportados en la literatura. Comparado con los materiales convencionales como el ladrillo recocido, el concreto o los bloques de concreto, se observa que el calor específico del material es mayor (ver Anexo C).

A partir del valor de la densidad, del calor específico y del porcentaje en volumen del material (mezcla base) y su capa de acabado en estado seco, se calculó la capacidad calorífica volumétrica del material (ρC_p) obteniéndose un valor de $1394.9 \text{ kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. El ladrillo de tierra no cocido con porcentaje en masa de paja del 3% analizado por Laborel-Préneron et al. [79] mostró una capacidad calorífica de $1208.7 \text{ kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$. Otros valores reportados para ladrillos de tierra no cocidos son $1530.9 \text{ kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [18], $1440.5 \text{ kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [105] y $1818.0\text{-}1977.0 \text{ kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ [106]. En comparación con la capacidad calorífica de materiales convencionales como el ladrillo recocido ($1672.0 \text{ kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) o el concreto ($1680.0\text{-}2016.0 \text{ kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), la capacidad calorífica del material de estudio es menor.

Se calculó también la difusividad térmica a partir de la conductividad térmica del material en estado seco a temperatura media de 24°C y de la capacidad calorífica volumétrica. Se obtuvo un valor de $0.14\text{E-}6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, el cual comparado con la difusividad térmica del ladrillo recocido ($0.52\text{E-}6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) o del concreto ($0.75\text{E-}6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$) es menor. Esto indica que la transferencia de calor a través del material de estudio es más lenta, por lo tanto, se puede atenuar mejor la fluctuación de temperaturas y causar un mayor retraso térmico, por ejemplo, entre un ambiente exterior y un ambiente interior.

Tabla 3.7 Calor específico en función de la temperatura para la tierra y paja.

Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Tierra		Paja			
	C_p ($\text{J g}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\pm$ Error	Prueba 1		Prueba 2	
			C_p ($\text{J g}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\pm$ Error	C_p ($\text{J g}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$)	$\pm$ Error
20.00	1.52	0.11	2.54	0.24	1.88	0.20
25.00	1.50	0.11	2.48	0.24	1.81	0.20
30.00	1.38	0.11	2.97	0.24	1.91	0.20
35.00	1.46	0.11	2.74	0.24	2.17	0.20
40.00	1.33	0.11	2.64	0.24	2.08	0.20
45.00	1.46	0.11	2.56	0.24	1.95	0.20
50.00	1.39	0.11	2.58	0.24	---	---
55.00	1.55	0.11	2.73	0.24	---	---

Tabla 3.8 Calor específico obtenido y valores reportados en la literatura.

Referencia	Tipo de material	Cp (J g ⁻¹ °C ⁻¹)	T (°C)
Este trabajo	Tierra	1.44 ± 0.11	20 - 55
	Paja	1.97 ± 0.20	20 - 45
	Tierra + paja	1.46	
[79]	Tierra	0.80-0.90	~37 - 47
	Paja	1.28-1.40	
	Cáñamo	1.42-1.57	
	Tierra + paja (3%)	0.79	
	Tierra + paja (6%)	0.80	
	Tierra + cáñamo (3%)	0.79	
	Tierra + cáñamo (6%)	0.81	
[12]	Tierra apisonada	0.92	27
[17]	Arcilla	0.77-0.93	40
	Cáñamo	1.35	
	Tierra + cáñamo	1.02-1.20	
[18]	Ladrillo de tierra no cocido	0.73-0.82	-
	Arcilla	1.67-2.50	
[51]	Ladrillo de tierra no cocido	0.80	20
[106]	Ladrillo de tierra no cocido	0.90-0.96	22
[107]	Paja	1.01 ± 0.20	-
[104]	Paja de trigo	1.63 ± 0.07	27
	Paja de avena	1.57 ± 0.07	
	Paja de soja	1.44 ± 0.12	
[108]	Bloque de tierra	1.48	--

3.3 Propiedades higroscópicas.

El ASTM E96/E96M [80], estándar utilizado para la obtención de la permeabilidad al vapor de agua, menciona que no debe esperarse que los resultados de ambos ambientes (de humedad baja y alta) coincidan, lo cual se comprobó con los resultados obtenidos del material expuesto a un ambiente seco y a un ambiente húmedo, cuyos datos principales se encuentran resumidos en la Tabla 3.9 y Tabla 3.10, respectivamente. Las ecuaciones, descripción y equivalencias de las variables se detallan en el Anexo H. Entre los resultados de un mismo ambiente no se observaron diferencias significativas mostrando un valor promedio de 2.51E-11 y 5.77E-11 kg Pa⁻¹ s⁻¹ m⁻¹ en la prueba de ambiente seco y en la prueba de ambiente húmedo, respectivamente. Obsérvese que la pintura incorporada en la superficie no mostró un efecto significativo en la transmisión de vapor a través de las muestras, lo cual demuestra que en efecto es permeable al vapor de agua.

Tabla 3.9 Permeabilidad al vapor de agua. Prueba de ambiente seco.

Muestra	Espesor (m)	WVT* (g h ⁻¹ m ⁻²)	Permeanza (kg Pa ⁻¹ s ⁻¹ m ⁻²)	Permeabilidad (kg Pa ⁻¹ s ⁻¹ m ⁻¹)	Factor de resistencia a la difusión de vapor
2-R	0.0351	2.564	6.43E-10	2.26E-11	8.68
5-R	0.0360	3.136	8.03E-10	2.89E-11	6.79
4	0.0347	2.712	6.84E-10	2.38E-11	8.25
Promedio		2.804	7.10E-10	2.51E-11	7.91

* R: con recubrimiento, WVT: tasa de transmisión de vapor de agua.

Tabla 3.10 Permeabilidad al vapor de agua. Prueba de ambiente húmedo.

Muestra	Espesor (m)	WVT (g h ⁻¹ m ⁻²)	Permeanza (kg Pa ⁻¹ s ⁻¹ m ⁻²)	Permeabilidad (kg Pa ⁻¹ s ⁻¹ m ⁻¹)	Factor de resistencia a la difusión de vapor
1-R	0.0350	6.624	1.61E-09	5.63E-11	3.48
3-R	0.0358	6.880	1.69E-09	6.03E-11	3.25
6	0.0368	6.393	1.54E-09	5.67E-11	3.46
Promedio		6.632	1.61E-09	5.77E-11	3.40

* R: con recubrimiento, WVT: tasa de transmisión de vapor de agua.

En la Figura 3.6 y Figura 3.7 se muestra el comportamiento temporal de los cambios en la masa de las muestras. Inicialmente las muestras se encuentran en estado seco y al entrar en contacto con el ambiente de la cámara a 50% de HR adsorben humedad hasta que alcanzan el equilibrio entre el ambiente y la superficie de la muestra. Posteriormente avanza la transmisión del vapor de agua a través de las muestras; del ambiente con mayor nivel de humedad hacia el ambiente de menor humedad. Lo cual se hace evidente con el inicio de pérdida de masa en las muestras en el ambiente húmedo y de ganancia de masa en las muestras en el ambiente seco.

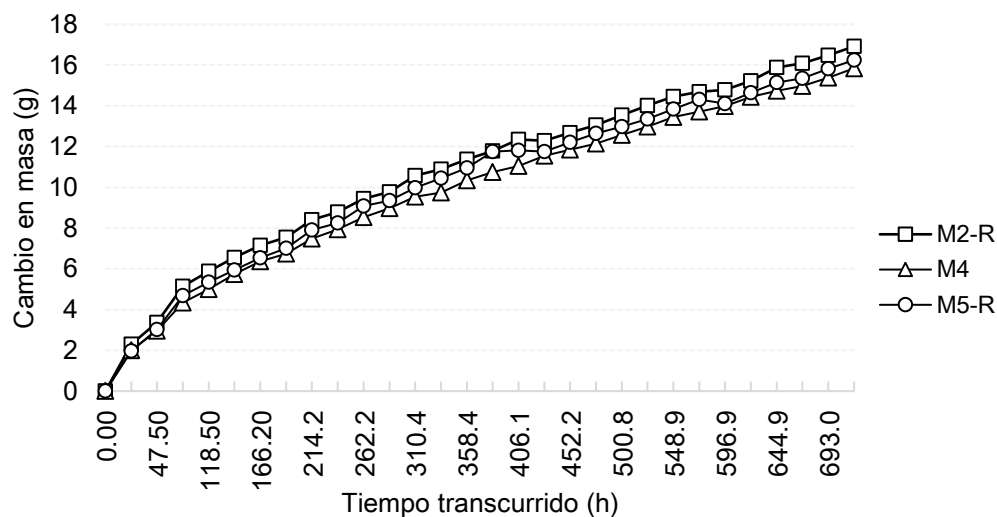


Figura 3.6 Análisis gráfico de la transmisión de vapor de agua. Prueba de ambiente seco.

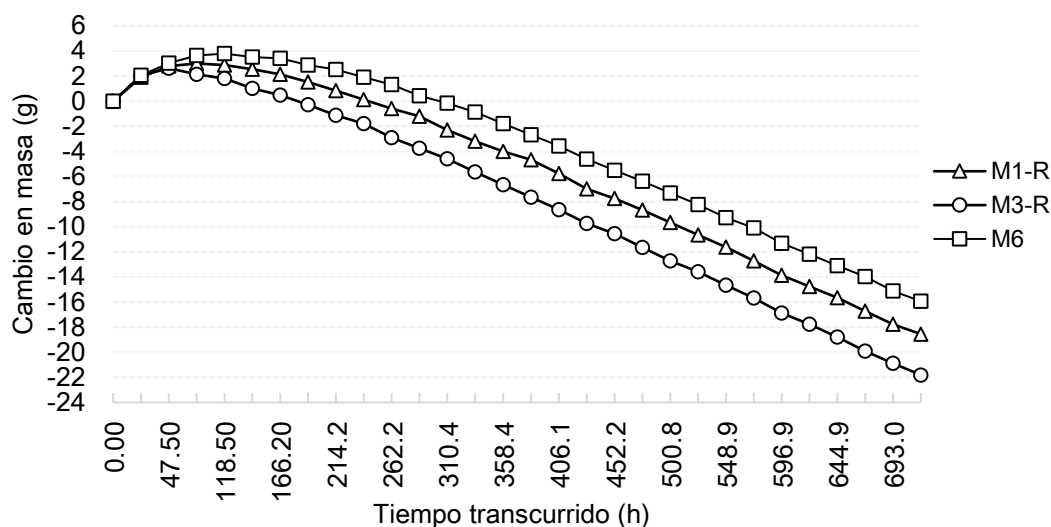


Figura 3.7 Análisis gráfico de la transmisión de vapor de agua. Prueba de ambiente húmedo.

Los resultados obtenidos son comparados con los valores reportados en la literatura de materiales semejantes en composición (Tabla 3.11). El material de estudio a diferencia de los materiales reportados tiene una capa superficial adicional que contiene arena, por lo cual es importante considerar su efecto posible sobre la capacidad de transmisión de vapor del material. La permeabilidad al vapor de agua en la prueba de ambiente seco fue menor al resultado reportado por Labat et al. [54], aunque en ambos trabajos el material es una mezcla de tierra y agregado vegetal, el contenido de fibra es una proporción significativamente mayor (el material muestra superficies muy porosas). Sin embargo, el efecto que pueda ejercer sobre la higroscopicidad del material depende no solo del contenido vegetal sino también de sus características (tipo, longitud) en conjunto con la composición y las características de la tierra (porcentaje de limo, arcilla, arena, tamaño de los granos, distribución), así como del proceso de elaboración del material (la compactación, por ejemplo). El material analizado por Laborel-Préneron et al. [79] comparte una composición muy semejante (tierra y 3% en masa de paja), sin embargo el valor de permeabilidad en ambiente húmedo que ellos obtuvieron es 1.5 veces menor, esto se atribuye a las razones planteadas anteriormente en los resultados de la prueba de ambiente seco. En este caso con mayor inclinación a las características de la tierra y su compactación. Además obsérvese que en [79], la humedad relativa de la prueba fue menor (86% vs 100%). Comparado con materiales convencionales como el ladrillo rojo cocido, la madera, el bloque de concreto o el concreto, el valor de permeabilidad obtenido es significativamente mayor, y respecto al concreto mejorado con fibra presenta valores cercanos (ver Anexo C).

El factor de resistencia a la difusión de vapor de agua se define como el cociente de la permeabilidad al vapor de agua del aire y la permeabilidad al vapor de agua del material, por lo que es adimensional. Para el material de estudio se obtuvo un valor de 7.9 en un ambiente seco y de 3.4 en un ambiente húmedo, lo cual indica que tiene una resistencia a la difusión de vapor de agua cerca de 8 y 3 veces mayor que la que tiene el aire en las mismas condiciones, respectivamente. El resultado en un ambiente seco aproximadamente duplica el valor reportado por Colinart et al. [17] (Tabla 3.12) donde el contenido de fibra vegetal es significativamente mayor lo cual crea superficies con espacios visiblemente mayores (Figura 3.8).

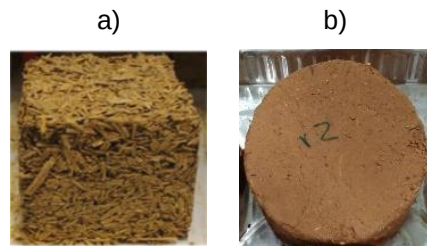


Figura 3.8 Material de tierra con agregado vegetal estudiado por a) Colinart et al. [17] y, b) en este trabajo.

En cuanto al factor de resistencia al vapor de agua en ambiente húmedo se observa que se encuentra dentro de los valores reportados por otros autores. El análisis de este comportamiento comparte la discusión expuesta para la permeabilidad al vapor de agua por tratarse de los mismos trabajos (mismos trabajos) y recordando que el factor de resistencia se obtiene a partir del valor de permeabilidad. Para ambas condiciones de prueba (ambiente húmedo y seco) los resultados reportados por Cagnon et al. [106] (Tabla 3.12) son muy cercanos a los valores obtenidos. Aunque el material analizado por esos autores no contiene agregado vegetal (es un ladrillo de tierra no cocido), puede ser un ejemplo de comparación puesto que el material analizado en este proyecto tiene un bajo contenido de agregado vegetal (3%).

Tabla 3.11 Permeabilidad al vapor de agua obtenida y valores reportados en la literatura.

Referencia	Tipo de material	Método	δ_v (kg m ⁻¹ s ⁻¹ Pa ⁻¹)	HR de prueba (%)	T(°C), HR (%) ambiente	Dimensiones de muestra (m)	Estándar
Este trabajo	Tierra kankab + paja (3%) + capa de acabado	Vaso seco Vaso húmedo	2.51E-11 5.77E-11	7 100	23, 50 (cámara climática y solución salina)	0.091 (d) x 0.035 (h)	ASTM E96/E96M- 16
[18]	Ladrillo de tierra no cocido	Vaso húmedo	3.86E-11 a 2.38E-11	94	23, 50 (cámara climática)	0.05 × 0.05 × 0.025	GB/T 17146-2015
[54]	Arcilla + paja	Vaso seco Vaso húmedo	4.2E-11 6.8E-11	9 93	23, 50	0.12 (d) x 0.026- 0.028 (h)	ISO 12572
[79]	Tierra + paja (3%) Tierra + paja (6%)	Vaso húmedo	3.8 ± 0.3 E-11 2.8 ± 0.1 E-11	86	23, 50 (cámara climática)	0.05 (d) x 0.05 (h)	NF EN ISO 12572
[51]	Ladrillos de arcilla no cocidos	-	7E-11 5E-11 a 2.5E-10	50-80	23, 50 (cámara climática)	--	EN ISO 12572
[12]	Bloque de tierra comprimido	Vaso seco	1.20E-11	- (CaCl ₂)	25, 59 (solución salina, NaBr)	0.075 (d) x 0.014 (h)	NF EN ISO 12572

* δ_v : permeabilidad al vapor de agua, d: diámetro, h: altura, CaCl₂: cloruro de calcio, NaBr: bromuro de sodio.

Tabla 3.12 Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua (μ) obtenido y valores reportados en la literatura.

Referencia	Tipo de material	Método	μ (-)	HR de prueba (%)	T(°C) y HR (%) ambiente	Dimensiones de muestra	Estándar
Este trabajo	Tierra kankab + paja (3%) + capa de acabado	Vaso seco	7.9	7	23, 50 (cámara climática y solución salina)	0.09 (d) x 0.03 (h)	ASTM E96/E96M-16
		Vaso húmedo	3.4	100			
[17]	Arcilla-cáñamo	Vaso seco	2.2-3.4	5	23, 50 (cámara climática)	0.10 x 0.10 x 0.05	ISO 12572
[18]	Ladrillo de tierra no cocido	Vaso húmedo	5.4-8.7	94	23, 50 (cámara climática)	0.05 x 0.05 x 0.025	GB/T 17146- 2015
[79]	Tierra + paja (3%)	Vaso húmedo	5.2 ± 0.4	86	23, 50 (cámara climática)	0.05 (d) x 0.05 (h)	NF EN ISO 12572
	Tierra + paja (6%)		2.8 ± 0.1				
[106]	Ladrillo de tierra no cocido	Vaso seco	7.0	33	20, 50 (cámara climática)	0.10 x 0.10 x 0.02	NF EN ISO 12572
		Vaso húmedo	3.0	86			

* d: diámetro, h: altura, -:adimensional.

La prueba experimental para la obtención de las isothermas de sorción higroscópica se realizó dos veces. Durante la primera prueba se presentaron dificultades con la estabilidad de las condiciones de humedad en algunos de los niveles. Por ello se decidió repetir la prueba tomando medidas que ayudaran a mantener los niveles de humedad deseados. Los resultados de la prueba 1 y de la prueba 2 se muestran en la Figura 3.9 y Figura 3.10. Nótese que los valores de contenido de humedad tanto en la curva de adsorción como desorción en la prueba 1 son mayores que los obtenidos en la prueba 2. La relación entre el contenido de humedad y el nivel de humedad relativa en la prueba 2 mostró un comportamiento más constante comparado con la prueba 1. Esto se puede atribuir, como se mencionó anteriormente, a los problemas de estabilidad en las condiciones de humedad en la prueba 1. Por lo que de aquí en adelante, el análisis de las isothermas de sorción del material de estudio estará basado en las mediciones obtenidas en la prueba 2. Lo que podemos observar en la Figura 3.10 es la capacidad del material para el almacenamiento de humedad en la región higroscópica a una temperatura constante ($23 \pm 1^\circ\text{C}$) que de igual forma como se ha reportado para materiales de composición semejante dicha capacidad incrementa con el nivel de la humedad relativa al que se expone el material.

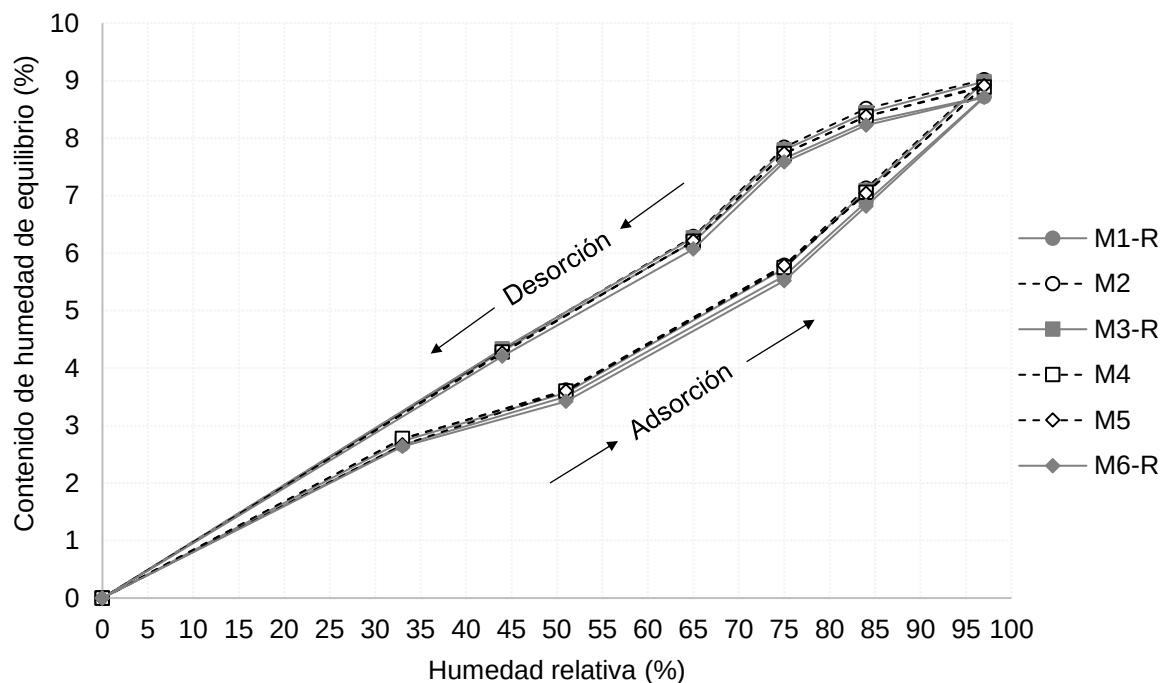


Figura 3.9 Isothermas de sorción de la prueba 1 para todas las muestras del material de estudio (-R: muestras con recubrimiento permeable al vapor de agua).

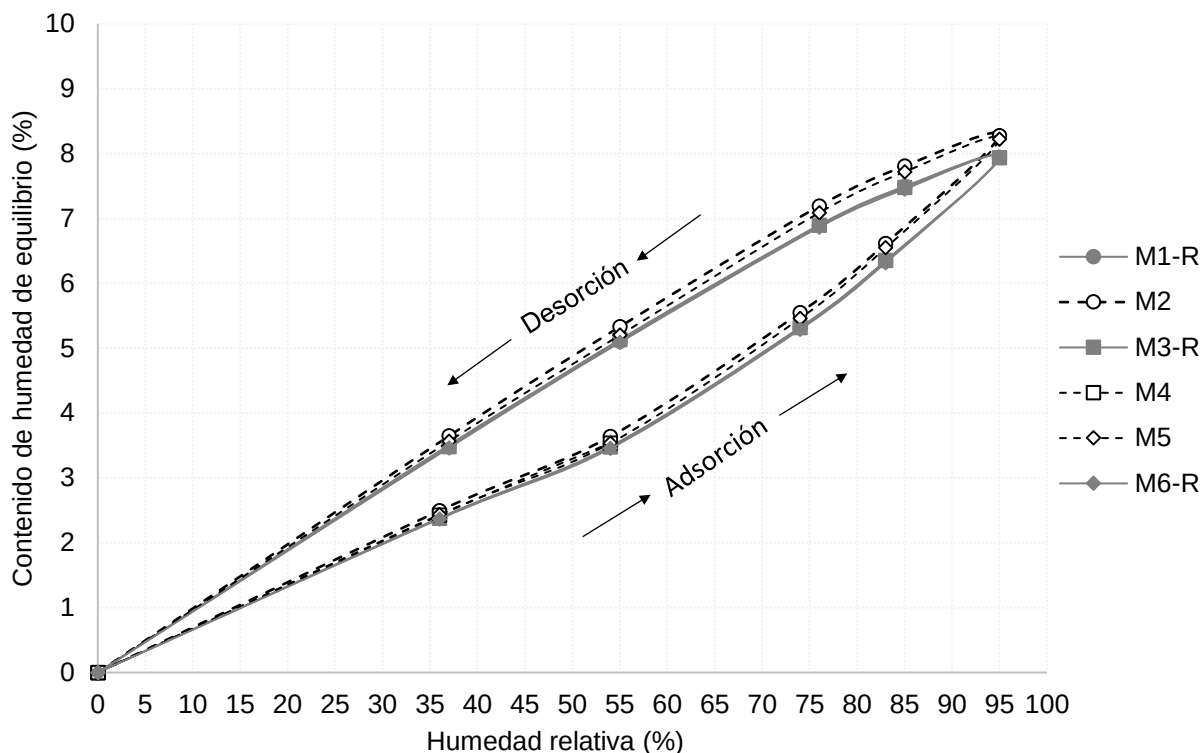


Figura 3.10 Isothermas de sorción de la prueba 2 para todas las muestras del material de estudio (-R: muestras con recubrimiento permeable al vapor de agua).

De acuerdo a la literatura en la mayor parte de la región higroscópica (desde 0 hasta 95-97% de HR) los poros de los materiales se encuentran llenos principalmente de vapor de agua y por lo tanto el transporte es mayormente por transferencia de vapor. Sin embargo, durante el periodo de desorción los materiales higroscópicos pueden retener más humedad que la que ellos adsorben en cualquier nivel de humedad. Este fenómeno conocido como histéresis incremental en los límites de la región higroscópica y se puede atribuir a la interconectividad del sistema de poros y/o al fenómeno de condensación capilar. Como puede observarse tanto en la Figura 3.9 como en la Figura 3.10 la histéresis del material es notable. En la sección de composición mineralógica se mencionó que el tipo de mineral arcilloso presente en el material influye en el grado de histéresis. El mineral arcilloso identificado en la tierra analizada fue la caolinita. De acuerdo a las características superficiales de adsorción de este mineral, la histéresis que puede presentar es menor comparada con la bentonita o montmorillonita.

De acuerdo a la clasificación de isothermas de adsorción de sólidos porosos propuesta por la IUPAC, los datos experimentales obtenidos muestran características de la clase tipo IV (atribuida a materiales mesoporosos con diámetros entre 2 y 50 nm). De acuerdo a esta clasificación, si la rodilla de la isoterma (el punto donde comienza la sección cuasilineal de la isoterma) es

pronunciada, se asume que en este punto se ha completado la formación de la capa monomolecular (monocapa) y empieza la formación de las capas multimoleculares (multicapas) [109]. Como puede observarse en la Figura 3.10 este comportamiento parece desarrollarse entre los niveles de 36% y 54% de humedad relativa.

En la Tabla 3.13, los resultados de contenido de humedad de equilibrio son expresados en kg kg^{-1} , en % y en kg m^{-3} , los valores en estas últimas unidades se obtuvieron a partir de la densidad del material en estado seco y del contenido de humedad en kg kg^{-1} . Para los cálculos se consideró el valor de densidad aparente de las muestras utilizadas para la prueba ($0.05 \times 0.05 \times 0.035\text{m}$) esto es $1031.83 \pm 37.05 \text{ kg m}^{-3}$. Este valor de densidad es menor (10.8% menor) al reportado en la sección “Densidad aparente del material”, donde se utilizaron muestras de $0.25 \text{ m} \times 0.25 \text{ m} \times 0.05 \text{ m}$ para las cuales se obtuvo un valor de $1156.35 \pm 28.5 \text{ kg m}^{-3}$. Estas variaciones en la densidad aparente son atribuidas al proceso de elaboración manual y artesanal del material, lo cual es parte de sus características distintivas. En el trabajo de McGregor et al. [56] las isotermas de sorción mostraron que, una diferencia de 11.6% en la densidad de dos bloques de tierra comprimida (con la misma composición) no tiene un efecto significativo en la capacidad de almacenamiento del material, solo una reducción ligera en valores de humedad relativa mayores a 95% en el bloque con la densidad mayor. Teniendo en cuenta por una parte que el material analizado por McGregor et al. [56] se trata de un bloque de tierra comprimida y que las densidades analizadas tienen una diferencia de 11.6%, y por otra parte el material de este proyecto también es tierra comprimida (con solo 3% de agregado vegetal) y que la diferencia en las densidades es de 10.8%, podría considerarse que esta variación no tendrá un efecto significativo en la capacidad de almacenamiento de humedad.

Tabla 3.13 Contenido de humedad de equilibrio a partir de la isoterma de adsorción higroscópica. .

HR (%)	u (kg kg^{-1})	u (%)	u (kg m^{-3})*
36	0.024	2.41	24.90
54	0.035	3.52	36.33
74	0.054	5.39	55.59
83	0.064	6.43	66.39
95	0.081	8.06	83.20

*Calculado para el valor promedio de densidad del material: $1031.83 \text{ kg m}^{-3}$.

En la Tabla 3.14 se presentan los valores de la capacidad de sorción de acuerdo a los incrementos de humedad relativa. Puede observarse que la razón de incremento del contenido de humedad del material con el nivel de humedad relativa no es constante sino que va creciendo.

Estos datos son requeridos para el caso del análisis teórico de la transferencia de calor y humedad en el material.

Tabla 3.14 Capacidad de sorción del material a partir de la isoterma de adsorción higroscópica.

Humedad relativa (%)	Capacidad de sorción (adm)
0 a 36	0.067
36 a 54	0.062
54 a 74	0.093
74 a 83	0.116
83 a 95	0.136

Como se observa en la Figura 3.11 comparado con otros materiales a base de tierra, el material propuesto presenta un contenido de humedad de equilibrio generalmente mayor en los diferentes niveles de humedad relativa excepto cuando es comparado con la capacidad de adsorción en un ambiente mayor a 90% del material analizado por Labat et al. [54]. Aunque los componentes de este material son los mismos, el porcentaje de paja es significativamente mayor (no se menciona el valor pero las imágenes publicadas hacen notar la gran proporción de paja utilizado). El contenido de agregado vegetal ha demostrado incrementar la capacidad de adsorción de los materiales de tierra. Sin embargo, puede observarse que para los niveles inferiores a 90% de HR el contenido de humedad de equilibrio es menor sin importar la proporción de paja. Por lo que se considera que la tierra (con su composición mineral y porosidad particular) puede tener un efecto mayor en la capacidad de adsorción del material. Lo cual también se observa al comparar los resultados obtenidos por Laborel-Préneron et al. [79] y Taouirte et al. [109]. En el primer trabajo, la composición del material que ellos analizaron es igual a la del material de este proyecto, esto es, tierra y 3% de paja. Sin embargo como se muestra en la Figura 3.11, los contenidos de humedad de equilibrio en los diferentes niveles de humedad relativa son valores menores. Incluso cuando el porcentaje de paja es el doble (6%), el contenido de humedad de equilibrio reportado es menor. Como puede observarse en la Figura 3.11, a pesar de que el material reportado en el trabajo de Taouirte et al. [109] tiene un contenido de fibra significativamente mayor (50% vs 3%) los valores de contenido de humedad son muy cercanos a los obtenidos en este trabajo.

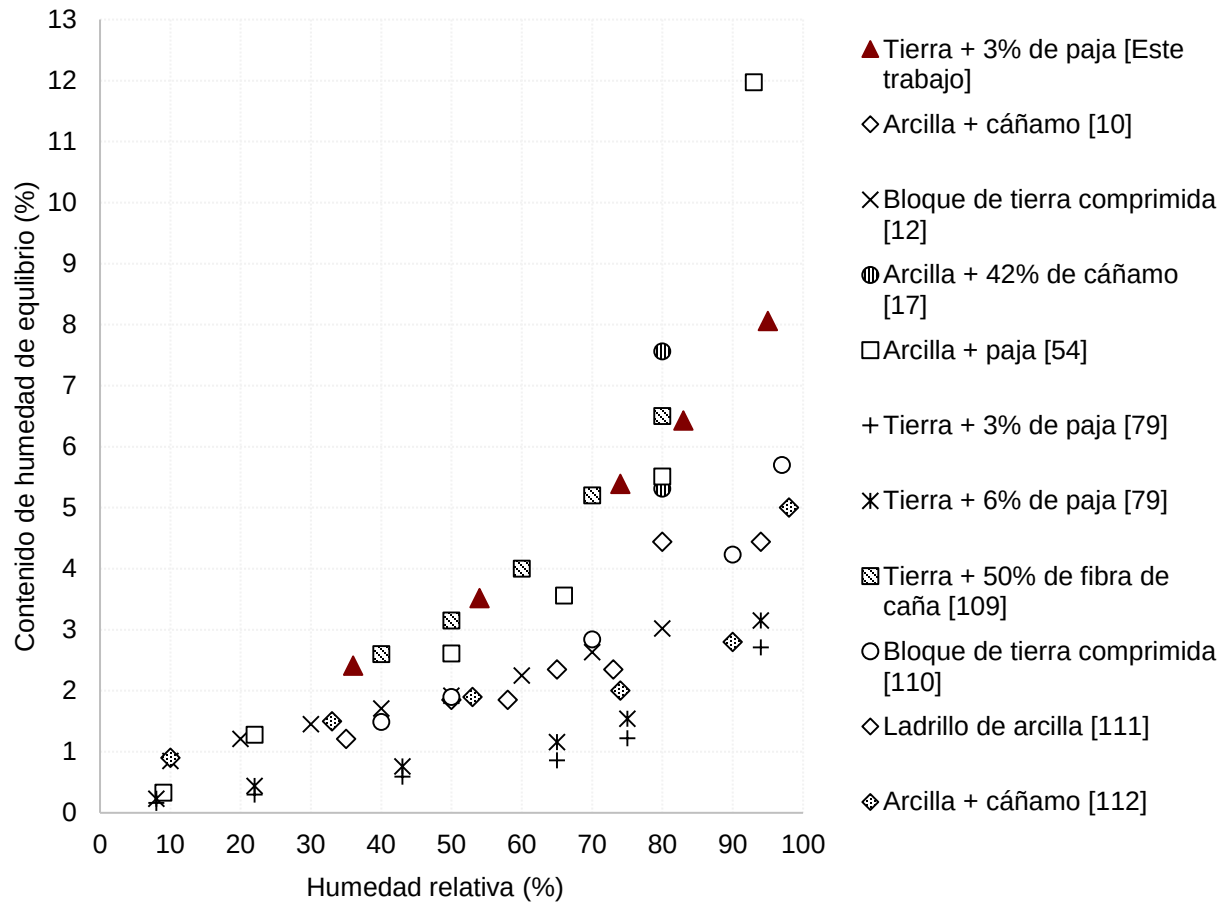


Figura 3.11 Contenido de humedad de equilibrio de materiales a base de tierra.

El ajuste de los datos experimentales obtenidos durante el análisis de adsorción de humedad con los modelos matemáticos de GAB, Henderson, Chung-Pfost modificado, Halsey y Oswin se presenta en la Figura 3.12. Se muestran también los valores de las constantes correspondientes de cada modelo y el valor R^2 . Obsérvese que el modelo de GAB y el modelo de Henderson presentan un buen grado de ajuste comparado con los otros modelos. Sin embargo, el resultado R^2 de valor mayor corresponde al modelo de GAB (0.999). El modelo de GAB toma en consideración el calor adsorbido por las capas moleculares mediante el valor w_m , n es una constante cinética debido a la adsorción de la primera capa y k es una constante cinética debido a la adsorción multi-molecular. Este modelo cubre un rango de humedad relativa entre 5 y 90% por lo cual se espera que para niveles de humedad mayores presente un ajuste menor.

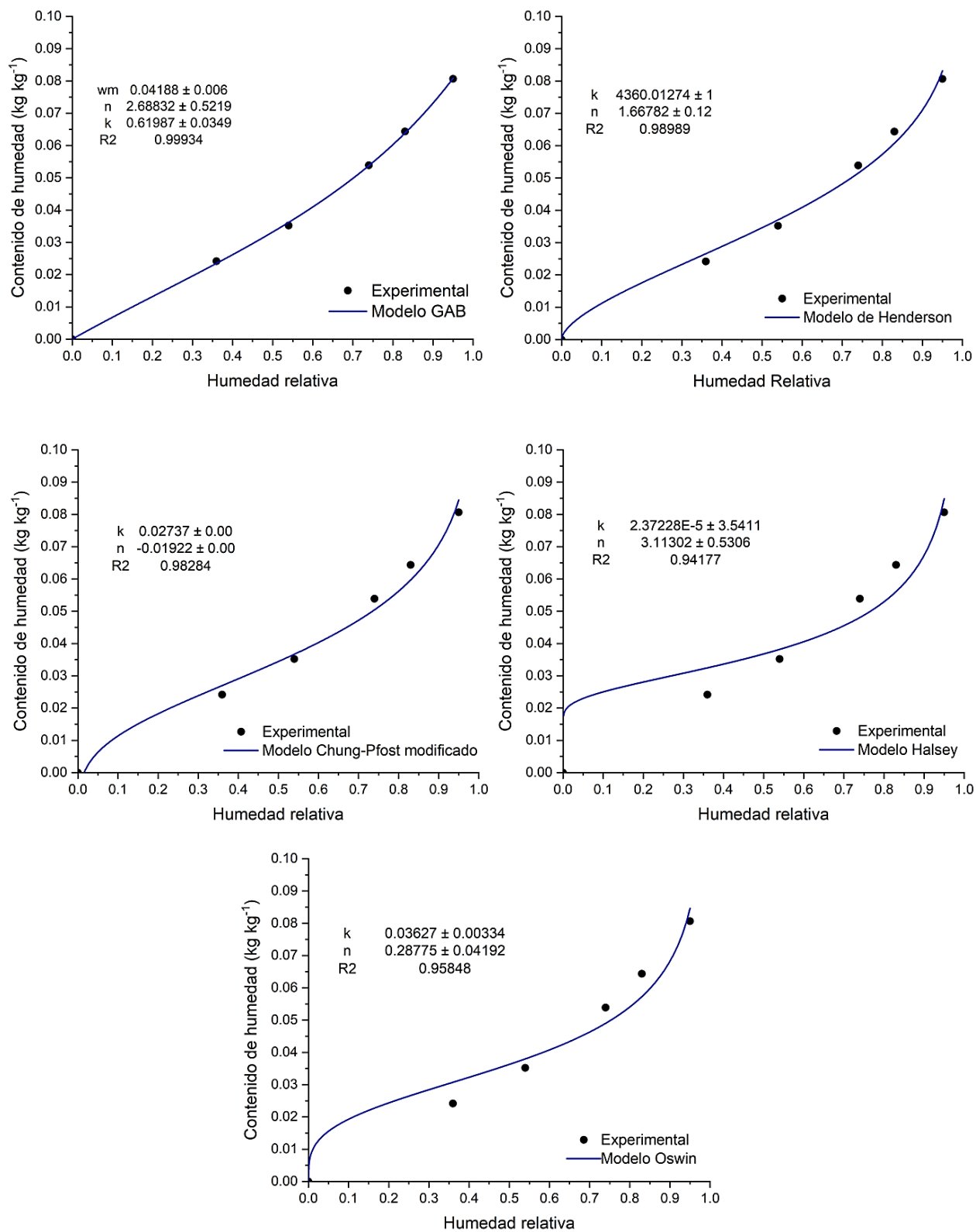


Figura 3.12 Modelos de ajuste para la isoterma de adsorción higroscópica.

3.4 Efecto del contenido de humedad sobre el comportamiento térmico.

Los resultados de la conductividad térmica del material para los cuatro valores de contenido de humedad analizados así como las características de las pruebas y valores de incertidumbre son mostrados en la Tabla 3.15. Para cada contenido de humedad se analizaron tres valores de temperatura media $24 \pm 1^\circ\text{C}$, $32 \pm 1^\circ\text{C}$ y $36 \pm 1^\circ\text{C}$. Se realizaron tres repeticiones para cada una de ellas. La duración de las pruebas fue de 20-24 h y el estado estacionario se alcanzó 14-16 h después de haber iniciado las mediciones (Anexo G). Debido al número de pruebas a realizar, el tiempo requerido para su acondicionamiento a los diferentes valores de contenido de humedad (entre 2 y 3 meses para cada uno), así como la duración de cada prueba, los resultados mostrados corresponden a una de las tres muestras utilizadas para la medición de conductividad térmica del material en estado seco. Teniendo en cuenta la proximidad de los resultados obtenidos sobre la conductividad térmica del material en estado seco a una temperatura media de 24°C entre las tres muestras, se considera que los resultados obtenidos para una de esas muestras son representativos del material.

Con la finalidad de poder analizar la respuesta evolutiva del material en términos de la conductividad térmica en función del contenido de humedad, la Figura 3.13 muestra la variación desde que el material se encuentra en estado seco hasta que tiene un contenido de humedad de 8.0% como resultado de su equilibrio con un ambiente a 95% de humedad relativa (como se analizó en la sección anterior sobre las propiedades higroscópicas). Los resultados en la Figura 3.13 son los valores promedio obtenidos a una temperatura media de $24 \pm 1^\circ\text{C}$. Para la muestra analizada, vemos que la conductividad térmica pasó de $0.186 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ (material en estado seco) a $0.285 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ (material con un contenido de humedad de 8.0%) lo cual representa un incremento de 53%. La línea de tendencia y la ecuación acompañante describen un ajuste lineal (ver Figura 3.13) con un valor de R^2 de 0.986. Al comparar la conductividad térmica del material en estado seco ($0.186 \pm 0.006 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ a $T_m = 24^\circ\text{C}$) y la conductividad térmica del aire ($0.025 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ a $T_m = 25^\circ\text{C}$) contra la conductividad térmica del agua ($0.607 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ a $T_m = 24^\circ\text{C}$) podemos explicar el incremento observado en los resultados. Para el caso de contenido de humedad de 8.0% se realizó una prueba final con la muestra no recubierta, es decir, sin papel film transparente. Esto con la finalidad de identificar el efecto de este recubrimiento sobre las mediciones. Como puede observarse en la Tabla 3.15, el resultado se encuentra dentro de los valores obtenidos de las pruebas realizadas con la muestra recubierta. La principal diferencia encontrada fue la pérdida de contenido de humedad entre el inicio y fin de la prueba, puesto que en este caso fue de 3.4 g y en las demás pruebas estuvo entre 0.0 y 2.0 g.

Tabla 3.15 Conductividad térmica del material a diferentes valores contenido de humedad (u) y de temperatura media (Tm). Variables de cálculo, resultados y valores de incertidumbre.

u (%)	Tm (°C)	ΔT (°C)	Flujo de calor (W)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	I (%)
4.7	24.29	10.19	3.14	0.239	3.74
4.7	24.25	10.21	3.14	0.238	3.45
4.5	24.42	10.36	3.14	0.235	3.82
4.5	24.33	10.24	3.14	0.237	3.52
4.5	32.51	16.30	5.46	0.260	3.61
4.4	32.45	15.95	5.46	0.266	3.73
4.4	32.43	16.16	5.46	0.262	3.33
4.4	36.33	20.19	7.15	0.275	3.65
4.3	36.85	21.00	7.35	0.271	3.16
4.3	36.89	20.78	7.35	0.272	3.66
4.2	36.96	21.24	7.35	0.268	3.20
6.2	24.87	10.56	3.39	0.249	3.62
6.2	24.81	10.27	3.37	0.254	3.38
6.1	24.92	10.37	3.37	0.252	3.59
6.1	32.78	15.75	5.72	0.282	3.18
6.1	32.76	15.61	5.68	0.282	3.22
6.0	32.62	15.47	5.68	0.285	3.15
6.0	36.97	19.85	7.45	0.291	3.12
5.9	36.79	19.45	7.40	0.295	3.11
5.8	36.59	19.37	7.40	0.296	3.06
7.4	24.71	9.93	3.54	0.276	3.52
7.4	24.75	10.10	3.57	0.274	3.52
7.1	24.32	10.08	3.57	0.275	3.49
7.3	32.64	15.42	5.76	0.290	2.99
7.1	32.17	15.38	5.76	0.291	3.17
7.0	32.06	15.47	5.76	0.289	3.12
7.2	36.59	19.06	7.40	0.301	3.09
6.9	35.59	19.37	7.45	0.298	3.06
6.8	35.84	19.83	7.75	0.303	3.03
8.0	24.61	10.43	3.75	0.279	3.47
8.0	24.56	10.27	3.78	0.285	3.41
8.0	24.45	10.08	3.78	0.291	3.45
7.7*	24.54	10.37	3.78	0.283	3.40
8.0	33.01	16.51	6.49	0.305	3.18
8.0	32.82	16.18	6.30	0.302	3.15
7.9	32.66	16.26	6.26	0.298	3.19
7.8	35.98	19.04	7.70	0.314	3.07
7.7	36.42	19.19	7.75	0.313	3.11
7.7	36.23	19.14	7.75	0.314	3.04

ΔT : diferencia de temperatura entre placas, λ : conductividad térmica, I: incertidumbre,

*prueba con muestra no recubierta con papel film.

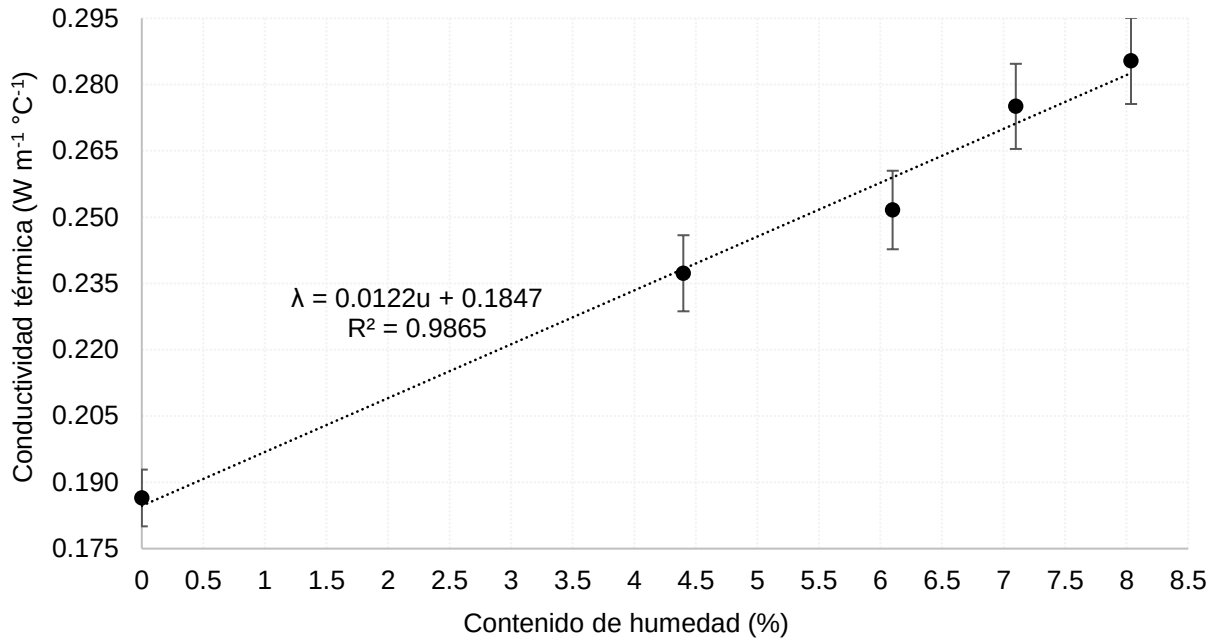


Figura 3.13 Modelo de ajuste para los valores promedio de la conductividad térmica en función del contenido de humedad (u) a una temperatura media de 24°C.

En la Tabla 3.15 se muestran también los resultados obtenidos para los otros dos valores de temperatura media analizados (32 y 36°C) para cada contenido de humedad. Inicialmente se observa un incremento de la conductividad térmica conforme incrementa la temperatura de prueba. Las diferencias entre los resultados de las repeticiones para una misma temperatura media están generalmente en el rango de unidades milésimas y en algunos casos de centésimas. También se observan variaciones en el contenido de humedad para un mismo grupo de análisis, por ejemplo, en el primer valor de contenido de humedad se observa que entre el inicio y fin de las pruebas pasó de 4.7% a 4.2%; este mismo comportamiento de pérdida de humedad se presentó en las pruebas de los otros tres contenidos de humedad. Al término de cada prueba se realizaba una revisión visual detallada a la muestra. En ninguno de los casos se encontró evidencias de condensación a excepción de las pruebas para el contenido de humedad de 8.0% a temperatura media de 32°C y de 36°C donde se observó condensación de ligera a moderada en la superficie de la muestra en contacto con la placa fría del instrumento de medición. Esto puede ser atribuido al efecto combinado de evaporación y condensación debido a las temperaturas de la placa caliente y placa fría, el alto contenido de humedad de la muestra de material así como la duración de la prueba. Debido a este comportamiento la confiabilidad de los resultados para un contenido de humedad de 8% a una Tm de 36°C podría ser cuestionable. Sin embargo, como se puede observar, en las tres repeticiones realizadas se obtuvieron resultados

cercanos. La pérdida de humedad en las demás pruebas donde no se presentó condensación se puede atribuir a defectos en la hermeticidad en el recubrimiento de las muestras.

En la Figura 3.14 se presenta la conductividad térmica en función del contenido de humedad y de la temperatura media (las tres variables en valores promedio) donde se han incluido nuevamente los resultados del material en estado seco a fin de poder analizar el efecto de ambas variables. La variación de la conductividad térmica respecto a la temperatura para un determinado contenido de humedad se ajustó con una ecuación lineal. El contenido de humedad de 0.0% (considerado como el material en estado seco) y 8.0% presentaron los valores R^2 más bajos, 0.956 y 0.977, en los demás casos el valor R^2 fue mayor a 0.992. Se puede observar que la pendiente para el caso de 0.0% de contenido de humedad es muy cercano a la pendiente para el caso de 4.4, 7.1 y 8.0% de contenido de humedad. En forma resumida, los incrementos de la conductividad térmica en función de la temperatura (de 24°C a 36°C) para los cinco valores de contenido de humedad (de 0.0 a 8.0%) fueron 15.2, 14.8, 16.2, 9.5 y 9.8%. El valor mayor de conductividad térmica, $0.314 \pm 0.010 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$, corresponde al caso con el valor mayor de contenido de humedad y de temperatura analizado (8.0% a 36°C).

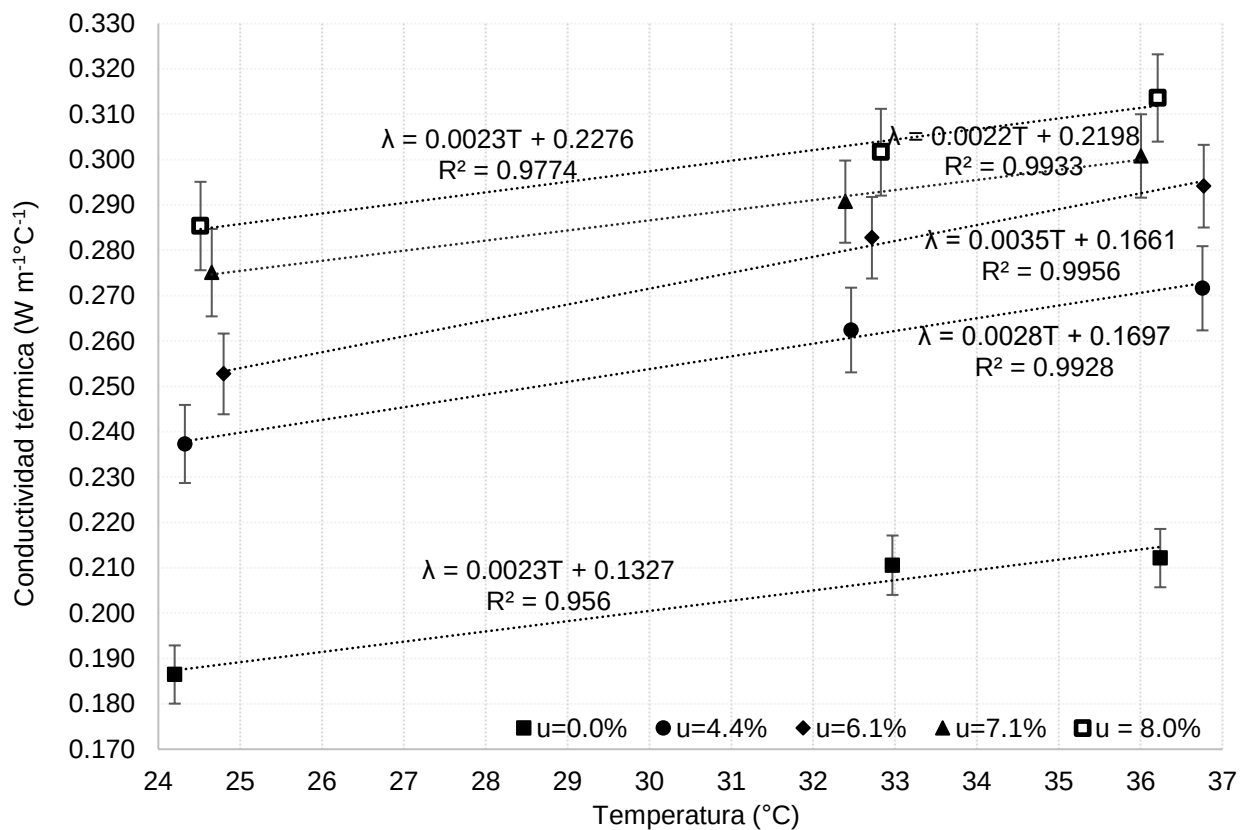


Figura 3.14 Valores de conductividad térmica a diferentes valores de contenido de humedad y de temperatura media y su correspondiente modelo de ajuste.

Escasos trabajos reportan la conductividad térmica en función del contenido de humedad de materiales a base de tierra. En uno de ellos, donde obtuvieron la conductividad térmica de ladrillos de arcilla no cocidos los resultados mostraron que la conductividad térmica incrementó de ~ 0.63 a $0.95 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ cuando el material pasó del estado seco a tener un contenido de humedad de $\sim 5.1\%$ [51]. En otro estudio donde caracterizaron un material a base de arcilla y cáñamo se obtuvo que la conductividad térmica del material seco incrementó de $0.08\text{-}0.010$ a $0.09\text{-}0.12 \text{ W m}^{-1}\text{C}^{-1}$ cuando la muestra fue expuesta a un ambiente de 50% de humedad relativa [17]. Comparando estos resultados reportados con los obtenidos en este trabajo, podemos observar que en el primer caso el incremento de la conductividad térmica (para ese contenido de humedad) parece ser mayor. En el segundo caso es confuso porque no reportan el contenido de humedad de la muestra sino un conjunto de resultados en un gráfico que no permite un análisis claro, debido a ello en líneas anteriores se expresó como un rango de valores.

3.5 Análisis de la transferencia de calor y humedad del material expuesto a las condiciones de aire exterior de un clima cálido sub-húmedo.

En las siguientes secciones se muestran las gráficas correspondientes a cada uno de los dos periodos de análisis: del 29 de enero al 1 de febrero de 2024 y, del 24 al 27 de marzo de 2024. Dentro de los principales aspectos analizados y que se han agregado en las gráficas, se encuentra la reducción de los picos de temperatura en el ambiente interior de cada celda, dentro del muro y en la superficie interna del muro, todos estos valores con respecto al pico de temperatura del ambiente exterior, así como el desfase temporal correspondiente. Se incluye también el comportamiento de la temperatura y humedad relativa del ambiente exterior, la irradiancia solar y la presencia de lluvias. De igual manera y por el enfoque comparativo del experimento, se ha incluido la diferencia en los picos de temperatura de las celdas entre sí. Para el presente análisis de resultados se ha considerado que la mayor influencia es por parte de la temperatura y humedad del aire exterior en comparación con el efecto de la irradiancia solar puesto que, la superficie externa del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* y del muro de bloques huecos de concreto tiene un recubrimiento color blanco con un valor de reflectancia solar de 82.2%. Asimismo, la superficie externa de cada cara aislada está recubierta con hojas de polietileno aluminizado (a fin de maximizar la reflectancia solar de estas caras). Como se mencionó en el capítulo 2, el muro del material a base de la mezcla *pak'luum* y el muro de bloques huecos de concreto están orientados hacia el este, de modo que reciben de forma directa la irradiancia solar alrededor de 3 y 5 horas durante la mañana.

En el Anexo I se muestran las gráficas por semana, desde el 10 de diciembre de 2023 hasta el 8 de junio de 2024, del comportamiento de la temperatura y de la humedad relativa del ambiente interior de cada celda experimental. Se incluyen también las condiciones externas de temperatura, humedad relativa, irradiancia solar y lluvia. En el Anexo J se presenta por cada día de este periodo, la diferencia de temperatura en °C entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura del ambiente interior. El Anexo K contiene el desfase temporal en horas entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura del ambiente interior. En el Anexo L se muestra la diferencia de temperatura en °C entre el pico de temperatura de la superficie externa y el pico de temperatura de la superficie interna de cada uno de los dos muros. En estos anexos hay datos faltantes, su ausencia se debió a fallas del suministro eléctrico y daños en algunos componentes de las tarjetas de adquisición y registro de datos por las temperaturas altas del ambiente exterior. En la Tabla 3.16 se resumen los principales resultados obtenidos del análisis de ambas celdas experimentales para los dos periodos de análisis.

Inicialmente es importante mencionar que, el comportamiento esperado para las características del experimento (ganancia de calor solo a través del muro que fue acoplado a una guarda con caras adiabáticas y herméticas), era que los picos de temperatura se presentasen primero en la superficie interna del muro y después en el interior de la celda, sin embargo nótese (Figura 3.15 y Figura 3.16) que en ambas celdas ocurrió un comportamiento inverso. Se considera que este comportamiento inesperado puede atribuirse a la posible existencia de infiltraciones en las celdas (por ejemplo entre el muro y su unión a la guarda, en la entrada del conjunto de sensores en la celda, y en las uniones entre las caras de la guarda). También puede atribuirse a la existencia de ganancia de calor a través de las caras de la guarda que si bien tienen una capa de aislamiento térmico, este aislamiento reduce, mas no elimina la ganancia de calor. A su vez, la función aislante de la guarda dificulta la pérdida del calor ganado en el interior. Se considera que todos estos aspectos en conjunto, pudieron haber influido en que los picos de temperatura en cada celda se presentasen primero en el interior, inclusive pudieron haber influido también en que estos picos en el interior fuesen los mayores. Es importante entonces tener en cuenta estos comportamientos en los resultados obtenidos de los muros y de las celdas experimentales así como en su interpretación.

3.5.1 Periodo 1 del 29 de enero al 01 de febrero del 2024. Días con valores bajos de temperatura ambiente.

En este periodo la temperatura de aire exterior (T_{amb}) alcanzó valores máximos entre 27 y 32°C y valores mínimos entre 15 y 21°C. Aunque se alcanzaron valores máximos de irradiancia solar entre 1000 y 1200 W m⁻², se pueden considerar como días nublados debido a su comportamiento (ver Figura 3.15) así como a los valores bajos de la temperatura de aire exterior. En estos días no se presentaron lluvias.

Comparado con los picos de temperatura del ambiente exterior:

- Los picos de temperatura dentro del muro del material a base de *pak'luum* (T_{m_t}) fueron 2.9-4.5°C menores y, dentro del muro de bloques huecos de concreto (T_{m_c}) fueron 1.0-2.3°C menores.

- Los picos de temperatura de la superficie interna del muro del material a base de *pak'luum* ($S_Int\ t$) fueron 1.9-3.6°C menores y los de la superficie interna del muro de bloques huecos de concreto ($S_Int\ c$) fueron 0.7-2.2°C menores.

- La temperatura en el interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* (T_{i_t}) fue desde 0.9°C (30 de enero) hasta 2.6°C menor (31 de enero). Mientras que, la temperatura en el interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto (T_{i_c}) fue entre 0.2°C (30 de enero) y 1.3°C menor (29 y 31 de enero).

De acuerdo a estos datos, a primera vista se podría decir que, las reducciones mayores de temperatura se encontraron dentro de los muros. Estas reducciones fueron disminuyendo en magnitud hacia el ambiente interior de las celdas. Comportamiento que está más diferenciado en la celda con el muro del material a base de *pak'luum* que en la celda con el muro de bloques huecos de concreto. Se observa también que después de presentarse los picos de temperatura en los diferentes puntos analizados de cada celda, estos valores sobrepasan los de la temperatura del ambiente exterior y, cerca de las 7-8 pm las temperaturas de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* incrementan ligeramente por encima de las que se presentan en la celda con el muro de bloques huecos de concreto hasta cerca de las 11 am donde vuelve a invertirse esta tendencia. Podemos atribuir este comportamiento a una inercia térmica mayor por parte del muro del material a base de *pak'luum*. En cuanto al desfase temporal que existe entre los picos de la temperatura del ambiente exterior y las celdas experimentales (Δt), el retraso menor se encontró en el ambiente interior de las celdas y el retraso mayor se obtuvo dentro de los muros. Esto es, los picos de temperatura se presentan primero en el interior de la celda. A su

vez, el retraso en el interior de ambas celdas fue muy cercano entre sí; la celda con el muro del material a base de *pak'luum* retrasó los picos de la temperatura del ambiente exterior hasta 3.9 h en su interior, y la celda con el muro de bloques huecos de concreto hasta 3.7 h. Mientras que, dentro de los muros, se alcanzó un desfase de hasta 5.2 h en el de tierra y de 4.0 h en el de bloques huecos de concreto. Como se mencionó al principio de esta sección, estos comportamientos podrían estar influenciados por la existencia de infiltraciones y de ganancias de calor de las caras aisladas de la celda. En el Anexo M se presenta el comportamiento de la temperatura de la superficie interior de dichas caras, donde se observa que los valores son mayores que la temperatura de la superficie interna de los muros.

La humedad relativa del ambiente exterior (HRamb) en esta semana de análisis fue muy variable; hay un día con valores máximos cercanos al 100% mientras que en otro día los valores máximos estuvieron entre 65 y 70%. Los valores mínimos se encontraron entre 40 y 60%. Se observó que, la mayor atenuación y reducción de los niveles de humedad relativa ocurrieron dentro del muro del material a base de *pak'luum* (HRm_t) donde se mantuvieron valores entre 68 y 72%. Mientras que, dentro del muro de bloques huecos de concreto (HRm_c) se mantuvieron entre 77 y 85%. Asimismo, en el interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* (HRi_t), se obtuvieron valores de humedad relativa entre 64 y 83% mientras que, en el interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto (HRi_c) estos valores se encontraron entre 78 y 94%. Se observó que la humedad relativa en el interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* fue hasta 15% menor que en el interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto.

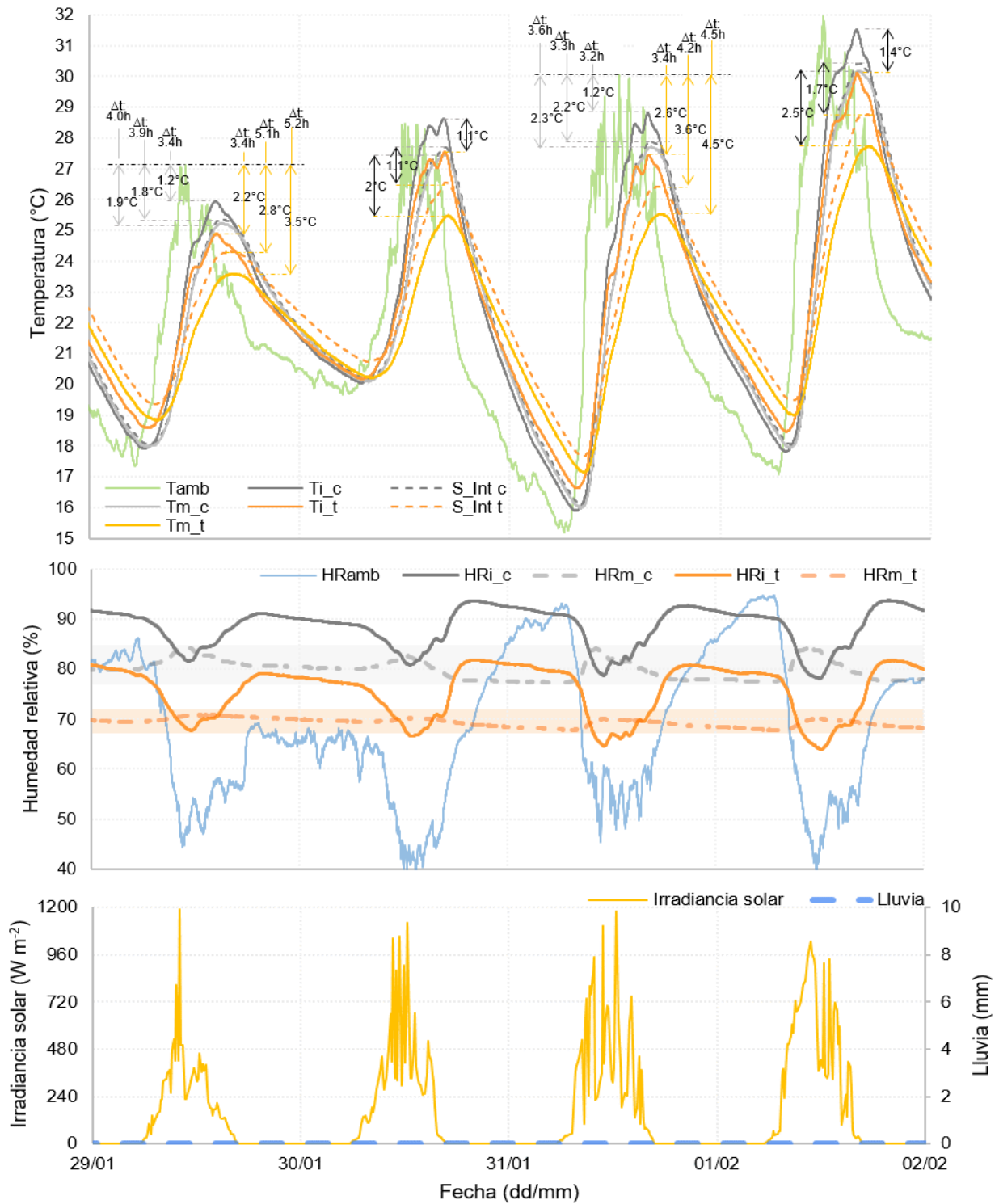


Figura 3.15 Comportamiento de las celdas experimentales del 29 de enero al 01 de febrero del 2024 (días con valores bajos de temperatura ambiente).

3.5.2 Periodo 2 del 24 al 27 de marzo del 2024. Días con valores altos de temperatura ambiente.

Como se observa en la Figura 3.16, en este periodo la temperatura de aire exterior (T_{amb}) alcanzó valores máximos entre 38 y 44°C, y valores mínimos entre 20 y 27°C. Los valores máximos de irradiancia solar fueron al menos de 1000 W m⁻² y se puede considerar que fueron días de cielo generalmente despejado sin presencia de lluvias. Comparados con los picos de temperatura de aire exterior:

- Los picos de temperatura dentro del muro del material a base de *pak'luum* (T_{m_t}) fueron 4-6.7°C menores. Dentro del muro de bloques huecos de concreto (T_{m_c}) se redujeron 1.7-3.9°C.
- Los picos de temperatura en la superficie interna del muro del material a base de *pak'luum* ($S_{_Int\ t}$) fueron 3.1°C-5.9°C menores y en la superficie interna del muro de bloques huecos de concreto ($S_{_Int\ c}$) fueron 1.6°C- 3.8°C menores.
- La temperatura en el interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* (T_{i_t}) fue en promedio 2.5°C menor; esta diferencia fue de hasta 4.3°C el 26 de marzo. Mientras que, en el interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto (T_{i_c}) fue en promedio 1°C menor, con una diferencia máxima de 2.7°C el día 26 de marzo. En este día, 26 de marzo, que se obtuvieron una de las mayores reducciones de los picos de temperatura en el ambiente interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* (en todo el periodo de registro de datos), es también uno de los días con las temperaturas de aire exterior más altas (hasta 44°C).

Con base a la observación directa de estos datos podría decirse que, las reducciones mayores de los picos de la temperatura de aire exterior ocurrieron dentro del muro y las reducciones menores en el interior de las celdas. Este comportamiento se distingue mejor en el caso de la celda con el muro del material a base de *pak'luum*, puesto que en el caso de la celda con el muro de bloques huecos de concreto, las temperaturas dentro del muro fueron muy cercanas a las temperaturas de la superficie interna del muro (nótese que las líneas correspondientes están casi superpuestas). Asimismo se observa que, las temperaturas en los diferentes puntos analizados en ambas celdas tienen valores más cercanos entre sí en el periodo previo y posterior a los valores máximos. Previo a los picos de la temperatura de aire exterior, las temperaturas en las celdas experimentales fueron menores a estas, no obstante, posterior a dichos picos este comportamiento se invirtió. Cerca de la media noche en la celda con el muro del material a base de *pak'luum* las temperaturas fueron incluso ligeramente mayores a las que se presentaron en la celda con el muro de bloques huecos de concreto hasta alrededor de las 8-10 am donde volvió a

invertirse esta tendencia. Esto último se puede atribuir a la capacidad de almacenamiento de calor de cada muro; el muro a base de tierra almacena una cantidad mayor de calor durante el incremento de temperatura de aire exterior, de esta forma al retener más calor en su interior reduce y retarda la entrada de calor al interior de la celda. Por lo tanto, cuando la temperatura de aire exterior inicia su descenso, el muro del material a base de *pak'luum* tiene una cantidad mayor de calor por liberar comparado con la cantidad que tiene que liberar el muro de bloques huecos de concreto, aunado a esto, el valor mayor de conductividad térmica que tiene el concreto facilita la transferencia del calor retenido.

Por otra parte, sobre el retraso temporal que existe entre los picos de temperatura de aire exterior y de las celdas experimentales (Δt), el retraso mayor se encontró en el interior del muro y el retraso menor en el interior de la celda (Figura 3.16). Esto es, los picos de temperatura se presentan primero en el interior de la celda. Esto podría atribuirse a la existencia posible de infiltraciones y a la influencia de las ganancias de calor por parte de las caras aisladas de la celda. En el Anexo M se presenta el comportamiento de la temperatura de la superficie interior de dichas caras, donde se observa que los valores son mayores que la temperatura de la superficie interna de los muros.. En el ambiente interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* los picos de la temperatura de aire exterior se retrasaron al menos 37 min. El tiempo de retraso mayor, 2.7 h, se obtuvo el 27 de marzo. No obstante, en los desfases temporales obtenidos dentro y en la superficie interna de los muros sí se obtuvieron diferencias notables. Siendo que, los retrasos mayores de los picos de temperatura se presentaron en el muro del material a base de *pak'luum*.

La humedad relativa de aire exterior en esta semana se encontró mayormente entre 35 y 90%. En la Figura 3.16, HRi se refiere a la humedad relativa en el interior y HRm a la humedad relativa dentro del muro, _t o _c indican si se trata de la celda con muro del material a base de *pak'luum* o de bloques huecos concreto, respectivamente. En dicha figura se observa que, la mayor atenuación y reducción de los picos de humedad relativa ocurrieron dentro del muro del material a base de *pak'luum* donde se mantuvo entre 55 y 60%. Dentro del muro de bloques huecos de concreto se encontró entre 65 y 74%. De igual forma, en el interior de las celdas, se obtuvo que la celda con el muro del material a base de *pak'luum* mantuvo valores de humedad relativa entre 56 y 69% y, en la celda con el muro de bloques huecos de concreto estos valores se encontraron entre 68 y 84%. En los picos de humedad se observa que en el interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* son hasta 15% menores que en el interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto.

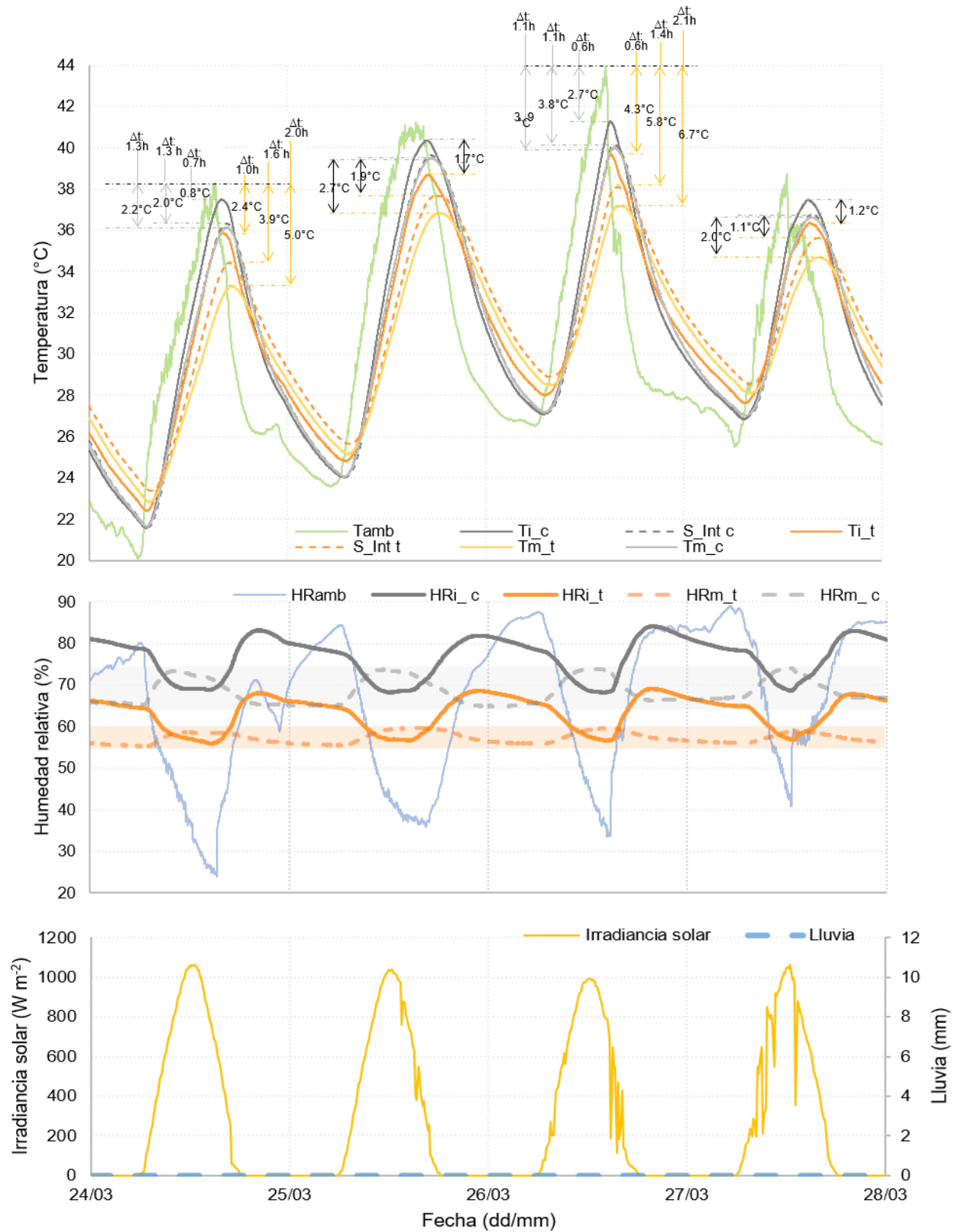


Figura 3.16 Comportamiento de las celdas experimentales del 24 al 27 de marzo del 2024 (días con valores altos de temperatura ambiente).

Tabla 3.16 Principales resultados obtenidos en los periodos analizados de las celdas experimentales.

Muro	Periodo	Ta _{máx} (°C)	Ta _{mín} (°C)	ΔT_m (°C)	ΔT_{si} (°C)	ΔTa_{e-i} (°C)	tr _m (h)	tr _{si} (h)	tr _{ai} (h)	HRa _{máx} (%)	HRa _{mín} (%)	ΔHR_m (%)	ΔHR_{ai} (%)
Tierra	29/01 al 01/02/24	27- 32	15- 21	2.9-4.5	1.9-3.6	0.9-2.6	3.5-5.2	3.2-5.1	0.6-3.9	65-98	40- 60	68-72	64-83
	24/03 al 27/03/24	38- 44	20- 27	4-6.7	3.1-5.9	2.4-4.3	2.0-3.9	1.4-3.7	0.6-2.7	90	35	55-60	56-69
Con- creto	29/01 al 01/02/24	27- 32	15- 21	1.0-2.3	0.7-2.2	-0.2-1.3	2.9-4.0	3.0-3.9	0.5-3.7	65-98	40- 60	77-85	78-94
	24/03 al 27/03/24	38- 44	20- 27	1.7-3.9	1.6-3.8	0.8-2.7	1.1-2.9	1.1-3.0	0.6-2.6	90	35	65-74	68-84

Ta_{máx}: valores máximos de temperatura del ambiente exterior

Ta_{mín}: valores mínimos de temperatura del ambiente exterior.

ΔT_m : diferencia de temperatura entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura dentro del muro.

ΔT_{si} : diferencia de temperatura entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura en la superficie interna del muro.

ΔTa_{e-i} : diferencia de temperatura entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura en el ambiente interior de la celda.

tr_m: el desfase temporal entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura dentro del muro.

tr_{si}: el desfase temporal entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura en la superficie interna del muro.

tr_{ai}: el desfase temporal entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura en el ambiente interior de la celda.

HRa_{máx}: valores máximos de humedad relativa en el ambiente exterior.

HRa_{mín}: valores mínimos de humedad relativa en el ambiente exterior.

ΔHR_m : rango de humedad relativa dentro del muro.

ΔHR_{ai} : rango de humedad relativa en el ambiente interior de la celda.

3.5.3 Comportamiento de la temperatura y humedad relativa en la celda con el muro del material a base de la mezcla *pak'luum*.

Hasta ahora el registro de datos comprende la temporada de invierno y primavera, periodo durante el cual en el aire exterior la temperatura ha ido incrementado y la humedad disminuyendo. Por ejemplo, en el mes de diciembre de 2023 se presentaron generalmente temperaturas entre 14 y 35°C y un rango de humedad entre 32 y 99%. En cambio en el mes de mayo de 2024 se presentaron temperaturas generalmente más altas, entre 25 y 45°C, y valores menores de humedad, entre 21 y 92%. La evolución gradual de ambas variables ha influido a su vez en un cambio gradual de la humedad relativa tanto en el interior de la celda como dentro del muro, lo cual se puede observar en el Anexo N donde se presenta el desarrollo de la humedad relativa dentro del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* y en el ambiente interior de la celda, así como la humedad relativa del aire exterior para los meses de diciembre a mayo. Se considera que, debido al incremento de la temperatura y a la disminución de la humedad del aire exterior, ocurrió un “proceso lento de secado”. Lo cual podemos observar con la disminución de la humedad dentro del muro y del ambiente interior. Nótese que en los datos iniciales, esto es, en diciembre, la humedad relativa del interior de la celda mostró valores entre 70-85%, y valores entre 60-80% dentro del muro (profundidad media). Mientras que, en el mes de abril, la humedad relativa del interior de la celda disminuyó a 49-62%, y a 40-57% dentro del muro. Sin embargo, se observó que dicho cambio gradual es alterado por incrementos repentinos de humedad ante la presencia de lluvias. Con la finalidad de analizar más a detalle lo mencionado anteriormente, se ha seleccionado dos periodos, uno de ellos es una semana de diciembre donde hubo lluvias. El otro periodo es una semana de abril donde no hubo lluvias. Además de la diferencia en la presencia de lluvias, otro de los aspectos principales de comparación es la diferencia en las condiciones de temperatura y humedad relativa del aire exterior entre ambos periodos. En la Figura 3.17 se presenta el comportamiento de la humedad relativa y de la temperatura dentro del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* y en el ambiente interior de la celda, así como las condiciones de aire exterior (temperatura, humedad relativa, irradiancia solar y velocidad del viento) correspondientes a ambos periodos. S1 indica el sensor más cercano a la superficie externa del muro (a 0.5 cm) y el S5 el sensor más próximo a la superficie interna del muro (a 0.5 cm), S2, S3, S4 son los sensores que se encuentran entre el S1 y S5. HRi y Ti se refieren a la humedad relativa y a la temperatura en el interior de la celda, HRamb y Tamb se refieren a la humedad relativa y la temperatura de aire exterior. La franja vertical de color azul claro indica la presencia de lluvia.

Las temperaturas en los cinco sensores dentro del muro (S1, S2, S3, S4, y S5) mostraron valores muy cercanos entre sí; con una diferencia máxima de 1.3°C entre el sensor con el valor mayor (S5) y el sensor con el valor menor (S1-S2). En el periodo de diciembre, los picos de temperatura se presentaron primero en el S1 y por último, entre 16 y 160 minutos después, en el S3 o S4. En el periodo de abril, los picos de temperatura también se presentaron primero en el S1, y por último, entre 50-100 minutos después, en el S3 o S4. Comparado con los picos de temperatura del aire exterior, los picos de temperatura en el ambiente interior de la celda fueron al menos 0.9°C menores en el periodo de diciembre, y al menos 1.7°C menores en el periodo de abril. En ambos periodos se alcanzaron reducciones de hasta 3.6°C . Como se observa en la Figura 3.17, los picos de temperatura en el interior de la celda fueron mayores que los picos de temperatura dentro del muro.

El comportamiento de la humedad relativa dentro del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* observado en ambos periodos, se puede plantear de la siguiente manera: cuando la temperatura del aire exterior se encuentra en su caída más pronunciada y la humedad del aire exterior se encuentra en un ascenso muy pronunciado, la humedad en el S1 comienza a aumentar pero de forma lenta. Cuando la temperatura del ambiente exterior alcanza su valor más bajo y la humedad su valor mayor, la humedad en el S1 continua aumentando pero ahora con más rapidez hasta alcanzar su valor máximo, después de lo cual empieza a disminuir rápidamente, durante este periodo en el aire exterior se presentan los valores mayores de temperatura y los valores más bajos de humedad. El ciclo del S1 se repite cuando la temperatura del aire exterior nuevamente se encuentra en su caída más pronunciada y la humedad del aire exterior en su incremento más pronunciado. Después de presentarse el pico de humedad en el S1 se presenta en el S2, posteriormente en el S3, S4, S5 y por último en el ambiente interior. Se observa que el mayor desfase temporal entre estos picos, se encuentra entre el momento en que se presenta el pico en el S3 y el momento en que se presenta el pico en el S4. Con el aumento en el desfase temporal también se incrementa la atenuación de los picos de humedad. De tal forma que en el S1 se obtuvieron los picos más pronunciados y en el S4-S5 los más atenuados. La caída de humedad en el S1 ocurre de forma más pronunciada comparada con la caída en el S3, S4, S5, y en el ambiente interior. En ambos periodos, diciembre y abril, se observa que para un día, una parte de la caída de humedad en el ambiente interior ocurre de forma gradual. La otra parte en la caída de humedad es de forma más pronunciada y ocurre durante el incremento de temperatura y la mayor caída de humedad de aire exterior. Se considera que el transporte de humedad a través del muro ocurre simultáneamente en ambos sentidos (desde el ambiente exterior hacia el

ambiente interior y viceversa). Lo cual se puede ver reflejado en dos comportamientos. Uno de ellos es que la ganancia de humedad en el S1 ocurre en dos partes, primero de una forma más gradual durante el incremento de la humedad de aire exterior y después de una forma más pronunciada cuando además se suma el aporte de humedad proveniente del ambiente interior (previo paso por el S5, S4, S3 y S2). En el otro comportamiento, podemos observar que los picos de humedad en el S2 son mayores que los picos de humedad en el S3, esto es resultado por una parte del aporte de humedad desde el aire exterior (previo paso por el S1) y, otra parte por el aporte de humedad desde el ambiente interior (previo paso por el S5, S4, y S3). No obstante, el S1 presentó los valores más bajos de humedad y los S4 y S5 los valores más altos, es decir, el S1 se encuentra en la parte más seca del muro y el S4 y S5 en la parte más húmeda. Esto se asocia por una parte al contenido de agua del muro (agua remanente de la utilizada en su elaboración) en el momento del ensamble de la celda experimental. La proximidad del S1 a las condiciones de ambiente externo (por ejemplo, las oscilaciones de temperatura y humedad, la irradiancia solar y el viento) ha favorecido al secado en esta profundidad del muro, mientras que, los S4 y S5 se encuentran a mayor profundidad en el muro y más cercanos al ambiente interior donde los valores de humedad son más altos que los que se presentan dentro del muro. Por otra parte, se considera que, los S4 y S5 además de la ganancia de humedad desde el aire exterior también se encargan de la ganancia de humedad proveniente de posibles infiltraciones en la celda. En este mismo sentido se puede plantear el comportamiento de la humedad en el ambiente interior, el cual está influenciado en parte por el transporte de humedad desde y hacia el ambiente exterior a través del muro del material a base de la mezcla *pak'luum* y, por otra parte por el aporte directo de posibles infiltraciones en la celda. Se considera que esto causa que, en el ambiente interior se tengan picos de humedad mayores que dentro del muro y las oscilaciones mayores (9-15%).

En la semana de diciembre se observó que, aunque la humedad del aire exterior presentó mayor variabilidad en sus valores máximos y mínimos durante el periodo, el rango de valores de la humedad relativa en el ambiente interior se mantuvo casi constante. Sin embargo, la presencia de lluvia (13 de diciembre) causó un incremento notable en la humedad dentro del muro (en todos los sensores) y en el ambiente interior de la celda. El S1 fue el primer sensor en mostrar un incremento en sus mediciones, después el S2 y S3 y finalmente el S4, S5. Dicho incremento fue mayor en el S1, S2 y S3 comparado con el S4 y S5. Se considera que el efecto de la lluvia en el ambiente interior ocurre primero de forma directa y luego en forma indirecta: nótese que la lluvia se presentó en el momento del día donde la humedad relativa alcanza sus valores mínimos, por

lo que el pico de humedad repentino que ocurrió en ese momento fue causado por la influencia de dicha lluvia. Después de ese pico, la humedad relativa del ambiente interior mantuvo su comportamiento igual a los días anteriores. No obstante se observa que, cuando el S4 y S5 empezó a mostrar un incremento en sus mediciones de humedad (al día siguiente de la lluvia), la humedad del ambiente interior comenzó también a mostrar un incremento en sus valores máximos. Cinco días después de la lluvia, la humedad relativa dentro del muro y en el ambiente interior de la celda empezaron a estabilizarse.

En cuanto a la semana de abril se observó que, los ciclos diarios de humedad relativa fueron casi constantes entre sí tanto dentro del muro como en el ambiente interior de la celda. Este comportamiento más uniforme se atribuye a la ausencia de lluvias y a una variabilidad menor en las condiciones de humedad y temperatura del aire exterior. Por otra parte, se puede observar que los rangos de valores de humedad dentro del muro y en el ambiente interior de la celda en el mes de abril son menores a los que se obtuvieron en el mes de diciembre. En otras palabras, el muro en el mes de abril estaba más seco en comparación con el mes de diciembre. Como se planteó anteriormente, este proceso de secado es favorecido por el aumento de la temperatura de aire exterior y de la irradiancia solar y, a su vez, por la disminución de la humedad de aire exterior. En la Figura 3.17 se observa también que la velocidad del viento en el periodo de abril fue mayor que en el periodo de diciembre, lo cual también podría haber influido positivamente a dicho secado.

Se puede considerar que la profundidad a la que se encuentra el S3 es como “el espesor efectivo”, es decir, es el espesor del muro que interactúa principalmente con las condiciones del ambiente exterior o hasta donde ocurre el mayor intercambio y amortiguamiento de humedad. Planteando a la lluvia como un estímulo fuerte de humedad, se pudo observar que su efecto en el muro fue mayor y ocurrió primero en el S1, S2 y S3 comparado con el efecto menor y tardío en el S4 y S5. Por lo que, resultaría interesante analizar un muro del material a base de la mezcla *pak’luum* con un espesor de al menos 0.05 m (profundidad a la que se encuentra el S3) hasta 0.08 m (profundidad a la que se encuentra el S4). Esto con el fin de identificar el espesor mínimo que proporciona el desempeño más favorable en la regulación de la humedad y de la temperatura.

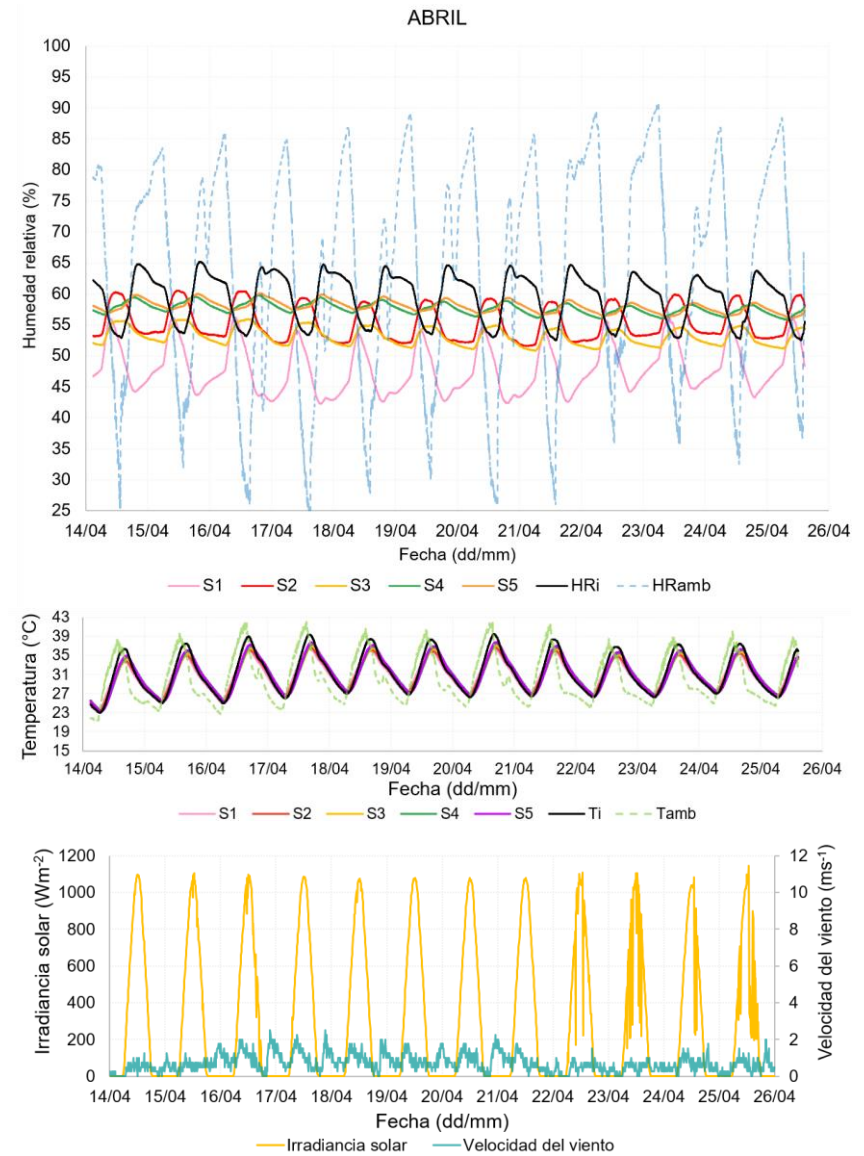
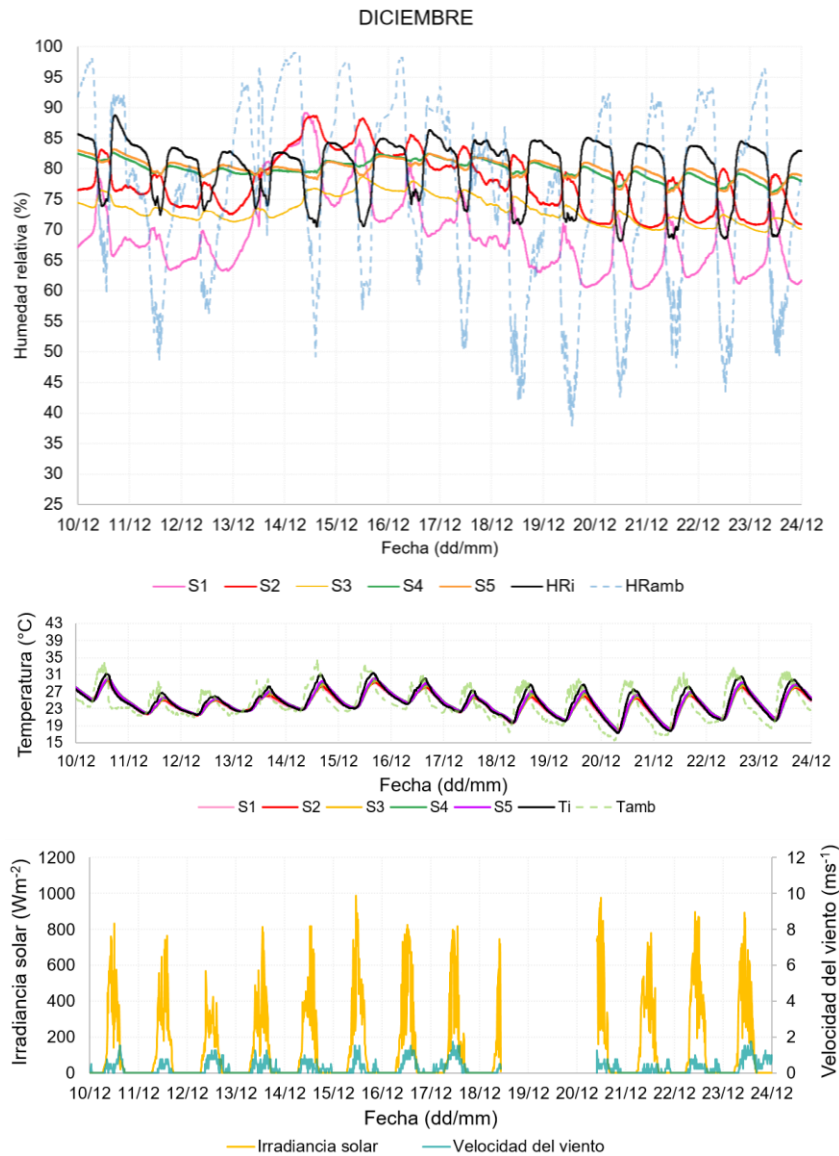


Figura 3.17 Comportamiento de temperatura y humedad relativa de las celdas experimentales bajo las condiciones de ambiente exterior de unas semanas de diciembre de 2023 y unas semanas de abril de 2024.

En la Tabla 3.17 se presentan los resultados principales obtenidos para los dos periodos analizados inicialmente (una semana con temperaturas bajas y otra semana con temperaturas más altas) así como los resultados reportados en la literatura sobre otros materiales a base de tierra. Sin embargo es fundamental tener en claro que no se puede hacer una comparación directa entre los resultados puesto que, en los trabajos reportados analizaron edificios en uso o experimentales a escala real y en este trabajo donde se analizó un muro a escala reducida acoplado a una celda experimental, los resultados no fueron escalados a una edificación de tamaño real ni fueron calculados los correspondientes números adimensionales. No obstante, de contar con dicho análisis de escalamiento, para realizar la comparación entre los resultados se tendría que tener en cuenta también que, en los edificios analizados en la mayoría de los trabajos de la literatura toda la envolvente (muros, techo) está construida del material a base de tierra, incorpora materiales aislantes en algunos componentes, o involucra otras variables como ventilación mecánica o natural, o diferente orientación.

Por lo que, la finalidad de presentar la Tabla 3.17 es mostrar una recopilación de investigaciones enfocadas en analizar el comportamiento de otros materiales y técnicas de construcción con tierra. Como se puede observar en la Tabla 3.17, se resumen algunas características y resultados de las investigaciones, incluido este trabajo.

Tabla 3.17 Principales resultados obtenidos de las celdas experimentales y resultados reportados en la literatura.

Referencia	Técnica de construcción	Tipo de construcción	Espesor (cm)	Λ ($\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) / U ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$)	Condiciones ambientales / clima	Principales resultados
Este trabajo	Tierra compactada (muro de relleno)	Prototipo experimental a escala reducida	10	0.24-0.31 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	Tropical cálido con lluvias en verano (Aw) Ta _{máx} : 27-32°C, Ta _{mín} : 15-21°C, I _{máx} : 1200 Wm^{-2} , HRa: 40-98%. Ta _{máx} : 38-44°C, Ta _{mín} : 20-27°C, I _{máx} : 1050 Wm^{-2} , HRa: 35-90%.	Tai _{máx} : 26-30°C, ΔTa_{e-i} : 2.2-4.3°C, tr: 0.6-3.9 h, HR _{ai} : 64-83%. Tai _{máx} : 36-40°C, ΔTa_{e-i} : 2.2-4.3°C, tr: 0.6-2.7 h, HR _{ai} : 56-69%.
[113]	Tierra vertida compactada	Edificio en uso	25	0.71 $\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$	Tropical de sabana (Aw) Ta: 26-32°C.	ΔTa_{e-i} : 8°C.
[112]	Ladrillo de arcilla y cáñamo	Edificio experimental	30	0.27-0.32 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	Semiárido cálido Ta: 18-40°C HRa: 20-90% I _{máx} : 1000 Wm^{-2}	T _{ai} : 28.5-32.5, HR _{ai} : 33-42%.
[18]	Ladrillo	Edificio en uso	40	0.93 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	Desértico continental en zona templada cálida. Ta: 24-38°C, HRa: 20%.	T _{ai} : 31-35°C, HR _{ai} : 20-42%.
[114]	Tierra apisonada	Edificio en uso	30	-	Subtropical húmedo sin estación seca y verano cálido (Cfa). Ta: 17-31°C (verano)	Tm: 23.7°C (73% del tiempo analizado)
[115]	BTC	Muro experimental	14	0.55 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	Semiárido cálido (BSh) Ta: 25-40°C	FD: 43%, tr: 6.7 h.
[116]	Adobe	Edificio en uso	55	-	Árido-cálido (Bwh) Ta: 22-37°C (verano e invierno)	FD: 0.01-0.05, tr: 12-17 h.
[70]	Ladrillos de tierra secados al sol	Edificio experimental	18	1.15 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	Ecuatorial Ta: 10-35°C HRa: 0-80%	Tai _{máx} : 24°C Tai _{mín} : 17°C HR _{ai} : 40-60%

Tabla 3.17 Principales resultados obtenidos de las celdas experimentales y resultados reportados en la literatura. Continuación...

Referencia	Técnica de construcción	Tipo de construcción	Espesor (cm)	Λ ($\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) / U ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$)	Condiciones ambientales / clima	Principales resultados
[69]	Tierra apisonada	Edificio experimental	50	-	Mediterráneo con veranos cálidos (Csa). Ta: 17-25°C	ΔT_{si} : 2°C, FD: 0.20.
			29		Continental mediterráneo (Csa/Cfa). Ta: 11-31°C	ΔT_{si} : 3.5°C, FD: 0.23.
[69]	Tierra apisonada	Edificio en uso	50	1.58 $\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$	Semiárido templado y frío (Bsk) Ta: 18-30°C	FD: 0.08, tr: 5-8 h.
[69]	BTC	Edificio en uso	40	-	Árido templado-frío (BWk) Ta: 26-38°C	T_{ai} : 0.5-2.5°C de oscilación.
[69]	Adobe + ladrillos estabilizados	Edificio en uso	36	1.40 $\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$	Semiárido cálido (BSh) Ta: 22-39°C.	FD: 0.33 (invierno) y 0.28 (verano).
[69]	Adobe	Edificio experimental	50	-	Semiárido cálido (BSh) Ta: 20-32°C.	FD: <0.05, tr: 5 h.
[69]	Adobe	Edificio en uso	30 (muro) 15 (techo)	-	Árido templado-frío (BWk) Ta: 13-32°C (verano)	T_{ai} : 1.5°C de oscilación, FD: 0.29, tr: 3-4 h
[67]	Tierra apisonada	Edificio en uso	50	0.60-2.40 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ (seco-recién construido)	Ta: 2-23°C $I_{\text{máx}}$: 190 Wm^{-2}	T_{ai} : 16-25°C (promedio mensual), tr: 6-9 h. DF: 0.09-0.20
[117]	Tierra aligerada + cob	Edificio experimental	50-70	-	Ta: 1-22°C HRa: 60-100%	T_{ai} : 17-25°C, HR _{ai} : 60-80%
[118]	Tierra apisonada estabilizada	Edificio en uso	17.5 + 5 de aislante	0.64 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$ (seco)	Ta: 2-13°C (Leicester, Reino Unido)	T_{ai} : 1-10°C, HR _{ai} : 68-95%.

Tabla 3.17 Principales resultados obtenidos de las celdas experimentales y resultados reportados en la literatura. Continuación...

Referencia	Técnica de construcción	Tipo de construcción	Espesor (cm)	Λ ($\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) / U ($\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$)	Condiciones ambientales / clima	Principales resultados
[69]	Tierra apisonada	Edificio experimental	30	-	Árido-cálido (Bwh) Ta: 6-33°C	FD: 0.10-0.19, tr: 0.3-1.5 h.
[69]	Ladrillo de arcilla no cocido	Prototipo experimental	46-60	0.90 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	Oceánico templado (Cfb) Ta: 14-23°C	FD: 0.2, tr: 10 h.
[69]	Adobe	Edificio experimental	7.5	1.50-2.20 $\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$	Mediterráneo de veranos secos y cálidos (Csb). Ta: 11-20°C.	FD: 0.6-0.7, tr: 2-3.25 h.
[69]	BTC	Edificio experimental	14 + 18 de aislante	0.79 $\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	Oceánico templado (Cfb) Ta: -3-23°C	T _{ai} : 3.1°C de oscilación, FD 0.18, tr: 2 h.
[69]	Adobe	Edificio en uso	15	1.50 $\text{W m}^{-2}\text{°C}^{-1}$	Mediterráneo de veranos secos y cálidos (Csb). Ta: 5-26°C (verano) Ta: -1-15°C (invierno)	FD: 0.12 (invierno) y 0.13 (verano), HR _{ai} : 30-70%.

U: transmitancia térmica

Ta_{máx}: Temperatura máxima de ambiente exterior

Ta_{mín}: Temperatura mínima de ambiente exterior

I_{máx}: Irradiancia solar máxima

HRa: Humedad relativa de ambiente exterior

T_{ai}: Temperatura de ambiente interior

Tai_{máx}: Temperatura máxima de ambiente interior

Tai_{mín}: Temperatura mínima de ambiente interior

ΔT_{si} : amplitud en la temperatura de la superficie interna

ΔT_{a-e-i} : Diferencia entre el pico de temperatura de ambiente exterior y el pico de temperatura de ambiente interior

HR_{ai}: Humedad relativa de ambiente interior

tr: Desfase temporal entre el pico de temperatura de ambiente exterior y el pico de temperatura de ambiente interior

FD: Factor de decremento, $(T_{ai_máx} - T_{ai_mín}) / (T_{a_máx} - T_{a_mín})$

BTC: Bloque de tierra comprimida.

3.5.4 Escenario de análisis sobre confort higrotérmico.

En la Figura 3.18 y Figura 3.19 se presentan los valores de PMV y PDD obtenidos para el caso hipotético donde en el interior de un edificio cualquiera se presentaron las condiciones de la celda con el muro a escala del material a base de la mezcla *pak'luum* (PMV_tierra y PPD_tierra) y en otro edificio (con las mismas características constructivas y dimensiones que el otro edificio) las condiciones de la celda con el muro de bloques huecos de concreto (PMV_concreto y PPD_concreto). Aunque la diferencia máxima en la temperatura interior entre uno y otro edificio fuese de 1.4°C (misma diferencia que se observó entre el interior de las celdas para el periodo analizado), una condición de aire interior más seco en uno de los edificios (como ocurrió en el interior de la celda del muro a escala reducida del material a base de la mezcla *pak'luum*) causaría que la sensación de incomodidad y el porcentaje de personas insatisfechas fuese generalmente menor. La sensación de incomodidad sería mayor o más extrema en el otro edificio cuyo interior estuviese entre 11-15% más húmedo (como ocurrió en el interior de la celda del muro a escala reducida de bloques huecos de concreto). Se puede observar que en ambos periodos la sensación de incomodidad sería mayor o más extrema (hasta un 28% más de personas insatisfechas) en el edificio que tuviese los valores de temperatura y humedad que se presentaron en el interior de la celda con el muro a escala de bloques huecos de concreto.

Es importante resaltar que los resultados obtenidos de este planteamiento no deben ser asociados directamente a un caso de aplicación real del material de tierra o concreto debido a que no se realizó el escalamiento correspondiente el cual se encuentra fuera del alcance de este proyecto.

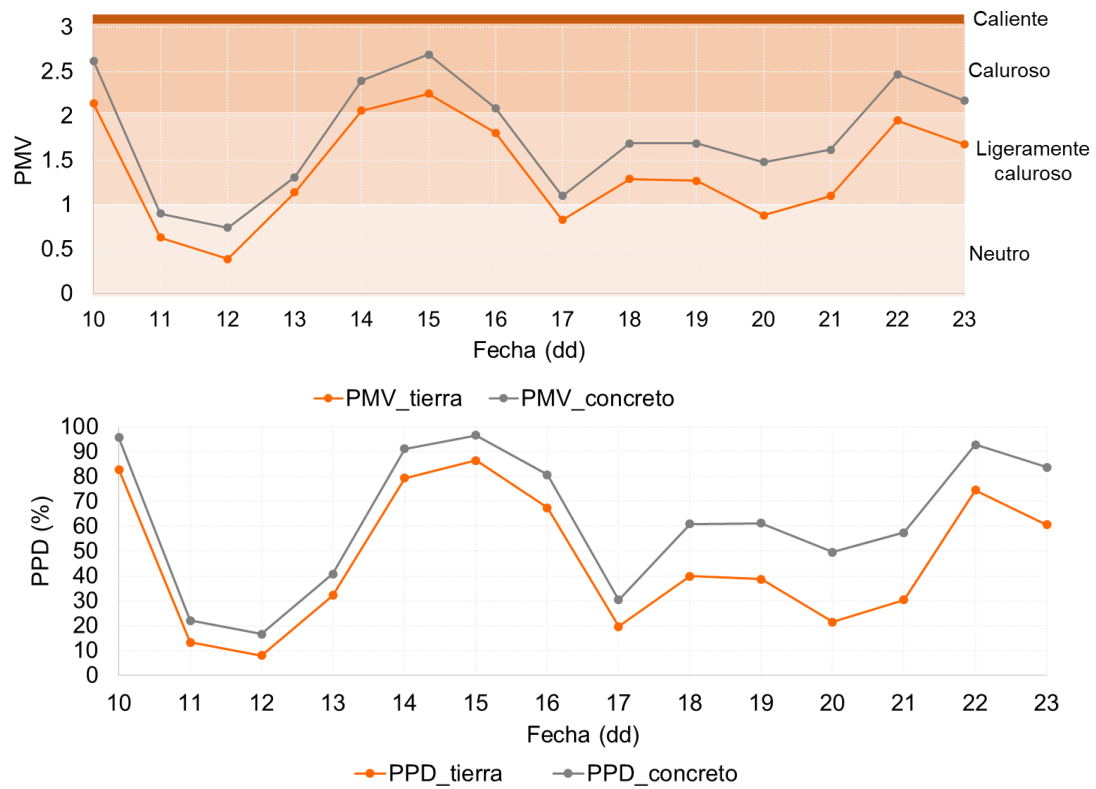


Figura 3.18 PMV y PPD calculado para un periodo de diciembre.

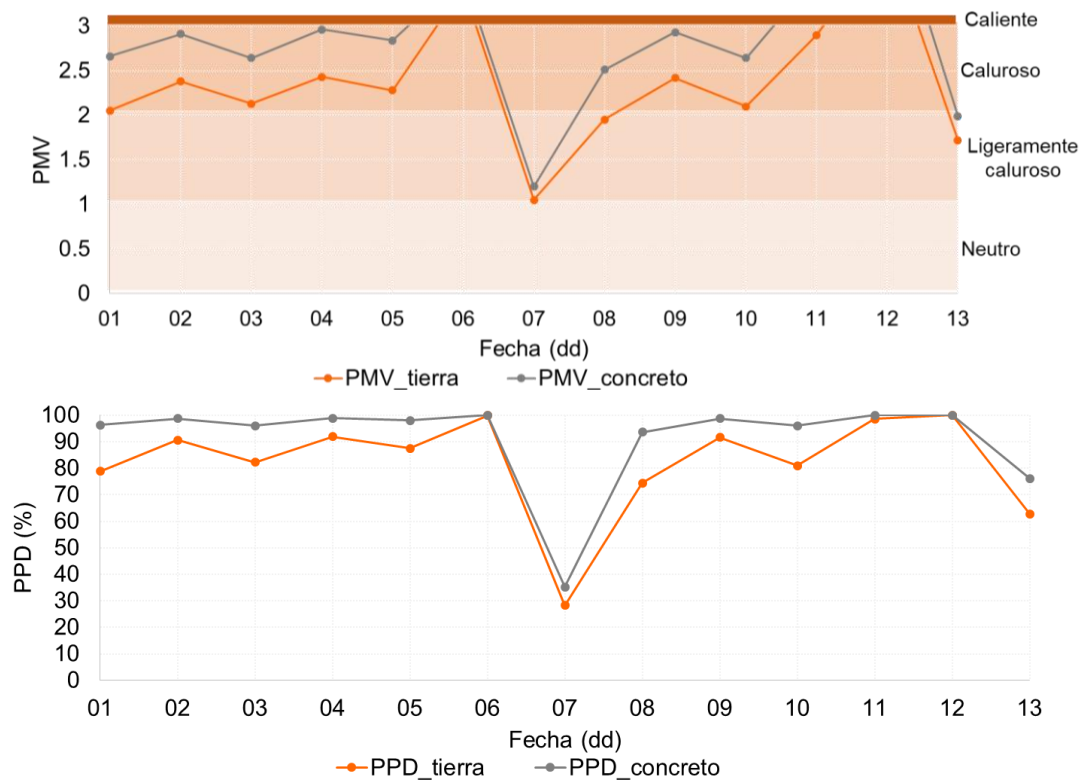


Figura 3.19 PMV y PPD calculado para un periodo de enero.

3.6 Análisis numérico de la transferencia de calor en las celdas experimentales.

En el Anexo O se presentan los valores medidos y simulados de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales de enero a mayo de 2024. En la Figura 3.20 y Figura 3.21 se muestra la diferencia entre la temperatura de ambiente interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto con respecto a la celda con el muro del material a base de la mezcla *pak'luum* (ΔT_{ai}) para los valores experimentales y para los valores simulados del mes de febrero y del mes de mayo. En la Tabla 3.18 se muestra la diferencia máxima, mínima y promedio obtenida de cada mes analizado. Al comparar los resultados de la ΔT_{ai} máxima y de la ΔT_{ai} mínima entre el caso de simulación y el caso de las mediciones experimentales, se observaron variaciones de 6 y 13%. Esta variación entre los resultados experimentales y los numéricos además de los errores propios de la solución numérica, en el caso de la celda con el muro de bloques huecos de concreto, se atribuye a las consideraciones del modelo, por ejemplo, que el muro es un medio continuo y homogéneo. En el caso de la celda con el muro del material a base de la mezcla *pak'luum* se atribuye también a que no se consideró la transferencia de humedad. Por lo que los resultados obtenidos en la simulación podrían ofrecernos una estimación aceptable del comportamiento térmico de las celdas para el periodo en el que no se cuentan con datos experimentales.

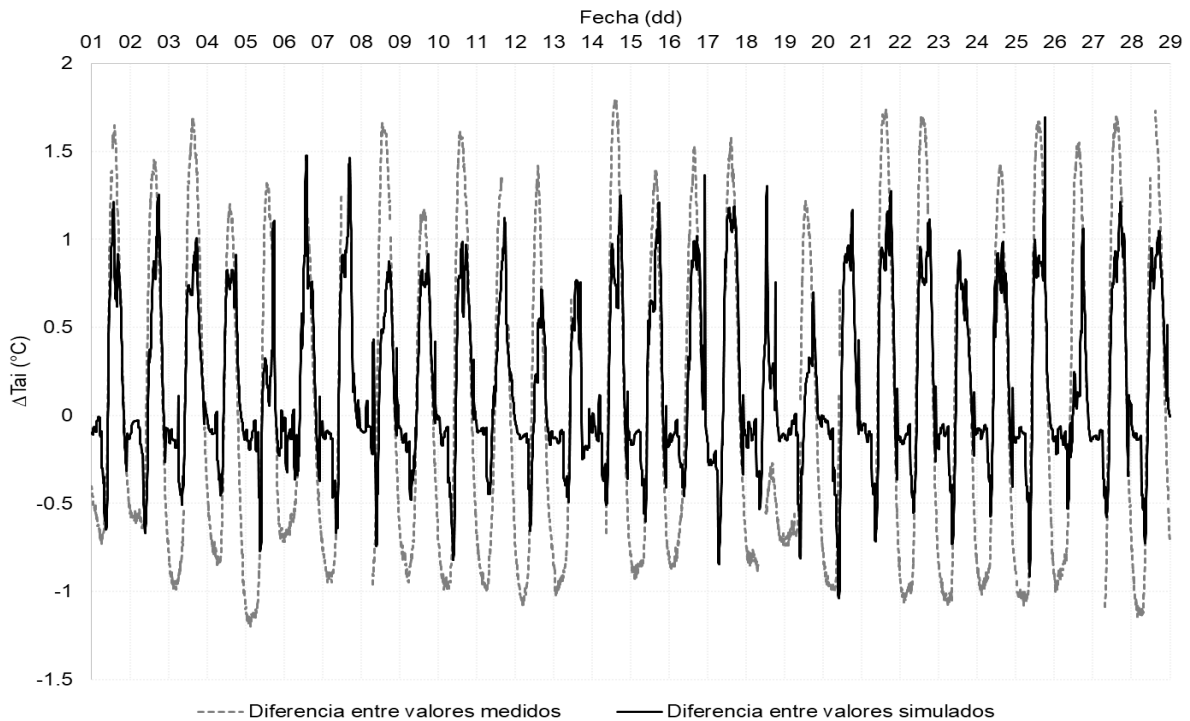


Figura 3.20 ΔT_{ai} de los valores medidos y ΔT_{ai} de los valores simulados de las celdas experimentales en el mes de febrero de 2024.

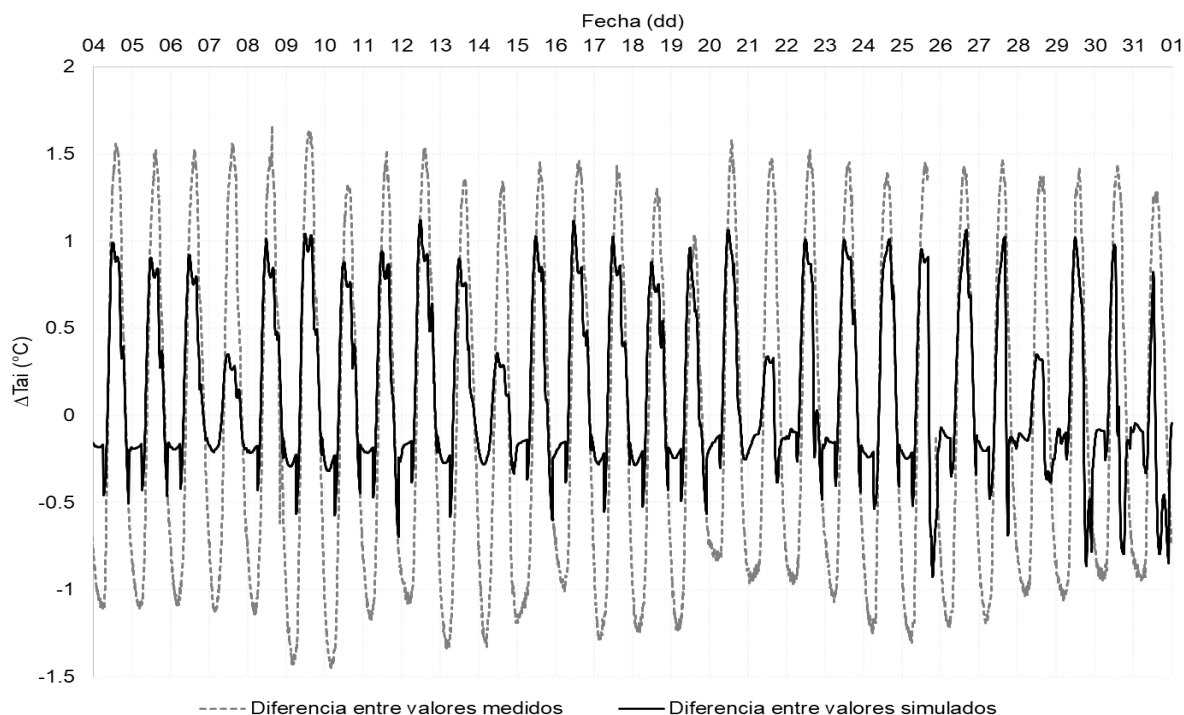


Figura 3.21 ΔT_{ai} de los valores medidos y ΔT_{ai} de los valores simulados de las celdas experimentales en el mes de mayo de 2024.

Tabla 3.18 Comparación entre la ΔT_{ai} calculada a partir de los resultados experimentales y simulados para los meses de febrero y mayo.

ΔT_{ai}	Febrero		Mayo	
	Valores experimentales	Valores simulados	Valores experimentales	Valores simulados
Valor máximo (°C)	1.80	1.69	1.93	1.12
Valor mínimo (°C)	-1.20	-1.04	-1.45	-0.93
Valor promedio (°C)	-0.20	0.16	-0.04	0.13

Al comparar los resultados de ΔT_{ai} (máximo, mínimo y promedio) entre los valores experimentales y los valores simulados se observaron diferencias desde 0.1 hasta 0.8°C. Zhang et al. [18] realizaron un análisis numérico sobre el comportamiento higrotérmico de ladrillos de tierra (no cocidos) bajo un clima desértico usando el mismo software de simulación que en el presente trabajo, es decir, EnergyPlus. El modelo fue validado mediante el monitoreo durante dos días de un edificio existente (tamaño real). Comparando los valores de temperatura de ambiente interior entre ambos resultados se observaron valores promedio de los errores absolutos de 0.2 a 0.4°C. Nótese que el periodo para el cual se comparan los datos experimentales y los datos simulados en [18] es muy corto (dos días) comparado con los periodos analizados en este trabajo (un periodo de 28 días y otro de 27 días). No obstante, las diferencias obtenidas en la comparación son cercanas. Allison y Hall [118] analizaron el comportamiento higrotérmico de muros de tierra apisonada mediante el monitoreo experimental de una habitación y mediante

simulación computacional (usando WUFI Plus). Aunque no se menciona información sobre el error, a partir de los resultados mostrados gráficamente sobre la temperatura del ambiente interior durante cuatro meses se observó una diferencia entre ambas soluciones de 0.2 hasta 2°C. En el trabajo reportado por Fohagui et al. [70] donde analizaron experimental (habitación a escala) y numéricamente (mediante un modelo eléctrico) el comportamiento de la temperatura (en la superficie interna de un muro) de ladrillos de tierra secados al sol, obtuvieron valores promedio de los errores absolutos entre 0.6-0.9°C para un periodo de 24 h. Si bien en los dos últimos trabajos mencionados anteriormente no se utilizó el software EnergyPlus, los materiales analizados son a base de tierra por lo que se consideró relevante incluirlos.

En el Anexo P se encuentra el comportamiento térmico del ambiente interior de las celdas experimentales resultante de la simulación para el periodo en el que no se cuentan con datos experimentales, esto es, desde junio a noviembre de 2024. En la Figura 3.22 se comparan los resultados entre ambas celdas mediante la diferencia de los valores obtenidos en la celda con el muro de bloques huecos de concreto con respecto a los valores obtenidos en la celda con el muro del material a base de *pak'luum*. Como se observa, generalmente la temperatura en el ambiente interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* es menor que en el ambiente interior de la celda con el muro de bloques huecos de concreto con una diferencia de hasta 1.5°C, la cual se encuentra dentro del mismo rango obtenido en los resultados experimentales. Nótese que también hay valores negativos mayormente entre -0.1 y -0.5°C, lo cual indica que en ciertos momentos la temperatura en el interior de la celda con el muro del material a base de *pak'luum* es mayor que en la celda con el muro de bloques huecos de concreto, lo cual también se observó en el análisis experimental que ocurría desde las primeras horas de la noche hasta el amanecer.

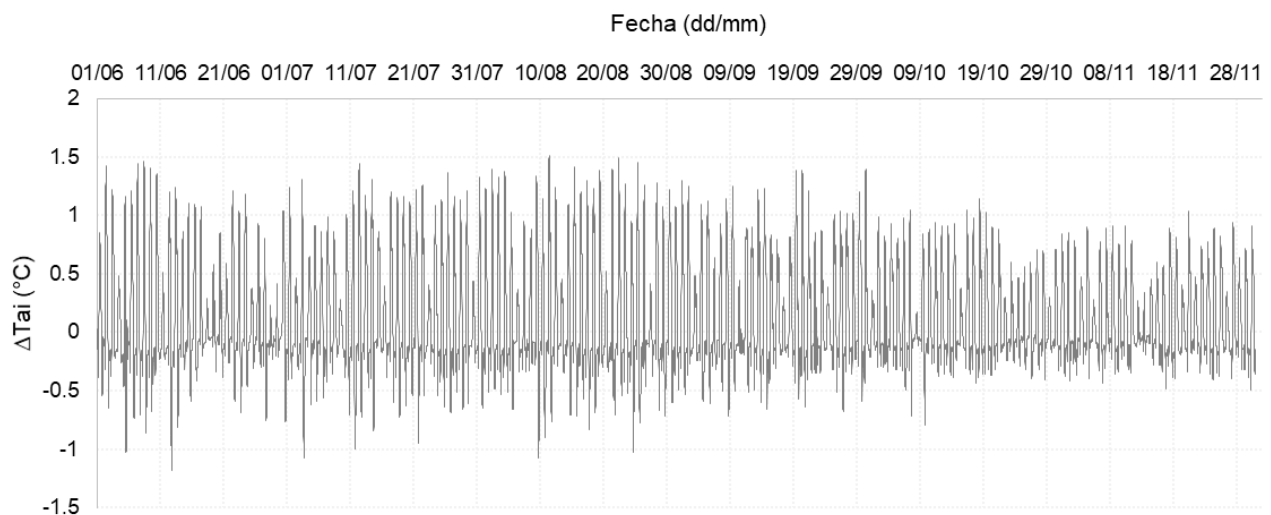


Figura 3.22 ΔT_{ai} calculado a partir de la simulación de las celdas experimentales para el periodo junio-noviembre de 2024.

3.7 Impacto del proyecto en el rescate de la práctica maya vernácula de construcción con tierra.

A pesar de que la práctica de construcción vernácula despierta interés en la comunidad científica, que ha producido, desde principios de la década de los 2000, un número creciente de artículos científicos publicados, su edificación aún se encuentra en decadencia [119,120], incluidas las técnicas de construcción con tierra [121]. Detrás de tal paradoja, se hace evidente la necesidad de ir más allá de las investigaciones académicas y difundir los hallazgos fuera de la comunidad científica, generar conciencia pública y atraer la atención de los profesionales de la construcción y los tomadores de decisiones con propuestas basadas en datos que consideren factores socioculturales, económicos y de sostenibilidad.

En el contexto de la península de Yucatán, la Tabla 3.19 presenta una colección de elementos que han contribuido al declive de la práctica vernácula de construcción con tierra, y que pueden agruparse principalmente en 6 categorías: técnicas, ambientales, organizacionales, políticas, sociales, y económicas.

Tabla 3.19. Análisis de barrera para la mezcla *pak'luum* y la técnica de *bahareque*.

Tipo de barrera	Barrera
Técnicas	Experiencia requerida para la selección y adquisición de los componentes así como para la ejecución de la técnica de construcción. Mayor complejidad de la técnica de construcción comparada con los sistemas constructivos prefabricados. Tiempo de construcción más largo. Mantenimiento preventivo y correctivo más cuidadoso. Revisión de que el sitio de extracción no esté afectado por actividades contaminantes. Baja resistencia del material a base de tierra al contacto directo con agua. Infestación de roedores, termitas e insectos. Desconocimiento de las propiedades físicas de los componentes. Desconocimiento y dificultad para evaluar de forma práctica el comportamiento higrotérmico y su efecto en el confort. Dificultad para la adaptación a los servicios (electricidad, agua, fibra óptica).
Ambientales	Carencia y/o dificultad para el abasto de algunos componentes utilizados originalmente como la madera y la palma. Uso agrícola del <i>kankab</i>.

Tabla 3.19. Análisis de barrera para la mezcla *pak'luum* y la técnica de *bahareque*. Continuación...

Tipo de barrera	Barrera
Organizacionales	Falta de interés en la enseñanza - aprendizaje de los conocimientos y habilidades involucrados en la técnica de construcción. Falta de interés en emplearse en las etapas de construcción (recolección y tratamiento de los componentes, armado, mantenimiento) causado en parte por la baja demanda. Falta de conocimiento sobre los cuidados, limitaciones de uso por parte de los usuarios recientes y de los técnicos de servicios (electricidad y agua). Falta de cursos o talleres para el aprendizaje de la técnica de construcción. Las carreras técnicas y profesionales relacionados con el área de la construcción no involucran temas de construcción con tierra ni fomentan la búsqueda de alternativas para su adaptación en la construcción contemporánea.
Políticas	Falta de normas de carácter obligatorio en tema de regulación del impacto ambiental de los materiales de construcción. Falta de incentivos o apoyos gubernamentales que motiven el uso de materiales y sistemas constructivos de bajo impacto ambiental y en línea a los principios de economía circular. Falta de estándares nacionales sobre caracterización de materiales a base de tierra que comprendan la determinación del potencial higroscópico. Los planes de acción contra el déficit de vivienda no contemplan como alternativas prioritarias soluciones ecológicas y que contribuyan pasivamente en el confort térmico. Prejuicios y percepción de calidad inferior, de primitiva y obsoleta, no higiénica, poco estética, dirigida a comunidades en condición de pobreza. Falta de conciencia sobre sus atributos y de la variedad de beneficios que ofrece.
Sociales	Sesgo por los materiales modernos. Falta de demanda. Mercado constructivo dominado por sistemas y materiales prefabricados. Subsidios de energía eléctrica. Falta de promoción de la construcción colectiva y comunitaria entre los propios habitantes. Mano de obra más cara debido al esfuerzo y complejidad requerida, aunado a tiempos de construcción más largos. Falta de estudios económicos que respalden el costo total de su ciclo de vida así como la falta de investigación sobre su impacto en la economía circular. Proceso de toma de decisiones altamente influenciado por la relación costo-efectividad.
Económicas	

La Tabla 3.19 se inspiró en el análisis y clasificación de barreras de Morel et al. [122], Morel y Charef [123] y Pelé-Peltier et al. [124], que se aplica aquí a la mezcla *pak'luum* y a la técnica de *bahareque* utilizadas para la construcción de la casa maya vernácula en la península de Yucatán, México. Para rescatar el cúmulo de conocimientos que guarda esta técnica, validada empíricamente a lo largo de los siglos de su desarrollo, es necesario soluciones que encaren los diversos sectores. Una solución es la búsqueda de un material o sistema constructivo que

conservar a la tierra *kankab* como uno de los componentes principales abordando como punto base las barreras técnicas y ambientales. Es decir, proponer una alternativa que cubra con las siguientes características: sustentable, disponible, asequible, de baja energía incorporada, con respuesta amortiguadora a condiciones ambientales de alta temperatura y humedad, de técnica no compleja, de dimensiones no masivas sino acorde con los espesores de las edificaciones modernas lo cual a su vez ayude a reducir los tiempos de construcción asociados a los muros masivos de tierra (y en consecuencia influyan en la reducción de costos), que sea resistente o que cuente con protección contra el contacto directo con el agua e irradiación solar alta pero sin afectar su concepto de material sustentable, que sus componentes sean de fácil acceso y disponibilidad, alineada a un modelo de economía circular. Este proyecto al abordar una de las barreras técnicas principales (caracterización de sus propiedades), ofrece un respaldo sobre el potencial del *kankab* y preliminarmente demuestra que vale la pena trabajar en soluciones que ayuden a superar los diferentes tipos de barreras que afectan el uso de este tipo de materiales. Sin embargo, se considera que otro de los pilares necesarios para respaldar su promoción es contar con evidencias cuantitativas de su impacto ambiental, por ejemplo mediante un análisis del ciclo de vida con el enfoque “cuna a cuna”. Asimismo es necesario documentar su factibilidad económica tomando en cuenta todos los costos involucrados donde se incluya el impacto de la eficiencia energética. Es indispensable difundir con argumentos, dentro y fuera del ámbito académico, principalmente en la formación académica y profesional de las personas involucradas en las diferentes fases constructivas, la importancia, el valor y los beneficios de este tipo de construcción de modo que se despierte el interés en la suma de esfuerzos por rescatar esta práctica y continuar su proceso de evolución conservando su esencia sustentable, de confort y significado cultural.

Una forma de difundir públicamente las cualidades que ofrecen los materiales a base de tierra, es su presencia y adaptación moderna en edificaciones públicas como son escuelas, oficinas gubernamentales, parques o centros recreativos o culturales. Lo cual ayudaría a superar los prejuicios sociales atribuidos erróneamente a ellos. Para superar las barreras políticas, considerado como un sector estratégico para lograr un empuje mayor en la adopción sería de este tipo de materiales se plantea necesario la implementación de normas de carácter obligatorio en materia de regulación del impacto ambiental de los materiales y sistemas constructivos, respaldado con certificaciones, incentivos, financiamientos y programas de vivienda. Estimular y facilitar el acceso a edificaciones y materiales a base de tierra, influirá en el incremento de la demanda, y a su vez, en el interés de aprender y emplearse en las técnicas asociadas, o en su

caso, también promover la construcción colectiva y comunitaria entre los propios habitantes. La creación de cursos, talleres y material didáctico claro, detallado y accesible para el aprendizaje de las técnicas de construcción, así como consejos y especificaciones de uso, limitaciones, cuidados y mantenimiento también son herramientas valiosas a favor de su uso.

En los primeros esfuerzos de este trabajo por rescatar la práctica maya vernácula de construcción con tierra, entre los aportes resultantes para superar algunas barreras se pueden mencionar que: dado que el *kankab* (suelo tradicionalmente utilizado) representa el 97% del contenido de la mezcla principal del material, este trabajo contribuye a abordar la barrera técnica del desconocimiento de sus propiedades. Así como ubicar su lugar entre los materiales de construcción a base de tierra y convencionales. Además, el material propuesto en su sistema constructivo (mezcla de tierra-paja + entramado de madera), su aplicación en un muro híbrido, y las medidas de protección exterior (uso de pintura para exteriores que es permeable al vapor de agua y uso de aleros, toldos o tinglados) también contribuyen a superar algunas barreras como la durabilidad, la adaptación moderna y la estética. La combinación con muros de carga por ejemplo, de concreto, ayuda a solucionar, aunque de forma limitada, la incorporación de instalaciones eléctricas. Así también, en el aspecto económico, el espesor propuesto igual al espesor de un muro convencional (10-13 cm) reduce los tiempos de construcción y con ellos los gastos asociados a los materiales y la mano de obra. Y por otra parte se plantea la meta de buscar madera accesible, asequible y sostenible (para el entramado de madera). Si bien esta propuesta no elimina el uso de concreto, contribuye de forma significativa a reducir su consumo, lo cual es beneficioso desde la postura que ninguna solución a favor del medio ambiente es menor o menos valiosa. Y considerando que a un corto plazo no se cree que la industria constructiva abandone totalmente la producción y uso de concreto. La búsqueda de alternativas para reducir su consumo podría ser un primer paso estratégico.

Otro objetivo importante de este estudio es abordar el uso sustentable del material. La posible explotación del suelo *kankab* a escala urbana para fines de construcción podría entrar en conflicto con la cosecha de alimentos. Situación que fue decisiva para enfocar este trabajo en el suelo *kankab* de Mérida, la ciudad más poblada de la península de Yucatán. El *kankab* de Mérida no se explota para la agricultura ni para fines de construcción, ha mostrado excelentes propiedades (sección 3.1-3.4) y disponibilidad, cumpliendo con el problema de la localidad, lo que minimiza las emisiones por transporte.

Es importante enfatizar en lo necesario que es la participación sinérgica de los tomadores de decisiones, academia, medios de comunicación y profesionales de la construcción involucrados para crear un terreno propicio desde las perspectivas económicas y prácticas de los habitantes. Un esfuerzo colectivo de este tipo, para su implementación responsable a escala urbana, vale la pena dada la evidencia de las excelentes propiedades de este material inspirado en la práctica maya vernácula de construcción con tierra.

3.8 Temas complementarios de caracterización en su uso como material de construcción.

El material estudiado en este proyecto ha demostrado un potencial muy atractivo para el amortiguamiento de la temperatura y de la humedad. Estas primeras evidencias impulsan el interés para profundizar en el análisis de su comportamiento sobre su uso como material de construcción. Uno de los siguientes pasos necesarios es analizar experimentalmente el comportamiento higrotérmico del sistema constructivo completo a escala real, es decir, del material a base de tierra con su correspondiente entramado de madera. La madera también es de naturaleza higroscópica y con características de aislamiento térmico [125], por lo que, se espera que la interacción entre ellos resulte en un efecto regulador favorable. Otro de los posibles temas de investigación sobre el sistema constructivo es el estudio teórico del transporte acoplado de calor y humedad en condiciones dinámicas, donde la temperatura y la humedad relativa no son constantes y cuyos cambios pueden ocurrir simultáneamente. De modo que se pueda contar con una herramienta que permita ampliar los casos de estudio. Ambos enfoques de investigación sobre el sistema constructivo, experimental y teórico, permitirían realizar una estimación más confiable de su potencial pasivo sobre el confort higrotérmico y/o evaluar el impacto en la reducción de las cargas térmicas y en el ahorro del consumo de energía destinado a alcanzar o mantener el confort. En las condiciones cálidas de la Península de Yucatán ya se hacen evidentes los efectos del calentamiento global [37,38] y con ello el incremento en el consumo energético destinado al confort [40]. Dado que la producción de energía es mayormente de fuentes no renovables, su efecto directo en el calentamiento global a su vez agrava constantemente el problema [39]. Por lo que, conocer cuantitativamente el impacto del material en el ahorro energético es fundamental para promover las ventajas de su conservación y adopción. Tal como se ha desarrollado y resaltado en varios trabajos: Es-sakali et al. [112] caracterizaron un ladrillo comercial de arcilla con cáñamo y monitorearon un prototipo de edificio a escala; dicha información con ayuda de una herramienta de simulación permitió la evaluación del desempeño higrotérmico y el potencial de ahorro de energía en todos los climas existentes de Marruecos. Asimismo, Touati et al. [117] realizaron un análisis del comportamiento higrotérmico de un

prototipo de edificio de cob a partir del cual desarrollaron un modelo predictivo. Los autores destacaron la contribución de este tipo de trabajos en la adopción de los materiales a base de tierra. De manera similar, en el trabajo de Petcu et al. [103] la caracterización de muestras de suelo arcilloso compactado y el uso de estos datos para simular el comportamiento higrotérmico permitieron identificar su idoneidad para muros de tierra apisonada y comparar su comportamiento frente a otros materiales. Por lo tanto, cuantificar las ventajas se considera una estrategia fundamental para apoyar la difusión, conservación, uso, y adopción moderna de los materiales a base de tierra.

En paralelo a los temas anteriores, se propone el análisis de alternativas que conlleven a mejorar las cualidades higrotérmicas del material así como también su durabilidad y sus propiedades estructurales las cuales han inducido a los habitantes de la casa maya vernácula a cambiar hacia otras prácticas constructivas, generalmente hacia el uso de sistemas constructivos prefabricados. De acuerdo a estudios de optimización de materiales a base de tierra, sería interesante analizar el efecto sobre el comportamiento higrotérmico y mecánico que ocasionaría el uso de otras fibras vegetales locales con antecedentes de cualidades favorables (para las condiciones de interés). Este análisis consistiría de pruebas experimentales donde las variables sean las proporciones, dimensiones y pretratamientos. En este sentido se encuentra la siguiente literatura. Colinart et al. [17] probaron, para un material a base de tierra, tres ramas de cáñamo con diferentes características y fracciones de masa. Los resultados mostraron el efecto resultante sobre la porosidad y la densidad en estado seco, que a su vez influyeron en la variabilidad de la conductividad térmica del material. Asimismo, Laborel-Préneron et al. [79] evaluaron el impacto de la proporción de tres fibras vegetales sobre las propiedades higrotérmicas de un material a base de tierra. Observaron que un alto volumen de agregados vegetales impactó positivamente en la inercia térmica y en la capacidad de almacenamiento de humedad, pero afectó la permeabilidad al vapor de agua. Para reducir la creación de fisuras y grietas formadas durante el secado del material y proporcionar protección frente al agua de lluvia o la erosión, sería interesante analizar el uso de aditivos o estabilizadores, como polvos o cenizas de base natural agregados solamente en la capa de acabado superficial. En sus trabajos sobre revoques de tierra, Lagouin et al. [11] analizaron el efecto de diferentes proporciones de tierra arcillosa, arena y la adición de estabilizadores orgánicos sobre las propiedades mecánicas de los revoques.

Otro enfoque de investigación podría centrarse en detalles de su aplicación en la envolvente de un edificio, como el efecto de la orientación, de la absorción solar, de las estrategias de ventilación y del espesor que ofrezca el desempeño higrotérmico más favorable en equilibrio con

las necesidades y tendencias de la arquitectura contemporánea. Por ejemplo, Rempel y Rempel [126] analizaron el efecto de varios parámetros, como la orientación y el espesor del material, sobre el enfriamiento evaporativo y la estabilización de la humedad relativa de materiales de construcción de tierra. En su investigación sobre el rendimiento térmico de bloques de tierra comprimida para diferentes diseños de capas de pared y escenarios de ventilación, Hema et al. [20] encontraron que la ventilación nocturna fue la estrategia más adecuada independientemente del diseño de las paredes. Asimismo, Ben-Alon y Rempel [100] observaron que en edificios de tierra bajo climas cálidos y calurosos, la ventilación natural redujo el número de horas de calor.

Es interesante notar que la mayoría de los temas de investigación propuestos requieren conocimientos previos de las propiedades del material para un planteamiento, desarrollo y análisis correcto. Esta es una de las principales contribuciones de este trabajo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se caracterizó un material inspirado en la mezcla a base de tierra, *pak'luum*, utilizada tradicionalmente para construir los muros de la casa maya de tierra en una región de clima cálido subhúmedo.

En términos del tamaño de grano, las muestras de tierra *kankab* analizadas mostraron mayormente en su contenido arena fina y un 19-26% de limo y arcilla. Asimismo, los minerales identificados fueron cuarzo, hematita, goetita, anortita y caolinita; este último es un mineral arcilloso los cuales se caracterizan por su gran afinidad a la adsorción de moléculas de agua.

El valor de densidad del material a base de la mezcla *pak'luum*, 1156 kg m^{-3} , se encuentra dentro de un rango de valores reportados para otros materiales a base de tierra con o sin agregado vegetal ($200\text{-}2200 \text{ kg m}^{-3}$). Comparado con materiales convencionales como el ladrillo rojo recocido sólido o hueco ($2000\text{-}2050 \text{ kg m}^{-3}$) dicho valor es menor.

El valor de conductividad térmica del material a base de la mezcla *pak'luum* en estado seco ($0.19 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) se encuentra dentro de los valores de otros materiales a base de tierra ($0.14\text{-}0.28 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) que tienen una proporción muy cercana de agregado vegetal (3-6%). Comparado con materiales convencionales como el ladrillo rojo recocido sólido o hueco ($0.58\text{-}1.00 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) o el concreto ($0.70\text{-}2.00 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) este valor es significativamente menor, cercano al valor de la madera ($0.13\text{-}0.16 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) y del concreto con agregado de fibra ($0.12 \text{ W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$) y, con un potencial de aislamiento también cercano a los bloques de concreto mejorados con perlita o vermiculita ($0.26 \text{ m}^2\text{°C W}^{-1}$ vs $0.30\text{-}0.36 \text{ m}^2\text{°C W}^{-1}$).

A una temperatura media de 24°C , la conductividad térmica del material a base de la mezcla *pak'luum* incrementa hasta un 53% entre su estado seco y su estado en equilibrio con un ambiente de alta humedad relativa (95%).

La conductividad térmica del material a base de la mezcla *pak'luum* incrementa con la temperatura media. Para un rango de $24\text{ a }36\text{°C}$ se puede obtener un incremento de 15.2% si el material se encuentra en estado seco o un incremento de 9.8% si el material tiene un contenido de humedad de 8.0%.

Aunque la capacidad volumétrica de almacenamiento de calor del material a base de la mezcla *pak'luum* ($1395 \text{ kJ m}^{-3} \text{°C}^{-1}$) puede ser menor a la del ladrillo recocido ($1672 \text{ kJ m}^{-3} \text{°C}^{-1}$), a la de algunos tipos de concreto ($1680\text{-}2016 \text{ kJ m}^{-3} \text{°C}^{-1}$) o incluso menor que a la de ladrillos de tierra

no cocidos ($1441\text{-}1977 \text{ kJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$); de acuerdo al valor de difusividad térmica (del material en estado seco $0.14 \text{ E-}6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$), la transferencia de calor es más lenta que en los otros materiales mencionados (difusividad térmica del ladrillo recocido $0.52\text{E-}6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$, y del concreto $0.75\text{E-}6 \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$).

El valor de la permeabilidad al vapor de agua (en ambiente de alta humedad) del material a base de la mezcla *pak'luum* ($2.5\text{-}5.8 \text{ E-}11 \text{ kg Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) comparado con otros materiales a base de tierra (sin o con una mínima proporción de agregado vegetal) es mayor. Comparado con materiales convencionales como el bloque de concreto ($1.8 \text{ E-}11 \text{ kg Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$) o el concreto ($0.2\text{-}0.5 \text{ E-}11 \text{ kg Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$), el valor obtenido es significativamente mayor y, respecto al concreto mejorado con fibra presenta valores cercanos ($3.0\text{-}4.0 \text{ E-}11 \text{ kg Pa}^{-1} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-1}$).

El material a base de la mezcla *pak'luum* presentó una resistencia a la difusión de vapor de agua cerca de 8 veces (bajo un ambiente seco) y 3 veces (bajo un ambiente húmedo) mayor que la que tiene el aire en las mismas condiciones, respectivamente.

La capacidad para la adsorción de vapor de agua del material a base de la mezcla *pak'luum* comparado con otros materiales a base de tierra (sin o con una mínima proporción de agregado vegetal), es generalmente mayor en los diferentes niveles de humedad relativa excepto cuando se compara con materiales con un contenido alto de agregado vegetal bajo condiciones de humedad relativa mayor a 90%. Por lo que se considera que las particularidades de la tierra *kankab* (principalmente la composición mineral, y el tamaño y distribución de los granos) así como las de la mezcla *pak'luum* (principalmente la porosidad) pueden tener un efecto mayor en la capacidad de adsorción del material. Por otra parte, aunque el material mostró una capacidad de almacenamiento muy favorable para el ambiente de aplicación de interés (sub-húmedo), no liberó todo el vapor de agua que adsorbió, principalmente cuando fue expuesto a niveles altos de humedad relativa.

Un muro a escala reducida de 0.1 m de espesor construido con el material a base de la mezcla *pak'luum* redujo 1°C (en promedio) la temperatura interior de una celda experimental aislada, esto comparado con un muro a escala reducida de bloques huecos de concreto del mismo espesor. Ambas celdas experimentales con un volumen interno de 0.2 m^3 cada una, estuvieron expuestas a las condiciones de aire exterior de un clima cálido subhúmedo.

Generalmente, el retraso de los picos de temperatura del aire exterior fue mayor en la celda con el muro a escala reducida del material a base de la mezcla *pak'luum* que en la celda con el muro

a escala reducida de bloques huecos de concreto, con una diferencia entre sí de 0.22 h en promedio y de hasta 1.3 h. En la celda del muro a escala reducida del material a base de la mezcla *pak'luum*, el retraso mayor se presentó en el espesor medio del muro. Se considera que en este comportamiento influyeron las ganancias de calor por parte de los muros aislados de las celdas y a la posible presencia de infiltraciones.

En la celda con el muro a escala reducida del material a base de la mezcla *pak'luum*, en comparación con la celda del muro a escala reducida de bloques huecos de concreto, la humedad relativa del ambiente interior se redujo entre 10 y 15% en la temporada con valores altos de temperatura de aire exterior y, entre 9 y 13% en la temporada con valores bajos de temperatura de aire exterior.

La zona más seca dentro del muro a escala reducida del material a base de la mezcla *pak'luum* se encontró a una profundidad entre 0.5 y 1.5 cm (medida desde la superficie exterior) y la zona más húmeda a una profundidad entre 8.5-9.5 cm. En la zona más seca es donde se presentaron las mayores oscilaciones de humedad relativa, y en la zona más húmeda las menores oscilaciones.

La respuesta del muro a escala reducida del material a base de la mezcla *pak'luum* ante la humedad del aire exterior se manifestó conforme la profundidad del muro, de tal manera que los picos de humedad se presentaron primero a la profundidad más somera (a 0.5 cm del ambiente exterior), y por último a la profundidad más cercana al ambiente interior. El transporte de la humedad ocurrió con mayor rapidez desde la superficie externa hasta el espesor medio del muro comparado con la otra mitad del espesor del muro.

En el muro a escala reducida del material a base de la mezcla *pak'luum* y en el ambiente interior de su celda, se presentó un proceso de secado conforme la temperatura de aire exterior incrementó y la humedad relativa disminuyó (paso de temporada de invierno a primavera). El incremento de la velocidad del viento podría también haber influido positivamente a dicho secado.

Aunque se tomaron medidas para asegurar la hermeticidad de las celdas experimentales se consideró la existencia de infiltraciones debido a la respuesta observada en el comportamiento de la humedad relativa en los momentos lluviosos, y al hecho de que los picos de temperatura se presentaron primero en el interior de las celdas. No obstante, estos comportamientos se observaron en ambas celdas experimentales por lo que podría considerar que la influencia de dicha infiltración fue homogénea.

El uso de una pintura para exteriores que es permeable al vapor de agua no tuvo un efecto significativo en el comportamiento higroscópico del material a base de la mezcla *pak'luum*. Por lo que se confirma que es una alternativa favorable para la protección del material que no altera su capacidad de sorción y de transmisión de vapor de agua. Sin embargo, se observó que al estar expuesto directamente a las condiciones de lluvia e irradiancia solar es necesaria su inspección periódica con el fin de realizar un mantenimiento preventivo. Para reducir el riesgo de daño, se sugiere como alternativa un elemento de sombreado como es el uso de un alero.

Una alternativa que permitió visualizar el efecto acoplado que tendrían los valores de temperatura y humedad presentados en el interior de las celdas experimentales sobre el confort higrotérmico, dado que no se realizó un análisis adimensional y el escalamiento de dichas variables (cuál sería su equivalencia para un edificio a escala real), fue el planteamiento de un caso ficticio donde se supuso que en el interior de dos edificios cualesquiera (con las mismas características constructivas y dimensiones) se presentaron las mismas condiciones de temperatura y humedad que se presentaron en el interior de las dos celdas experimentales. Los resultados bajo esta consideración mostraron que, aunque la diferencia máxima en la temperatura interior entre uno y otro edificio fuese de 1.4°C (como se observó entre las celdas para el periodo analizado), una condición de aire interior más seco en uno de los edificios (como ocurrió en el interior de la celda del muro a escala reducida del material a base de la mezcla *pak'luum*) causaría que la sensación de incomodidad y el porcentaje de personas insatisfechas fuese generalmente menor. La sensación de incomodidad sería mayor o más extrema en el otro edificio entre 11-15% más húmedo (como ocurrió en el interior de la celda del muro a escala reducida de bloques huecos de concreto).

El comportamiento de la temperatura interior de las celdas experimentales fue obtenido mediante simulación con el software EnergyPlus, esto con la finalidad de completar un año los datos. El modelo físico simulado conservó la geometría, dimensiones, materiales y orientación de las celdas experimentales reales así como los elementos de sombreado de los alrededores. Para el muro a escala reducida de tierra se utilizaron los valores medidos de sus propiedades. Al comparar la diferencia de la temperatura (ΔT_{ai}) entre los valores experimentales contra la diferencia de temperatura (ΔT_{ai}) entre los valores simulados se observaron diferencias desde 0.1 hasta 0.8°C. Estos valores son consistentes a los reportados en trabajos similares (0.2-0.4°C). Se considera que en el modelo simulado, el efecto sobre la temperatura de no incluir la transferencia de humedad es menos significativo en la celda del muro a escala reducida de bloques huecos de concreto debido a la baja permeabilidad de este material. Si bien, en el

material a base de la mezcla *pak'luum* la permeabilidad es importante, se cree que el transporte de humedad tiene un impacto mayor en la humedad relativa del ambiente interior que en la temperatura de dicho ambiente. Este fue un comportamiento observado en el análisis experimental y se puede atribuir por una parte, a la reflectancia solar alta (82%) del recubrimiento con el que se pintó la cara externa de los muros y, por otra parte, a la orientación de los muros (hacia el este).

Para un trabajo posterior se podría analizar el comportamiento de un muro del material a base de la mezcla *pak'luum* pero con un valor menor de reflectancia solar de modo que se pueda observar la interacción de la humedad del material ante una absorción mayor de calor y, en consecuencia, su impacto en la regulación de la temperatura en el interior de la celda. En este mismo sentido, se propone el análisis del comportamiento higrotérmico del material bajo una orientación con una exposición más prolongada a la irradiancia solar como es la orientación sur.

El material a base de la mezcla *pak'luum* que se estudió podría convertirse en una alternativa muy beneficiosa para la industria constructiva en la península de Yucatán, la cual ya sufre de las consecuencias del cambio climático. El material como sistema constructivo, además de las cualidades higrotérmicas mencionadas y su efecto favorable en el confort, cumple con criterios de circularidad y sostenibilidad, con una huella de carbono menor y un gasto energético menor durante su preparación. Además, el suelo *kankab* (componente principal) es abundante, no se explota para la agricultura a escala urbana y está disponible in situ, lo que potencialmente reduce las emisiones del transporte. Por ello, la difusión de los resultados obtenidos en este trabajo constituye un punto de partida para futuras investigaciones. Asimismo apoya la preservación y aprovechamiento del conocimiento tradicional y promueve su adaptación en la arquitectura moderna.

BIBLIOGRAFÍA

1. Ángeles-Rodríguez, L. (2022) Confort higrotérmico. En: Proyecto CEELA. México, pp 1–6.
2. Brambilla, A., Sangiorgio, A. (2021) Moisture and Buildings: Durability Issues, Health Implications and Strategies to Mitigate the Risks, Moisture Build. Durab. Issues, Heal. Implic. Strateg. to Mitigate Risks. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821097-0.00011-4>.
3. Zhang, M., Qin, M., Rode, C., Chen, Z. (2017) Moisture buffering phenomenon and its impact on building energy consumption, Appl. Therm. Eng. 124. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.05.173>.
4. IEA (2019) The Critical Role of Buildings (París). <https://www.iea.org/reports/the-critical-role-of-buildings>. Consultado: 7 de mayo de 2021.
5. Schroeder, H. (2016) Sustainable Building with Earth 1a ed. Springer International Publishing, Thüringen, Germany. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19491-2>.
6. Khadka, B. (2020) Rammed earth, as a sustainable and structurally safe green building: a housing solution in the era of global warming and climate change, Asian J. Civ. Eng. 21. <https://doi.org/10.1007/s42107-019-00202-5>.
7. Vyncke, J., Kupers, L., Denies, N. (2018) Earth as Building Material – an overview of RILEM activities and recent Innovations in Geotechnics. En MATEC Web of Conferences. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902001>.
8. Losini, A.E., Grillet, A.C., Bellotto, M., Woloszyn, M., Dotelli, G. (2021) Natural additives and biopolymers for raw earth construction stabilization – a review, Constr. Build. Mater. 304. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124507>.
9. Laborel-Préneron, A., Aubert, J.E., Magniont, C., Tribout, C., Bertron, A. (2016) Plant aggregates and fibers in earth construction materials: A review, Constr. Build. Mater. 111. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.119>.
10. Mazhoud, B., Collet, F., Prétot, S., Lanos, C. (2021) Effect of hemp content and clay stabilization on hygric and thermal properties of hemp-clay composites, Constr. Build. Mater. 300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123878>.
11. Lagouin, M., Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Geoffroy, S., Aubert, J.E. (2021) Effects of organic admixtures on the fresh and mechanical properties of earth-based plasters, J. Build. Eng. 41. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102379>.
12. Jiang, B., Wu, T., Xia, W., Liang, J. (2020) Hygrothermal performance of rammed earth wall in Tibetan Autonomous Prefecture in Sichuan Province of China, Build. Environ. 181. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107128>.
13. Turco, C., Paula Junior, A.C., Teixeira, E.R., Mateus, R. (2021) Optimisation of Compressed Earth Blocks (CEBs) using natural origin materials: A systematic literature review, Constr. Build. Mater. 309. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125140>.
14. Muguda, S., Lucas, G., Hughes, P.N., Augarde, C.E., Perlot, C., Bruno, A.W., Gallipoli, D. (2020) Durability and hygroscopic behaviour of biopolymer stabilised

- earthen construction materials, *Constr. Build. Mater.* 259.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119725>.
15. Laou, L., Aubert, J.E., Yotte, S., Maillard, P., Ulmet, L. (2021) Hygroscopic and mechanical behaviour of earth bricks, *Mater. Struct. Constr.* 54.
<https://doi.org/10.1617/s11527-021-01701-1>.
 16. Tchiotsop, J., Bonnet, S., Kiessé, T.S., Issaadi, N., Poullain, P. (2023) Local and global sensitivity analysis of a coupled heat and moisture transfers model: effect of the variability of cob material properties, *Heat Mass Transf.*
<https://doi.org/10.1007/s00231-023-03409-0>.
 17. Colinart, T., Vincelas, T., Lenormand, H., De Menibus, A.H., Hamard, E., Lecompte, T. (2020) Hygrothermal properties of light-earth building materials, *J. Build. Eng.* 29. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.101134>.
 18. Zhang, L., Sang, G., Han, W. (2020) Effect of hygrothermal behaviour of earth brick on indoor environment in a desert climate, *Sustain. Cities Soc.* 55.
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102070>.
 19. McGregor, F., Heath, A., Maskell, D., Fabbri, A., Morel, J.-C. (2016) A review on the buffering capacity of earth building materials, *Constr. Mater.* 169.
<https://doi.org/10.1680/jcoma.15.00035>.
 20. Hema, C., Messan, A., Lawane, A., Soro, D., Nshimiyimana, P., van Moeseke, G. (2021) Improving the thermal comfort in hot region through the design of walls made of compressed earth blocks: An experimental investigation, *J. Build. Eng.* 38.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102148>.
 21. Fabbri, A., Morel, J.C., Aubert, J.E., Bui, Q.B., Gallipoli, D., Reddy, B.V. V. (2022) Testing and Characterisation of Earth-based Building Materials and Elements: State-of-the-Art Report of the RILEM TC 274-TCE, Springer, Suiza.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1>.
 22. Soria, F.J., Guerrero, L.F., García, A.B. (2011) Traditional rammed earth construction: Conservation of built heritage in México, *WIT Trans. Built Environ.* 118.
<https://doi.org/10.2495/STR110411>.
 23. Sánchez Suárez, A., García, A. (2014) La casa de los mayas de la península de Yucatán: Historias de la maya naj, Plaza y Váldes, Yucatán, México.
 24. Román-Kalisch, M.A., Piñón-Jiménez, A. (2019) Cambios y permanencias de la tecnología constructiva de la casa maya en Mérida, Yucatán, *Legado Arquít. y Diseño* 25. <https://doi.org/10.36677/legado.v14i25.11594>.
 25. (IBOMEX), I. de B.M. y T.R. (2019) Muros. En *Bioconstrucción a detalle: Una experiencia compartida*, Oaxaca, México, pp 18-60
 26. Sánchez Suarez, A. (2017) *Xa'anil naj. La gran casa de los mayas*, Universidad Autónoma de Yucatán, Mérida, México.
 27. Viqueira, M.R., Freixanet, V.F. (2006) Traditional Mayan architecture according to latitude and altitude. En: *The 23rd International Conference on Passive and Low Energy Architecture, Conference Proceedings*, 6-8 septiembre. Ginebra, Suiza.

28. Cruz Cortés, J.J., Fraga Berdugo, J.E., Mungía Rosas, M.A. (2019) Evolución de la vivienda vernácula en una comunidad rural (Sotuta, Yucatán), Universidad Autónoma de Campeche. Cinvestav-Mérida, Yucatán, México.
29. Sánchez Suárez, A. (2006) La casa maya contemporánea. Usos, costumbres y configuración espacial. *Península* 1.
<https://doi.org/10.22201/cephcis.25942743e.2006.1.2.44328>.
30. Vecchia, F., y Castañeda Nolasco, G. (2007) Análisis experimental del comportamiento térmico de casa de bahareque mejorado en Chiapas, México. *Minerva* 4, 133–139.
31. Rivas, P. (2017) Confort térmico en viviendas vernáculas, técnica de construcción de bahareque en Azogues - Ecuador. Tesis de Maestría, Universidad de Cuenca, Ecuador.
32. Roux-Gutiérrez, R.S. (2018) Bahareque y su Inercia Térmica para muros de viviendas de Interés Social. *Legado Arquít. y Diseño* 23, 25–32.
33. Vega Torreblanca, S. (2020) Evaluando confort térmico con adobe, bahareque, ladrillo y block : 3 zonas de estudio en Oaxaca. Tesis de licenciatura. UNAM, México.
34. Esparza López, C.J., Cabrera Macedo, A., Moreno Torres, J.S., Jiménez Tovar, E.I., Elizondo Mata, M.F. (2022) Bahareque de Bambú. Propuesta Modular en Base al Desempeño Térmico y Mecánico, *Estud. Arquít. Bioclimática XVII*, 109.
35. Wikimedia Commons (2018) Casa maya.
https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Casa_maya.jpg Consultado: 12 de diciembre de 2024.
36. Ferreira, M.H.B., Rubin de Rubin, J.C. (2022) Casas mayas en Mérida, Yucatán, *Península* 18. <https://doi.org/10.22201/cephcis.25942743e.2023.18.1.84258>.
37. Bautista, F., Aguilar, Y., Leal, M., Pacheco, A. (2020) Analysis of climate change at local level: extreme weather events in the state of Yucatan, Mexico. En *Efectos del cambio climático en el habitat de las especies y los O.D.S* (Loja, Ecuador), p. 30-34.
38. Reyes-Mendoza, O., Manta, G., Carrillo, L. (2022) Marine heatwaves and marine cold-spells on the Yucatan Shelf-break upwelling region, *Cont. Shelf Res.* 239.
<https://doi.org/10.1016/J.CSR.2022.104707>.
39. Estrada-Porrua, F., Zavala-Hidalgo, J., Martínez-Arroyo, A., Raga, G., and Gay-García, C. (2023) Estado Y Perspectivas Del Cambio Climático En México: Un Punto De Partida, Ciudad de México.
40. Bracho, R., Flores-Espino, F., Morgenstein, J., Aznar, A., Castillo, R., Settle, E. (2021) The Yucatan Peninsula Energy Assessment: Pathways for a Clean and Sustainable Power System (Golden, CO).
41. Hernández, G., Cetina-Quñones, A.J., Bassam, A., Carrillo, J.G. (2024) Passive strategies towards energy efficient social housing: A parametric case study and decision-making framework in the Mexican tropical climate, *J. Build. Eng.* 82.
<https://doi.org/10.1016/J.JOBE.2023.108282>.

42. Grieta Consultoría Sostenible (2023) Taller de acabados naturales.
https://www.instagram.com/p/CyeiSCcLXIX/?img_index=4 Consultado: 14 de julio de 2025.
43. Baum Arquitectura (2025) https://www.facebook.com/pakluumarq/?locale=es_LA Consultado: 14 de julio de 2025.
44. Hidalgo-Escobedo, K.A. (2016) Arquitectura como herramienta de crecimiento comunitario. Tesis de Maestría, Fundació Universitat de Girona, España.
45. Rodríguez Ruiz, J.L., Castañeda Hernández, C.G., Cruz López, R., Neria Hernández, R. (2021) Diseño de un módulo de bahareque autoconstructivo de bajo costo e impacto ambiental para viviendas unifamiliares, Rev. RedCA 3.
<https://doi.org/10.36677/redca.v3i9.15866>.
46. Franco, J. T. (2015) Guadalajara, México: un edificio comunitario de muros de bahareque y celosía de carrizo. ArchDaily.
<https://www.archdaily.mx/mx/762081/guadalajara-mexico-un-edificio-comunitario-de-muros-de-bahareque-y-celosia-de-carrizo>. Consultado: 8 de julio de 2025.
47. Eco Constructores México, Construcciones Ecológicas.
<https://ecoconstructoresmexico.com/construcciones-ecologicas/>. Consultado: 9 de julio de 2025.
48. Eco Constructores México, Marcos Sánchez.
<https://www.facebook.com/ecoconstructoresmexico/> Consultado: 9 de julio de 2025.
49. Giuffrida, G., Caponetto, R., Nocera, F. (2019) Hygrothermal properties of raw earth materials: A literature review. Sustain. 11. <https://doi.org/10.3390/su11195342>.
50. Ouedraogo, K.A.J., Aubert, J.E., Tribout, C., Millogo, Y., Escadeillas, G. (2021) Ovalbumin as natural organic binder for stabilizing unfired earth bricks: Understanding vernacular techniques to inspire modern constructions, J. Cult. Herit. 50. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2021.05.004>.
51. Medjelekh, D., Ulmet, L., Gouny, F., Fouchal, F., Nait-Ali, B., Maillard, P., Dubois, F. (2016) Characterization of the coupled hygrothermal behavior of unfired clay masonries: Numerical and experimental aspects, Build. Environ. 110. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.037>.
52. Hadji, F., Ihaddadene, N., Ihaddadene, R., Betga, A., Charick, A., Logerais, P.O. (2020) Thermal conductivity of two kinds of earthen building materials formerly used in Algeria, J. Build. Eng. 32. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101823>.
53. Soudani, L., Fabbri, A., Morel, J.C., Woloszyn, M., Chabriac, P.A., Wong, H., Grillet, A.C. (2016) Assessment of the validity of some common assumptions in hygrothermal modeling of earth based materials, Energy Build. 116. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.025>.
54. Labat, M., Magniont, C., Oudhof, N., Aubert, J.E. (2016) From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential, Build. Environ. 97. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004>.

55. Indekeu, M., Woloszyn, M., Grillet, A.C., Soudani, L., Fabbri, A. (2017) Towards hygrothermal characterization of rammed earth with small-scale dynamic methods, *Energy Procedia* 132. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.731>.
56. McGregor, F., Heath, A., Shea, A., Lawrence, M. (2014) The moisture buffering capacity of unfired clay masonry, *Build. Environ.* 82. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>.
57. Belakroum, R., Gherfi, A., Kadja, M., Maalouf, C., Lachi, M., El Wakil, N., Mai, T.H. (2018) Design and properties of a new sustainable construction material based on date palm fibers and lime, *Constr. Build. Mater.* 184. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.196>.
58. Guggenheim, E.A. (1966) *Application of Statistical Mechanics*, Clarendon Press Oxford.
59. Henderson, S.M. (1952) A basic concept of equilibrium moisture, *Agri. Eng.* 33, 29–32.
60. Chung, D.S., Pfoest, H.B. (1967) Adsorption and desorption of water by cereal grains and their products, *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.* 10, 549–555.
61. Samapundo, S., Devlieghere, F., Meulenaer, B.D., Atukwase, A., Lamboni, Y., Debevere, J.M. (2007) Sorption isotherms and isosteric heats of sorption of whole yellow dent corn, *J. Food Eng.* 79. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.01.040>.
62. Halsey, G. (1948) Physical adsorption on non-uniform surfaces, *J. Chem. Phys.* 16. <https://doi.org/10.1063/1.1746689>.
63. Oswin, C.R. (1946) The kinetics of package life III. The isotherm, *J. Soc. Chem. Ind.* 65. <https://doi.org/10.1002/jctb.5000651216>.
64. Haba, B., Agoudjil, B., Boudenne, A., Benzarti, K. (2017), Hygric properties and thermal conductivity of a new insulation material for building based on date palm concrete, *Constr. Build. Mater.* 154. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.025>.
65. Rode, C., Peuhkuri, R.H., Hansen, K.K., Time, B., Svennberg, K., Arfvidsson, J., Ojanen, T. (2005) NORDTEST Project on Moisture Buffer Value of Materials. En: AIVC 26th Conf. Vent. Relat. to the energy Perform. Build. Air Infiltration Vent., 21-23 septembre. Bruselas, Bélgica.
66. ISO (2008) ISO 24353:2008 - Hygrothermal performance of building materials and products — Determination of moisture adsorption/desorption properties in response to humidity variation.
67. Soudani, L., Woloszyn, M., Fabbri, A., Morel, J., Grillet, A. (2017) Energy evaluation of rammed earth walls using long term in-situ measurements, *Sol. Energy* 141. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.002>.
68. Brambilla, A., Jusselme, T. (2017) Preventing overheating in offices through thermal inertial properties of compressed earth bricks: A study on a real scale prototype, *Energy Build.* 156. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.070>.
69. Carrobé, A., Rincón, L., Martorell, I. (2021) Thermal monitoring and simulation of earthen buildings. A review, *Energies* 14. <https://doi.org/10.3390/en14082080>.

70. Fohagui, F.C.V., Koholé, Y.W., Tchuen, G. (2021) Experimental comparison of energy performances of common types of buildings constructed in Cameroon and validation of their electrical model, *Sadhana - Acad. Proc. Eng. Sci.* 46. <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01670-9>.
71. Carrillo-Niquete, G.A., Andrade, J.L., Valdez-Lazalde, J.R., Reyes-García, C., Hernández-Stefanoni, J.L. (2022) Characterizing spatial and temporal deforestation and its effects on surface urban heat islands in a tropical city using Landsat time series, *Landsc. Urban Plan.* 217. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2021.104280>.
72. Palafox-Juárez, E.B., López-Martínez, J.O., Hernández-Stefanoni, J.L., Hernández-Núñez, H. (2021) Impact of urban land-cover changes on the spatial-temporal land surface temperature in a tropical City of Mexico, *ISPRS Int. J. Geo-Information* 10. <https://doi.org/10.3390/ijgi10020076>.
73. Graphenstone (2024) Biosphere. https://graphenstone.com/wp-content/uploads/2025/02/TDS_Biosphere_25.pdf Consultado: 7 de julio de 2025.
74. Hernández-Sánchez, F. (2007) Heat Capacity Measurement in Polymers Using a Differential Scanning Calorimeter: Area Measurement Method, *J. Appl. Polym. Sci.* 105. <https://doi.org/10.1002/app.26418>.
75. ASTM (2007) ASTM D422-63 Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils.
76. ASTM (2006) ASTM D854-06 Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer.
77. ASTM (2013) ASTM C177-13 Standard Test Method for Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus.
78. Pech-Can, G. (2017) Optimización de un equipo de medición de conductividad térmica en materiales con potencial de aislamiento térmico. Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico Superior de Motul, Yucatán.
79. Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Aubert, J.E. (2018) Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition, *Energy Build.* 178. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>.
80. ASTM (2016) ASTM E96/E96M-16 Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials.
81. ASTM (2010) ASTM C1498-04a Standard Test Method for Hygroscopic Sorption Isotherms of Building Materials.
82. Ferroukhi, M.Y., Belarbi, R., Si Larbi1, A., Nouviaire, A. (2018) Assessment of the effects of temperature and moisture content on the hygrothermal transport and storage properties of porous building materials, *Heat Mass Transf.* 56. <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02876-z>.
83. University of Alaska Fairbanks (2021) Permeability of Common Building Material to Water Vapor.
84. CCSTB (2012) Règles Th-U Fascicule 2 : Matériaux.

85. Sensirion (2016) Datasheet SHT3x-DIS Humidity and Temperature Sensor. https://sensirion.com/media/documents/213E6A3B/63A5A569/Datasheet_SHT3x_DI_S.pdf. Consultado: 12 de marzo de 2023.
86. Fanger, P.O. (1970) Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering, Danish Technical Press, Copenhagen.
87. Olesen, B.W. (1982) Thermal comfort. Tech. Rev. 2.
88. Lunds Tekniska Hogskola Calculation of Predicted mean Vote (PMV), and Predicted Percentage Dissatisfied (PPD). https://www.eat.lth.se/fileadmin/eat/Termisk_miljoe/PMV-PPD.html Consultado: 27 de enero de 2024.
89. ISO (2005). ISO 7730 Ergonomía del entorno térmico: determinación analítica e interpretación del confort térmico mediante el cálculo de los índices PMV y PPD y criterios locales de confort térmico.
90. EnergyPlus (2025) Engineering Reference. https://energyplus.net/assets/nrel_custom/pdfs/pdfs_v25.1.0/EngineeringReference.pdf Consultado: 18 de julio de 2025.
91. UNAM EnerHabitat. <https://enerhabitat.unam.mx/> Consultado: 28 de julio de 2025.
92. Mitza Bloques Mitza. <https://www.mitza.com.mx/producto/bloques>. Consultado: 10 de julio de 2025.
93. CCNNPURRE (2011) NOM-020-ENER-2011, Diario Oficial de la Federación, Estados Unidos Mexicanos.
94. Pan, J., Zou, R., Jin, F. (2017) Experimental study on specific heat of concrete at high temperatures and its influence on thermal energy storage, Energies 10. <https://doi.org/10.3390/en10010033>.
95. Hernández-Pérez, I., Xamán, J., Macías-Melo, E. V., Aguilar-Castro, K.M., Zavala-Guillén, I., Hernández-López, I., Simá, E. (2018) Experimental thermal evaluation of building roofs with conventional and reflective coatings, Energy Build. 158. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.085>.
96. CIBSE (2015) Guide A: Environmental design. <https://www.cibse.org/knowledge-research/knowledge-portal/guide-a-environmental-design-2015> Consultado: 30 de julio de 2025.
97. Owens Corning (2025) Foamular® Ficha técnica. <https://owenscorning.com.mx/mercados/residencial-2/foamular/> Consultado: 2 de mayo de 2025.
98. Chae, Y., Kim, S.H. (2022) Interstitial hygrothermal analysis for retrofitting exterior concrete wall of modern heritage building in Korea, Case Stud. Constr. Mater. 16. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00797>.
99. Colinart, T., Pajeot, M., Vincelas, T., Hellouin De Menibus, A., Lecompte, T. (2021) Thermal conductivity of biobased insulation building materials measured by hot disk: Possibilities and recommendation, J. Build. Eng. 43. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.102858>.

100. Ben-Alon, L., Rempel, A.R. (2023) Thermal comfort and passive survivability in earthen buildings. *Build. Environ.* 238. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110339>.
101. León-Arteta, R. (1991) (Tsol Lu'um) La clasificación maya de las tierras, *La Cienc. y el Hombre* 8. <https://doi.org/10.2307/j.ctv8j5r0>.
102. González Herrera, R., Vega Azamar, R. (2002) Materiales de suelos de Yucatán factibles de utilizarse como cubierta en sitios de disposición de desechos sólidos, *Rev. Int. Contam. Ambient.* 18, 57–66.
103. Petcu, C., Dobrescu, C.F., Dragomir, C.S., Ciobanu, A.A., Lăzărescu, A.V., Hegyi, A. (2023) Thermophysical Characteristics of Clay for Efficient Rammed Earth Wall Construction, *Materials* (Basel). <https://doi.org/10.3390/ma16176015>.
104. Ahn, H.K., Sauer, T.J., Richard, T.L., Glanville, T.D. (2009) Determination of thermal properties of composting bulking materials, *Bioresour. Technol.* 100. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.11.056>.
105. Medjelekh, D., Ulmet, L., Dubois, F. (2017) Characterization of hygrothermal transfers in the unfired earth, *Energy Procedia* 139. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.11.242>.
106. Cagnon, H., Aubert, J.E., Coutand, M., Magniont, C. (2014) Hygrothermal properties of earth bricks, *Energy Build.* 80. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>.
107. Liuzzi, S., Rubino, C., Martellotta, F., Stefanizzi, P., Casavola, C., Pappalettera, G. (2020) Characterization of biomass-based materials for building applications: The case of straw and olive tree waste, *Ind. Crops Prod.* 147. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2020.112229>.
108. Tudela, F. (1982) *Ecodiseño*, Universidad Autónoma Metropolitana, México.
109. Taouirte, Y., Tiffonnet, A.L., Marion, M., Louahlia, H., El Alami, M., Gounni, A., Lépinasse, E., Voicu, I. (2023) Effect of Temperature on Moisture Migration in Earth and Fiber Mixtures for Cob Materials, *Energies* 16. <https://doi.org/10.3390/en16145526>.
110. Saidi, M., Cherif, A.S., Zeghmatti, B., and Sediki, E. (2018) Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks, *Constr. Build. Mater.* 167. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063>.
111. Allam, R., Issaadi, N., Belarbi, R., El-Meligy, M., Altahrany, A. (2018) Hygrothermal behavior for a clay brick wall, *Heat Mass Transf.* 54. <https://doi.org/10.1007/s00231-017-2271-5>.
112. Es-sakali, N., Charai, M., Idrissi Kaitouni, S., Ait Laasri, I., Mghazli, M.O., Cherkaoui, M., Pfafferott, J., Ukjoo, S. (2023) Energy efficiency and hygrothermal performance of hemp clay walls for Moroccan residential buildings: An integrated lab-scale, in-situ and simulation-based assessment, *Appl. Energy* 352. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121967>.
113. Aranda-Jiménez, Y., Suarez-Dominguez, E., Espuna, J. (2016) Structural and Thermal Monitoring of Sustainable Housing with Poured Earth Walls, *Int. J. Sci. Res. Eng. Technol.*

114. Taylor, P., Fuller, R.J., Luther, M.B. (2008) Energy use and thermal comfort in a rammed earth office building, *Energy Build.* 40. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.05.013>.
115. Ouédraogo, E., Dianda, B., Sikoudouin, T., Ouédraogo, A. (2018) Determination of Parameters Influencing Thermal Comfort in a Building, *Sci. J. Energy Eng.* 6. <https://doi.org/10.11648/j.sjee.20180603.11>.
116. Algifri, A.H., Bin Gadhi, S.M., Nijaguna, B.T. (1992) Thermal behaviour of adobe and concrete houses in Yemen, *Renew. Energy* 2. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(92\)90024-W](https://doi.org/10.1016/0960-1481(92)90024-W).
117. Touati, K., Benzaama, M.H., El Mendili, Y., Le Guern, M., Streiff, F., Goodhew, S. (2023) Hygrothermal and Economic Analysis of an Earth-Based Building Using In Situ Investigations and Artificial Neural Network Modeling for Normandy's Climate Conditions, *Sustain.* 15. <https://doi.org/10.3390/su151813985>.
118. Allinson, D., Hall, M. (2010) Hygrothermal analysis of a stabilised rammed earth test building in the UK, *Energy Build.* 42. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.12.005>.
119. Foruzanmehr, A., and Vellinga, M. (2011) Vernacular architecture: questions of comfort and practicability, *Build. Res. Inf.* 39. <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.562368>.
120. Pardo, J.M.F. (2023) Challenges and Current Research Trends for Vernacular Architecture in a Global World: A Literature Review, *Buildings* 13. <https://doi.org/10.3390/buildings13010162>.
121. Marsh, A.T.M., Kulshreshtha, Y. (2021) The state of earthen housing worldwide: how development affects attitudes and adoption, *Build. Res. Inf.* <https://doi.org/10.1080/09613218.2021.1953369>.
122. Morel, J.C., Charef, R., Hamard, E., Fabbri, A., Beckett, C., Bui, Q.B. (2021) Earth as construction material in the circular economy context: Practitioner perspectives on barriers to overcome, *Philos. Trans. R. Soc. B Biol. Sci.* 376. <https://doi.org/10.1098/rstb.2020.0182>.
123. Morel, J.C., Charef, R. (2019) What are the barriers affecting the use of earth as a modern construction material in the context of circular economy? *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 225. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012053>.
124. Pelé-Peltier, A., Charef, R., Morel, J.-C. (2022) Factors affecting the use of earth material in mainstream construction: a critical review, *Build. Res. Inf.* 51. <https://doi.org/10.1080/09613218.2022.2070719>.
125. Zhao, J., Feng, S., Kou, Z., Meissner, F., Ruisinger, U., Grunewald, J. (2023) Characterization of hygrothermal properties of two wood species- the impact of anisotropy on their thermal and moisture behaviors, *Constr. Build. Mater.* 398. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132375>.
126. Rempel, A.R., Rempel, A.W. (2016) Intrinsic evaporative cooling by hygroscopic earth materials, *Geosciences* 6. <https://doi.org/10.3390/geosciences6030038>.

127. Climate.OneBuilding.Org
https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_4_North_and_Central_America/MEX_Mexico/index.html Consultado: 2 de mayo de 2022.
128. Society of Building Science Educators Climate Consultant.
<https://www.sbse.org/resources/climate-consultant> Consultado: 2 de mayo de 2022.
129. Laboratorio de Entornos Sostenibles Base de datos de materiales caracterizados del LES. <https://arquitectura.unam.mx/les.html> Consultado: 5 de mayo de 2022
130. Bendouma, M., Colinart, T., Glouannec, P., Noël, H. (2020) Laboratory study on hygrothermal behavior of three external thermal insulation systems, Energy Build. 210. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.109742>.
131. Chamoin, J. (2013) Optimisation des propriétés (physiques, mécaniques et hydriques) de bétons de chanvre par la maîtrise de la formulation. Tesis de doctorado, INSA Rennes, Francia.
132. Walker, R., Pavía, S. (2014) Moisture transfer and thermal properties of hemp-lime concretes. Constr. Build. Mater. 64.
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.081>.

ANEXO A. HOJA DE DATOS DE LA PINTURA PERMEABLE AL VAPOR DE AGUA Y DE LA PINTURA IMPERMEABILIZANTE.

Hojas de datos de la pintura para exteriores que es permeable al vapor de agua [73] aplicada a las muestras caracterizadas a nivel laboratorio y a los muros del arreglo experimental.

Biosphere

Lime exterior paint

TECHNICAL DATA SHEET

Biosphere is a mineral, ecological matt paint, suitable for exterior walls. Thanks to its formula based on 100% artisanal lime, the product absorbs CO2* as it cures and it has an excellent breathability that helps to prevent condensation. Made with Graphenstone Technology for greater resistance and durability.



PACK SIZE

1L, 1 Gal, 4L, 10L, 15L and 5 Gal

YIELD/COVERAGE

White: 5-7 m²/l | 200-285 Sq. Ft./gal (2 coats).
Colours: 6-8 m²/l | 250-325 Sq. Ft./gal (2 coats).

Depending on the condition of the substrate, tools and application. The exact consumption should be determined by sampling on site.

CE MARK

EN1504-2 Surface protection system for concrete - Moisture control:

Adhesion strength	≥ 0.8 N/mm²
Permeability	Class 1
Water absorption from capillarity	w < 0.1 kg/m²·h ^{0.5} ++yh

TECHNICAL PROPERTIES

	White	Colour
Specific weight	1.47 ± 0.05 g/cm³	1.48 ± 0.05 g/cm³
pH	13 ± 0.5	
Viscosity	[80 - 120] U.K.	
Solid content	57 ± 5 %	60 ± 5 %
Washability (EN 13300)	Class 1	
SRI (ASTM E1980-11)	100 ± 0.3	
LRV (BS8493+A1)	89,4%	
Water vapour permeability	V ≥ 600 g/(m² · d) Sd ≤ 0,03 m	
Nature	Aerated lime	
Appearance	Dense liquid	
VOC s Content	PASS according to Directive 2004/42/CE and EU Ecolabel (2014/312/EU)	



updated: 12-2024

IEDISA | Carpinteros, 25. 41520 El Viso del Alcor. Seville (Spain)
info@graphenstone.com | (+34) 955 52 94 35 | www.graphenstone.com

122

REPORT No. 061665

CUSTOMER	INDUSTRIA ESPAÑOLA PARA EL DESARROLLO E INVESTIGACIÓN 2100, S.A. (IEdISA)
APPLICANT	PATRICIA SILVA
ADDRESS	POL. IND. POLIVISO C/ HERREROS, 8 41520 EL VISO DEL ALCOR (SEVILLA)
PURPOSE	SRI INDEX IN ACCORDANCE WITH ASTM E1980-11
SAMPLE TESTED	WHITE COATING REF. «BIOSPHERE PREMIUM»
DATE OF RECEIPT	12/09/2016
TEST DATES	20/09/2016
DATE ISSUED	28/09/2016


Firmado digitalmente
por: SUSANA
SANTAMARIA
FERNANDEZ
Fecha y hora:
28.09.2016 10:51:16

Susana Santamaria
Technical Consultant
Construction - Services

* The results of this report solely and exclusively concern the material tested at the time and under the conditions in which the measurements were taken.
* This report shall not be reproduced without the express authorisation of FUNDACIÓN TECNALIA R&I, except where done so in its entirety.

TECNALIA RESEARCH & INNOVATION
Area Brand - G
E-20730 Azpeitia (Gipuzkoa)

T 902 760 000
T +34 948 430 850 (International calls)

Sede Social / Headquarters
Parque Científico y Tecnológico de Bizkaia
C/Ordo, Edificio 700
E-48160 Derio - Bizkaia (Spain)

CALCULATION REQUESTED

The calculation requested is the determination of the **SRI index** of the test specimen received in accordance with **ASTM E1980-11** «Standard Practice for Calculating Solar Reflectance Index of Horizontal and Low-Sloped Opaque Surfaces».

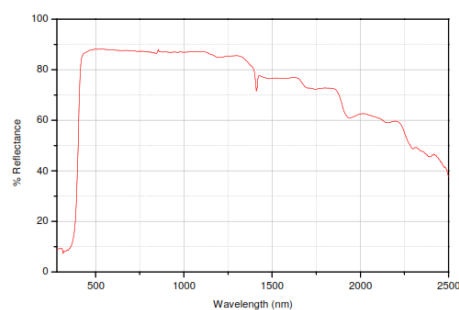
RESULTS

SOLAR REFLECTANCE

The result of solar reflectance of the test specimen referenced as «**BIOSPHERE PREMIUM**» is:

Solar reflectance (%)	82.2 ± 0.2
-----------------------	-------------------

The following graph shows the data of the spectral reflectance of the test specimen.



Hoja de datos de la pintura impermeabilizante aplicada a las guardas del arreglo experimental.



Santa Catarina, N.L. a 26 de septiembre de 2023

A quien corresponda

Pinturas Berel
S.A. de C.V.

Carretera a
Villa de García
No. 2551 Km. 2.7

Santa Catarina
N. L., México
C.P. 66350

A través de la presente hago de su conocimiento los valores de reflectancia, emisividad e IRS
(Índice de Reflectancia Solar) del impermeabilizante Kover Pro Blanco 2823.

Valores Kover Pro	
Reflectancia	0.78
Emisividad	0.91
IRS	98

Atentamente

Enrique Santos
Jefe de Servicio Técnico
Pinturas Berel S.A. de C.V.

ANEXO B. CARACTERIZACIÓN DE LAS CONDICIONES CLIMÁTICAS DE EXPOSICIÓN DEL MATERIAL DE ESTUDIO.

Las condiciones bajo las cuales será analizado el material corresponden al clima cálido subhúmedo de la ciudad de Mérida, Yucatán. El comportamiento de la temperatura, de la humedad relativa, así como de la dirección y velocidad del viento es mostrado en las siguientes figuras. La base de datos para el periodo 2007-2021 fue obtenida del sitio web Climate.OneBuilding.Org [127] y el procesamiento se realizó con el software Climate Consultant [128]. Estos datos fueron tomados de una estación meteorológica ubicada en las instalaciones del Aeropuerto Internacional de Mérida Manuel Crescencio Rejón.

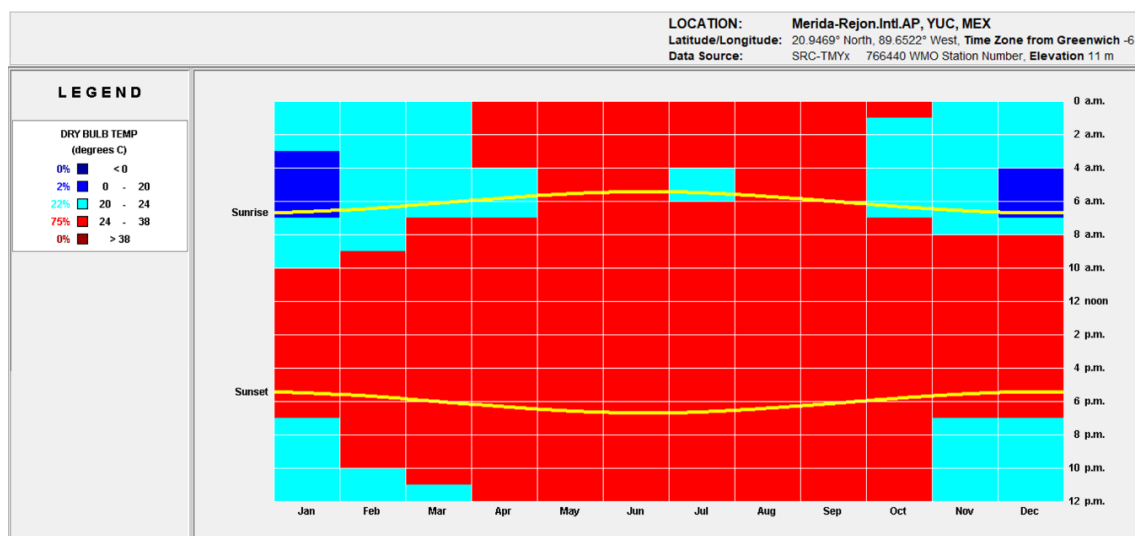


Figura B.1. Valor promedio mensual de la variación de la temperatura ambiente.

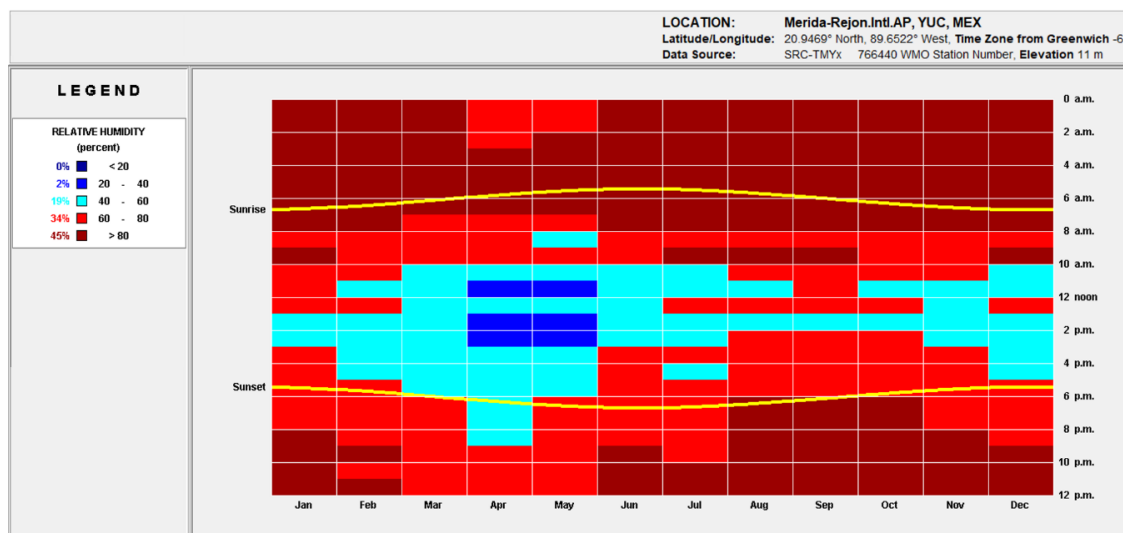


Figura B.2. Valor promedio mensual de la variación de la humedad relativa.

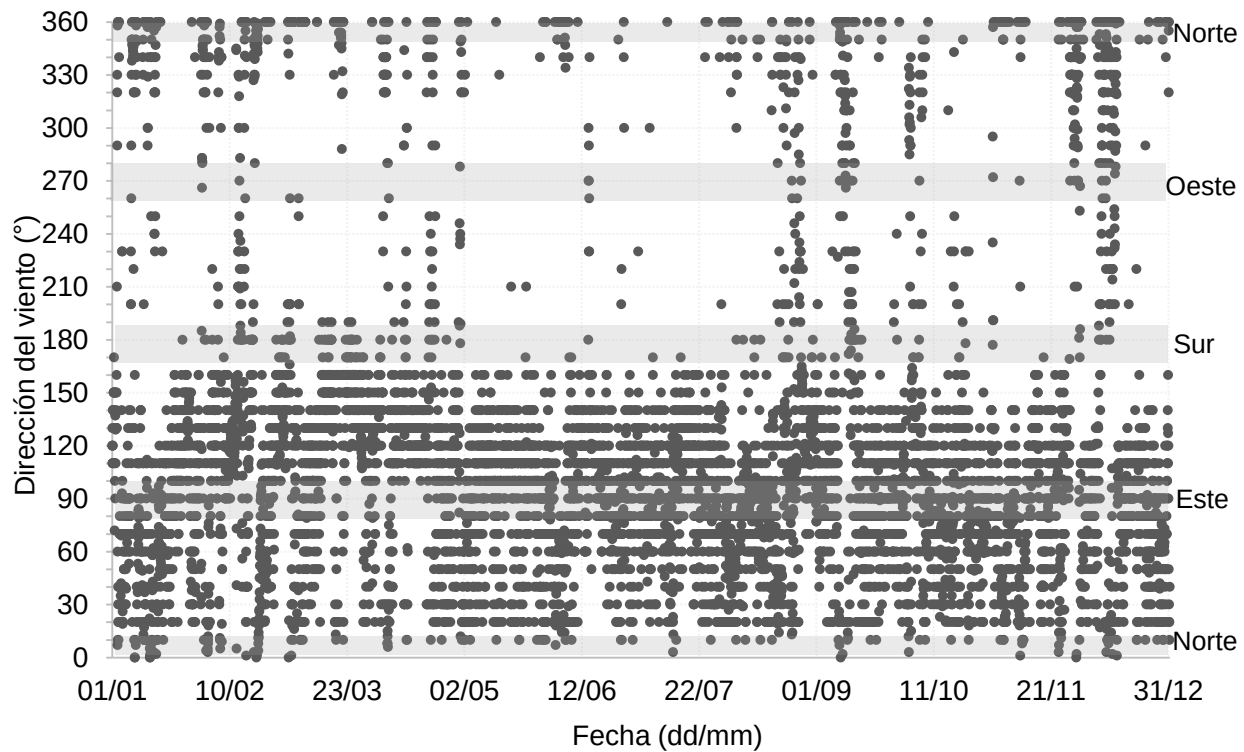


Figura B.3. Valor promedio por día de la variación de la dirección del viento.

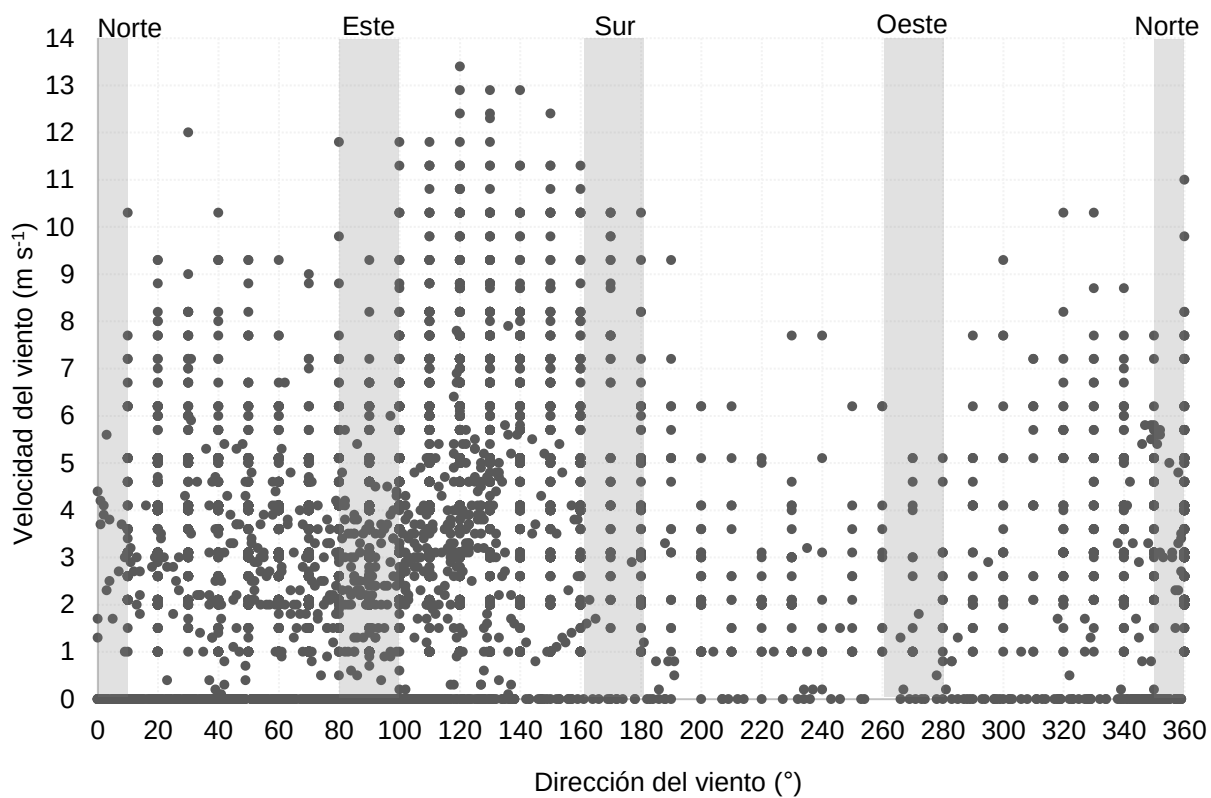


Figura B.4. Valor promedio de la variación de la dirección y velocidad del viento.

ANEXO C. TABLA DE PROPIEDADES DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.

Tabla C.1. Valores de propiedades termofísicas y de transmisión de vapor de agua de algunos materiales de construcción.

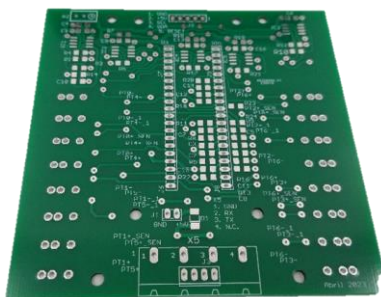
Material	ρ (kg m ⁻³)	λ (W m ⁻¹ °C ⁻¹)	Resistencia térmica (m ² °C W ⁻¹)	Cp (J g ⁻¹ °C ⁻¹)	δ (10 ⁻¹¹ Kg Pa ⁻¹ s ⁻¹ m ⁻¹)	μ (adm)	Referencia
Material a base de pak'luum	1156	0.193	0.261	1.46	2.51 (d), 5.77 (w)	7.9 (dr), 3.4 (wt)	Este trabajo
Tabique rojo recocido común	2000	0.872	-	0.84	-	-	[93]
Tabique de barro extruido			-	-	-	-	
Bloque hueco vertical (60 a 67% sólido)	2050	0.998					
Bloque hueco vertical, relleno con vermiculita	2050	0.575					[93]
Bloque de adobe (al exterior)	--	0.930					[93]
Adobe de tierra (Oaxaca)	1820	0.734		1.03			[129]
Adobe (3% de fibra vegetal)	998	0.275		1.47			[129]
Mampostería de ladrillo	--	--	--	--	0.30	--	[83]
Bloque de concreto celular curado c/autoclave	450	0.120	-	-	-	-	
	500	0.190					[93]
	600	0.210					
Bloque de concreto							
20 cm de espesor, 2 o 3 huecos	1700		0.180				
el mismo con perlita	1700		0.360				[93]
el mismo con vermiculita	1700		0.300				
Bloque de concreto	-	-	-	-	1.83	-	[83]
Bloque de concreto				0.82-1.18			[94]
Concreto							
Armado	2300	1.74	-	0.92			[93]
Simple al exterior	2200	1.65		0.85			
Ligero al exterior	1250	0.70					
Concreto	2450	2.00		1.00	0.15 (d), 0.24 (w)		[84]
Concreto	1890	1.40		0.79		21.5 (dr)	[130]
Concreto (1:2:4 mezcla)	-	-	-	-	0.464	-	[83]
Madera							
Viruta aglutinada (Pamacón)	700	0.163		2.3 (sft)			
Blanda	610	0.130					[93]
Dura	700	0.150					
Madera	-	-	-	-	0.06 - 0.78	-	[83]
Concreto-cáñamo	≈ 420	-				6.5 (dr), 4.9 (wt)	[131]
Concreto-cáñamo	≈ 540	≈ 0.12				≈ 5.9 (dr)	[132]

* ρ : densidad, λ : conductividad térmica, Cp: calor específico, δ : permeabilidad al vapor de agua, μ : factor de resistencia a la difusión de vapor de agua, dr: ambiente de HR baja, wt: ambiente de HR alta.

ANEXO D. INSTRUMENTACIÓN DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES: SISTEMA DE ADQUISICIÓN, REGISTRO Y ALMACENAMIENTO DE DATOS.

En las siguientes figuras se muestran las placas de circuito impreso que en conjunto con el ensamble de otros componentes permitieron la adquisición, el registro y almacenamiento de los datos medidos por los sensores instalados en el arreglo experimental. Cada placa mide 10.0 cm x 10.0 cm y 0.16 cm de espesor.

a)



b)

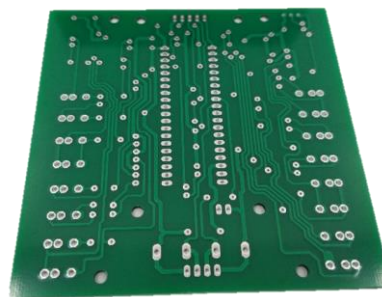
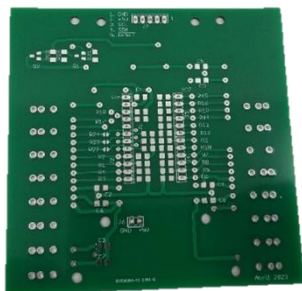


Figura D.1. Placa diseñada para la adquisición de datos de los sensores de temperatura RTD PT100: a) frente, b) reverso.

a)



b)

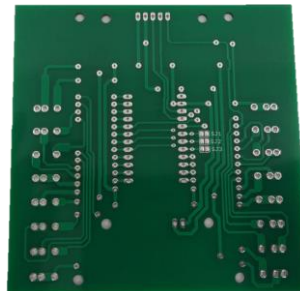
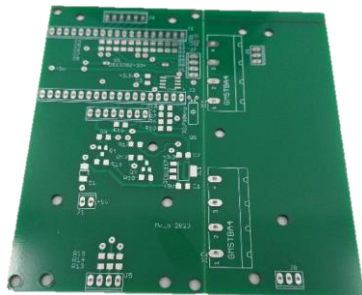


Figura D.2. Placa diseñada para la adquisición de datos de los sensores de humedad y temperatura SHT30: a) frente, b) reverso.

a)



b)

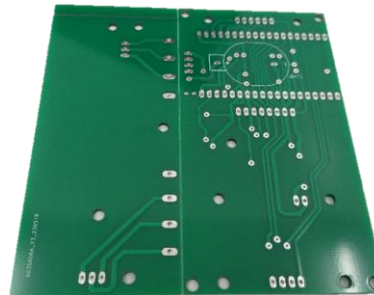


Figura D.3. Placa diseñada para el almacenamiento de datos de todos los sensores: a) frente, b) reverso.

ANEXO E. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE EN LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA.

El análisis de incertidumbre para la conductividad térmica se basó en la siguiente ecuación propuesta en ASTM C177-13 [77]:

$$\left(\frac{\delta\lambda}{\lambda}\right)^2 = \left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T}{T}\right)^2 + \left(\frac{\delta A}{A}\right)^2 + \left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 \quad (\text{E.1})$$

Donde $\delta Q/Q$, $\delta\Delta T/T$, $\delta A/A$, y δL son las incertidumbres relativas totales de flujo de calor, diferencia de temperatura, área de medición y espesor, respectivamente. Estas incertidumbres relativas totales incluyen no solo la incertidumbre de la medición, sino también el efecto de la variabilidad y las desviaciones del material. Las incertidumbres consideradas para cada variable utilizada en el cálculo de la conductividad térmica fueron las siguientes:

- Flujo de calor:
 - Tensión: incertidumbre por efecto de temperatura, por regulación de carga y por resolución.
 - Corriente: incertidumbre por efecto de temperatura, por regulación de carga y por resolución.
- Diferencia de temperatura: desviación estándar por mediciones durante el estado estacionario, desviación estándar por uniformidad de la temperatura en cada placa.
- Área: desviación estándar por variabilidad de la muestra, desviación estándar por repetibilidad e incertidumbre por resolución del instrumento de medición.
- Espesor: desviación estándar por variabilidad de la muestra, desviación estándar por repetibilidad e incertidumbre por resolución del instrumento de medición.

ANEXO F. ANÁLISIS DE ERROR DE MEDICIONES DE TEMPERATURA POR LA POSICIÓN DE LOS SENSORES EN EL EQUIPO GHP.

En el equipo GHP utilizado, cada una de las placas cuenta con tres sensores; uno está ubicado en el centro y los otros dos en puntos laterales. A manera de facilitar su identificación, serán llamados: sensor centro, sensor central derecho y sensor superior izquierdo (desde una vista frontal al equipo).

De acuerdo al estándar ASTM C177-13 [77], en cualquiera de las placas la diferencia de temperatura a través de la superficie en la dirección lateral debe ser menor al 2% de la diferencia de temperatura impuesta a través de la muestra. Se analizó el cumplimiento de esta condición

para cada una de las pruebas tomando como referencia para el cálculo de las diferencias (absolutas) las mediciones del sensor centro. Los resultados se muestran en la Tabla F.1. Se marcan en color rojo los casos en los cuales no se cumplió la condición.

Tabla F.1. Diferencias absolutas entre las mediciones de los sensores de cada placa.

Muestra	ΔT (°C)	T_m (°C)	Criterio < X valor	Placa caliente		Placa fría	
				$ S_c - S_{cd} $	$ S_c - S_{si} $	$ S_c - S_{cd} $	$ S_c - S_{si} $
1	8.76	23.14	0.175	0.073	0.065	0.185	0.388
1	11.48	24.49	0.230	0.076	0.077	0.372	0.486
1	12.62	25.23	0.252	0.108	0.102	0.362	0.517
1	19.53	30.91	0.391	0.329	1.775	0.253	0.495
1	21.01	32.11	0.420	0.676	2.227	1.443	1.710
2	11.48	24.88	0.245	0.081	0.076	0.270	0.419
2	13.12	25.46	0.262	0.098	0.198	0.246	0.454
2	12.23	24.81	0.245	0.075	0.111	0.293	0.445
2	12.10	24.90	0.242	0.081	0.078	0.401	0.569
3	12.21	24.82	0.244	0.073	0.073	0.325	0.463
3	11.44	24.75	0.228	0.093	0.096	0.188	0.282

* S_c : sensor centro, S_{cd} : sensor central derecho, S_{si} : sensor superior izquierdo.

Los resultados de la placa caliente mostraron que, los sensores obtienen mediciones muy cercanas entre sí y se cumple la condición en la mayoría de los casos. El incumplimiento en algunas pruebas puede ser atribuido a las pérdidas de calor. Esto fue observado al comparar los perfiles de temperatura de las pruebas 1, 2 y 3 con las pruebas 4 y 5 de la muestra 1. En las primeras tres pruebas la temperatura de la guarda caliente fue 1-2°C mayor que la temperatura de la placa caliente lo cual redujo las pérdidas de calor de la placa, principalmente de los sensores laterales que se encuentran hacia los límites de la placa. Mientras que en las pruebas 4 y 5 la temperatura de la guarda caliente fue de al menos 10°C menor que la temperatura de la placa, lo cual, se considera, causó mayores pérdidas de calor.

Sobre los resultados de la placa fría en casi todos los casos no se cumple con el criterio. Se desconoce con exactitud las causas, no obstante, dentro del análisis de los perfiles de temperatura se observó que en todas las pruebas las mediciones del sensor central derecho y sensor superior izquierdo son cercanas entre sí mientras que el sensor centro presenta temperaturas mayores. Se considera que en los bordes de la muestra ocurren las desviaciones mayores en el flujo de calor que atraviesa la muestra desde la placa caliente hacia la placa fría. Además, la guarda secundaria con función de aislamiento que protege la placa fría en todas las pruebas se encuentra a temperatura de al menos 4°C mayor que temperaturas de la placa fría.

Analizando las mediciones de cada sensor en las pruebas de Pech-Can [78], se observa cierta tendencia en las desviaciones entre los sensores de cada placa. Entre mayor sea el espesor, las diferencias entre las mediciones de los sensores son mayores en la placa fría. Caso contrario, entre menor sea el espesor de la muestra, las variaciones mayores en las mediciones de los sensores se presentan en la placa caliente.

Se realizó un procedimiento sugerido por la ASTM C177-13 [77] sobre el error de medición de la instrumentación. La prueba consistió en colocar la placa caliente en contacto térmico con la placa fría insertando una placa de aluminio de 1.6 mm de espesor entre ellas. Se ajustó la placa fría a la temperatura deseada y se mantuvo apagada la fuente de alimentación de la placa caliente. Se analizaron las temperaturas a partir del estado estacionario con el fin de detectar las diferencias. Para los sensores que comparten la misma posición en cada placa; sensores centro, sensores laterales derecho y sensores posteriores se obtuvieron diferencias promedio de 0.05, 0.27, 0.26°C, respectivamente.

Con respecto al sensor centro, las diferencias absolutas promedio entre los sensores de la placa caliente fueron 0.19, 0.10°C y para la placa fría 0.09, 0.18°C.

ANEXO G. EVOLUCIÓN TEMPORAL DE LAS TEMPERATURAS Y DE LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DEL MATERIAL EN ESTADO SECO Y CON DIFERENTES CONTENIDOS DE HUMEDAD.

En las siguientes figuras se muestran los perfiles de temperatura obtenidos con el equipo GHP para una de las pruebas de cada muestra. Las mediciones representan el valor promedio de los sensores correspondientes a la placa caliente y a la placa fría. Se incluye también la evolución de la conductividad térmica hasta que alcanza un comportamiento constante como resultado del estado estable de las temperaturas.

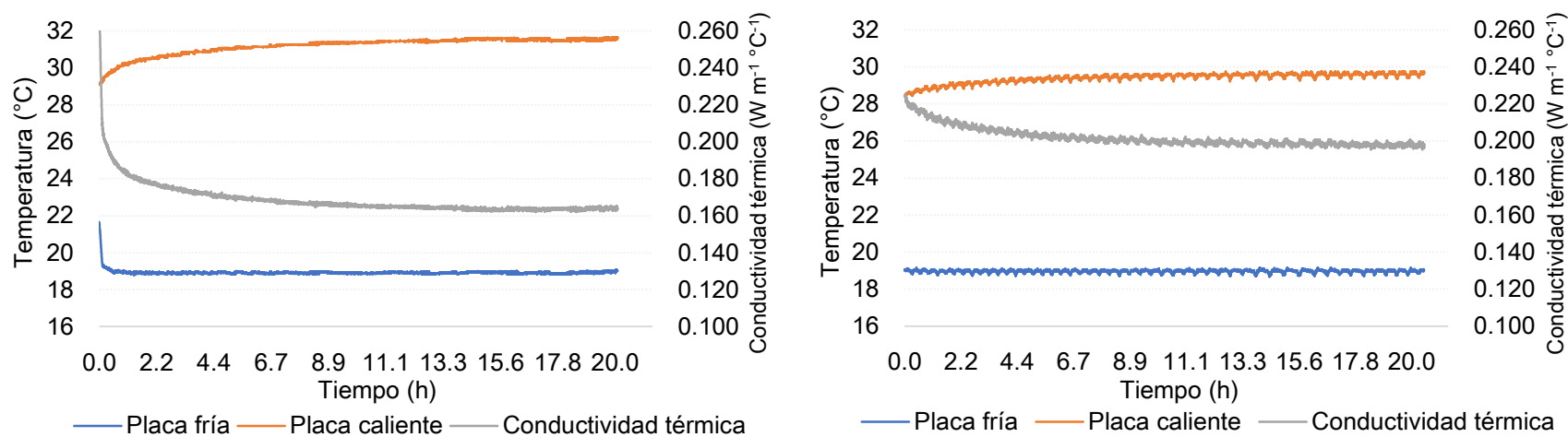


Figura G.1. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 1 sin capa de acabado (izquierda) y con capa de acabado (derecha).

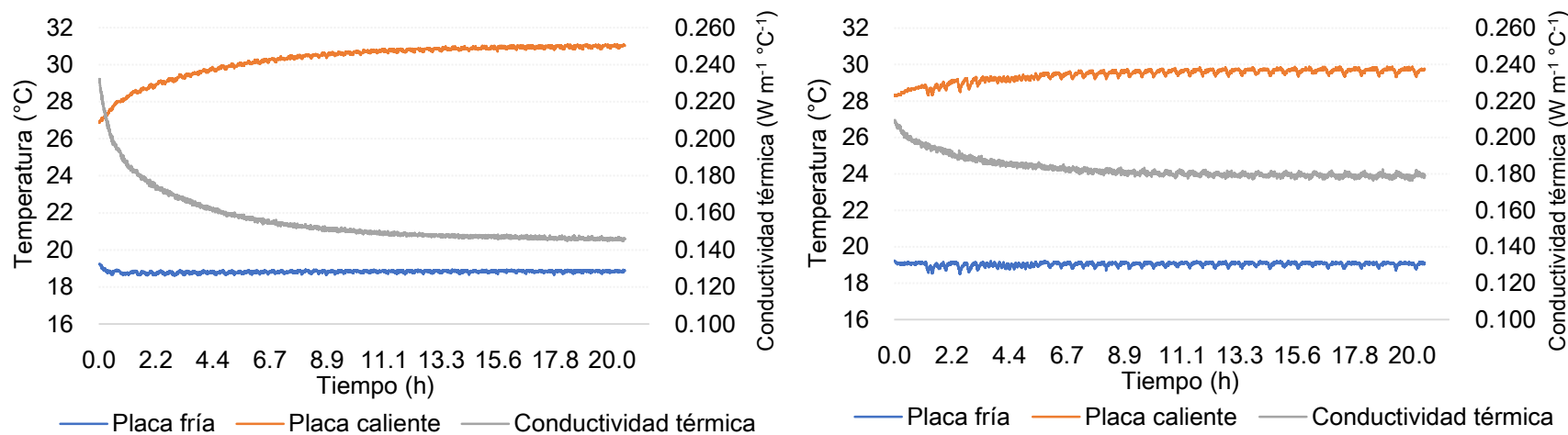


Figura G.2. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 2 sin capa de acabado (izquierda) y con capa de acabado (derecha).

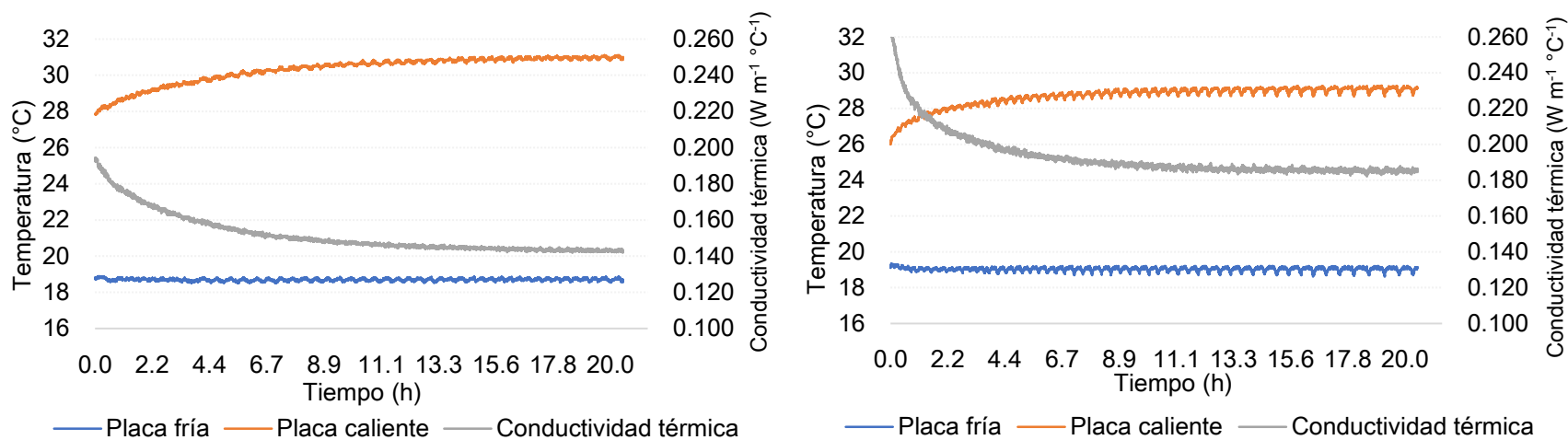


Figura G.3. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 3 sin capa de acabado (izquierda) y con capa de acabado (derecha).

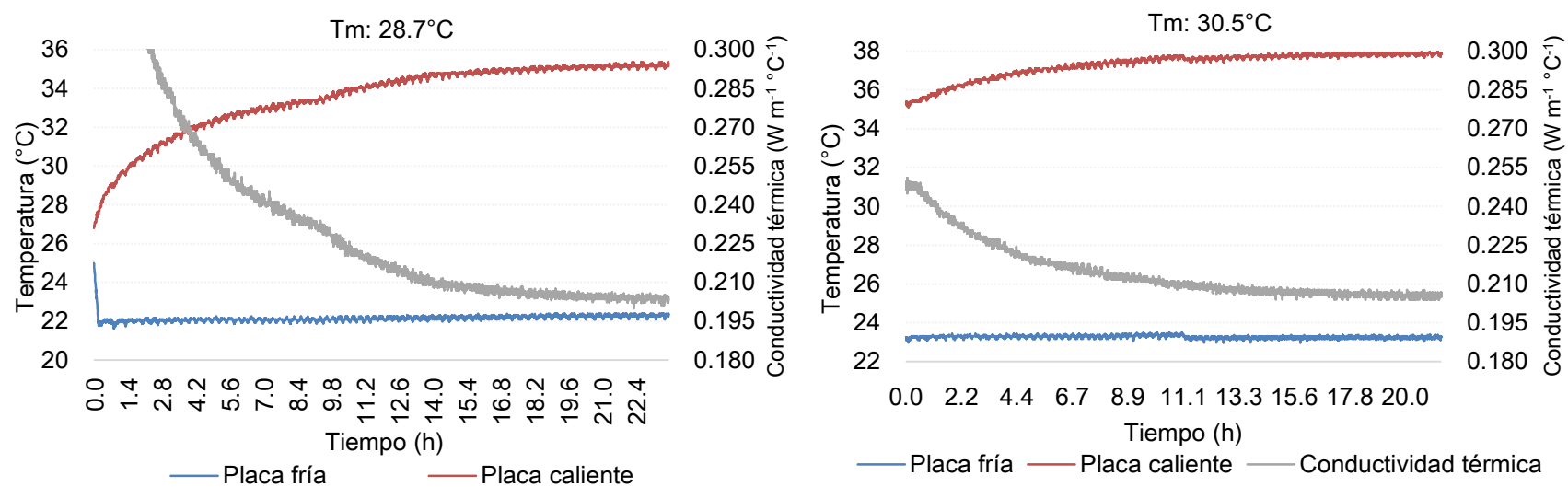


Figura G.4. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 2 con capa de acabado a una temperatura media de 28.7°C (izquierda) y 30.5°C (derecha).

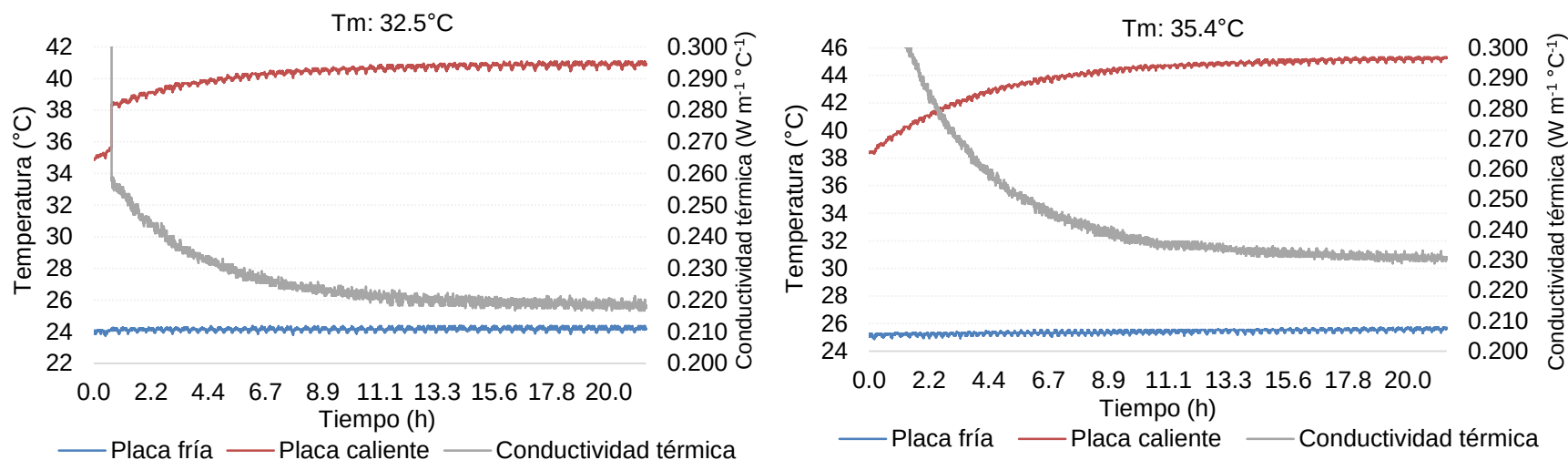


Figura G.5. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 2 con capa de acabado a una temperatura media de 32.5°C (izquierda) y 35.4°C (derecha).

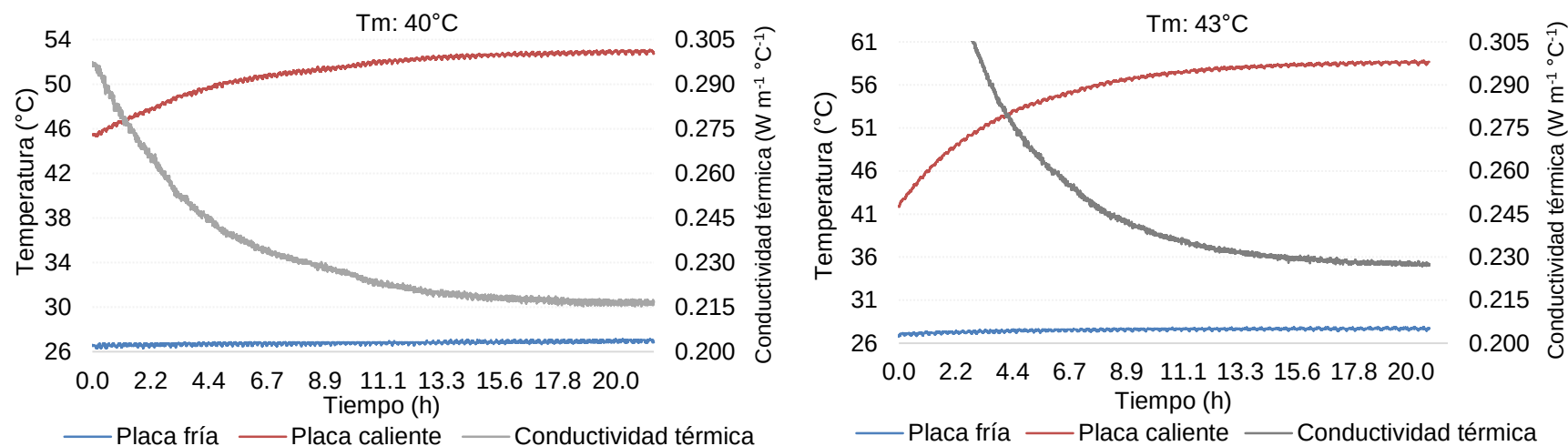


Figura G.6. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 2 con capa de acabado a una temperatura media de 40°C (izquierda) y 43°C (derecha).

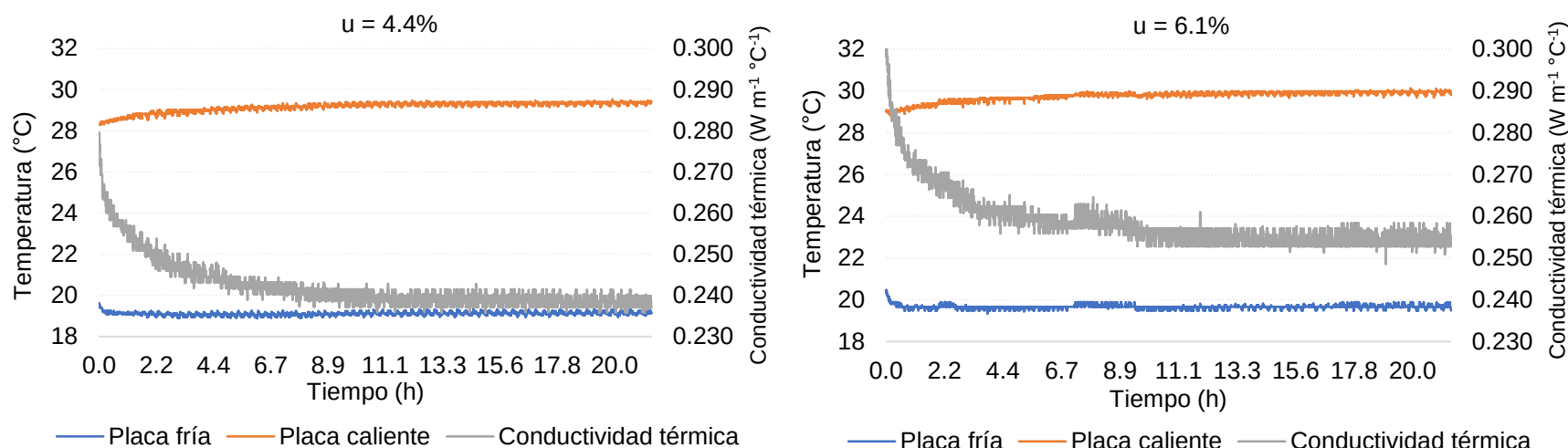


Figura G.7. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 3 con capa de acabado a una temperatura media de 24°C para un contenido de humedad de 4.4% (izquierda) y 6.1% (derecha).

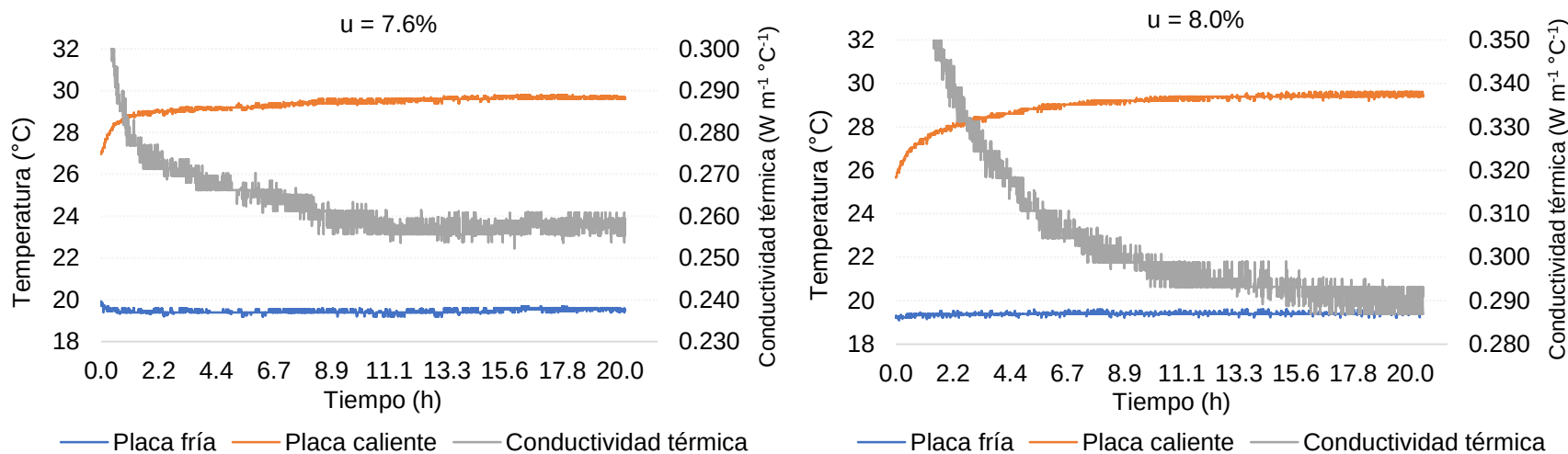


Figura G.8. Evolución temporal de la temperatura en la placa caliente y en la placa fría, y de la conductividad térmica para la muestra 3 con capa de acabado a una temperatura media de 24°C para un contenido de humedad de 7.6% (izquierda) y 8.0% (derecha).

ANEXO H. CÁLCULO PARA LA OBTENCIÓN DE LA PERMEABILIDAD AL VAPOR DE AGUA.

El cálculo de la permeabilidad al vapor de agua así como el factor de resistencia a la difusión de vapor se realizó de acuerdo a las ecuaciones presentadas en el ASTM E96/E96M-16 [80].

$$WVT = \frac{G}{t A} \quad (H.1)$$

G: cambio de masa, g.

t: tiempo durante el cual ocurre G, h.

G/t: pendiente de la línea recta, g h⁻¹.

A: área de prueba, m².

WVT: tasa de transmisión de vapor, g h⁻¹ m⁻².

$$Permeanza = \frac{WVT}{P_s (R_1 - R_2)} \quad (H.2)$$

P_s: presión de vapor de saturación a la temperatura de prueba, mm Hg (1.333E+2 Pa).

R₁: humedad relativa expresada como fracción (la de la cámara para el método de ambiente seco o la del recipiente para el método de ambiente húmedo).

R₂: humedad relativa expresada como fracción (la de la cámara para el método de ambiente húmedo o la del desecante).

Permeanza, (kg Pa⁻¹ s⁻¹ m⁻²).

$$\delta_v = Permeanza \times L \quad (H.3)$$

δ: Permeabilidad al vapor de agua, (kg m⁻¹ s⁻¹ Pa⁻¹).

L: espesor de la muestra, m.

$$\delta_a = \frac{2.306 \times 10^{-5} P_0}{R_v T P} \quad (H.4)$$

δ_a: Permeabilidad de aire (para corrección) = 1.96E-10 kg m⁻¹ s⁻¹ Pa⁻¹.

T: Temperatura de prueba, 23°C (296.15 K).

P: Presión ambiente (para corrección), 100948.30 Pa.

P_o: Presión atmosférica estándar, 101325.0 Pa.

R_v: Constante de gas ideal para agua, 461.50 J K⁻¹ kg⁻¹.

Permeanza de aire (para corrección) = 9.80E-9 kg m⁻² s⁻¹ Pa⁻¹.

Resistencia de aire (para corrección) = 1.02E+8 kg m⁻² s⁻¹ Pa⁻¹.

Resistencia de superficie = 4.0E+7 kg m⁻² s⁻¹ Pa⁻¹.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad (H.5)$$

μ: Factor de resistencia a la difusión de vapor de agua, adm.

ANEXO I. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA Y HUMEDAD RELATIVA DEL AMBIENTE INTERIOR DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES.

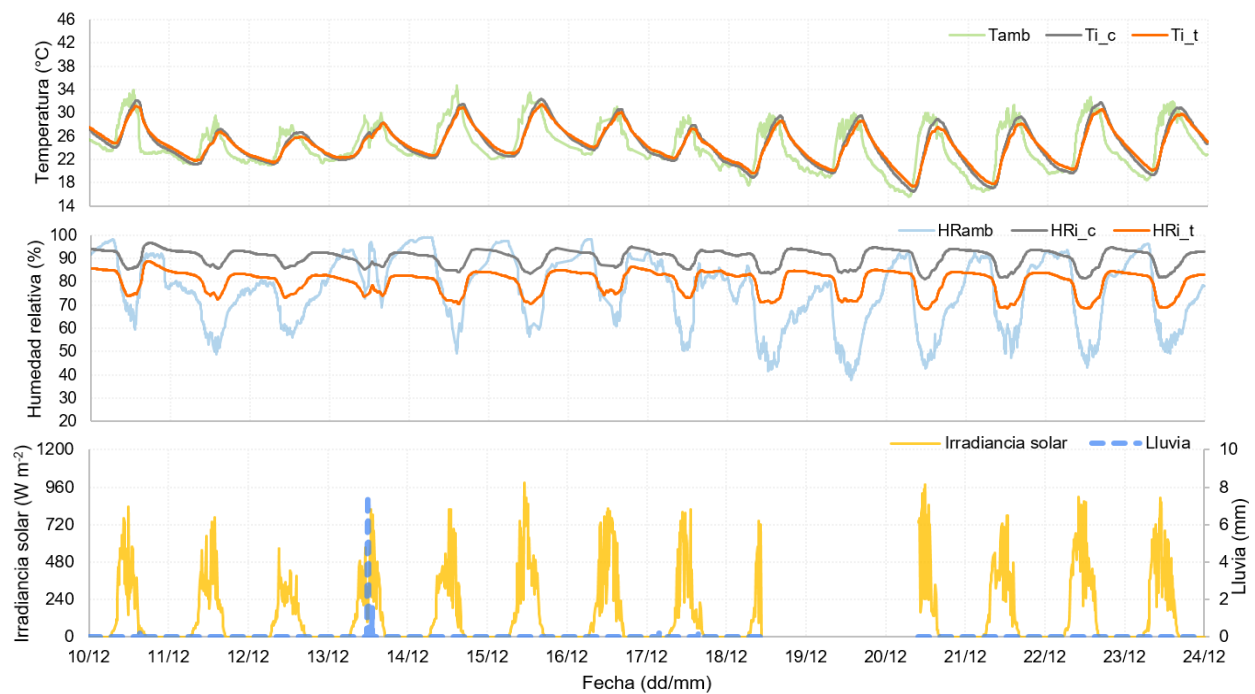


Figura I.1 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 10 al 23 de diciembre 2023.

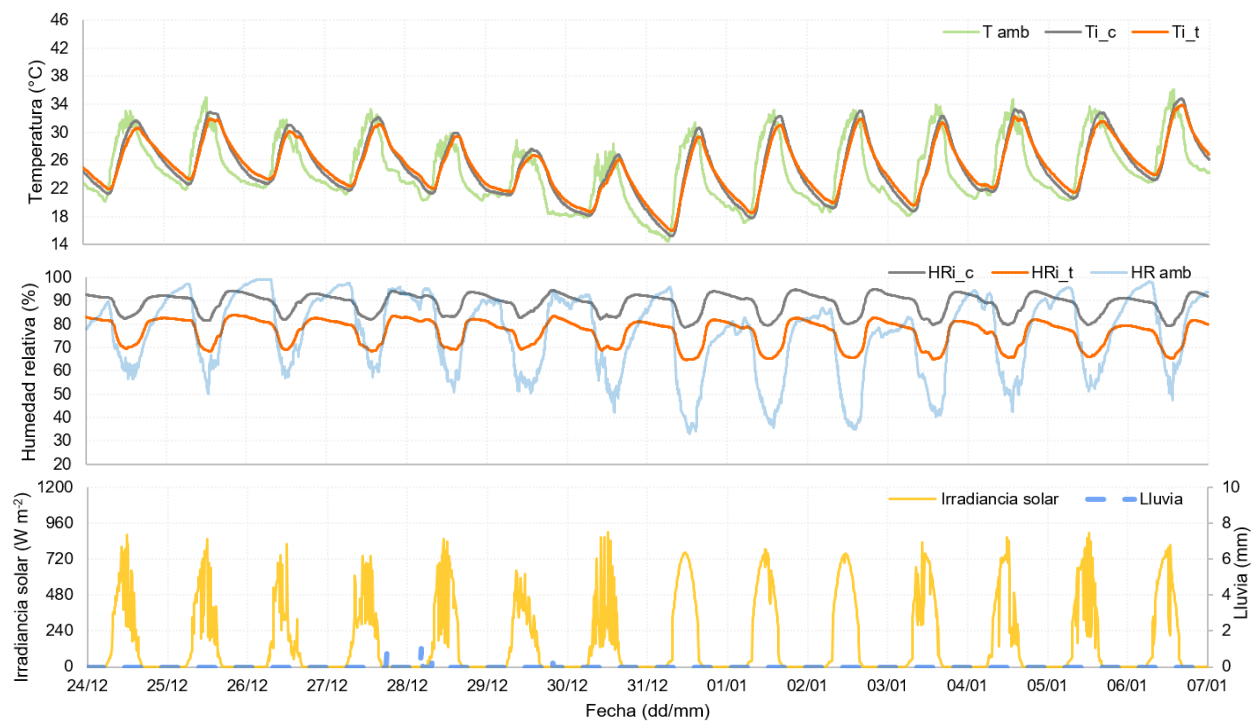


Figura I.2 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 24 de diciembre al 6 de enero de 2024.

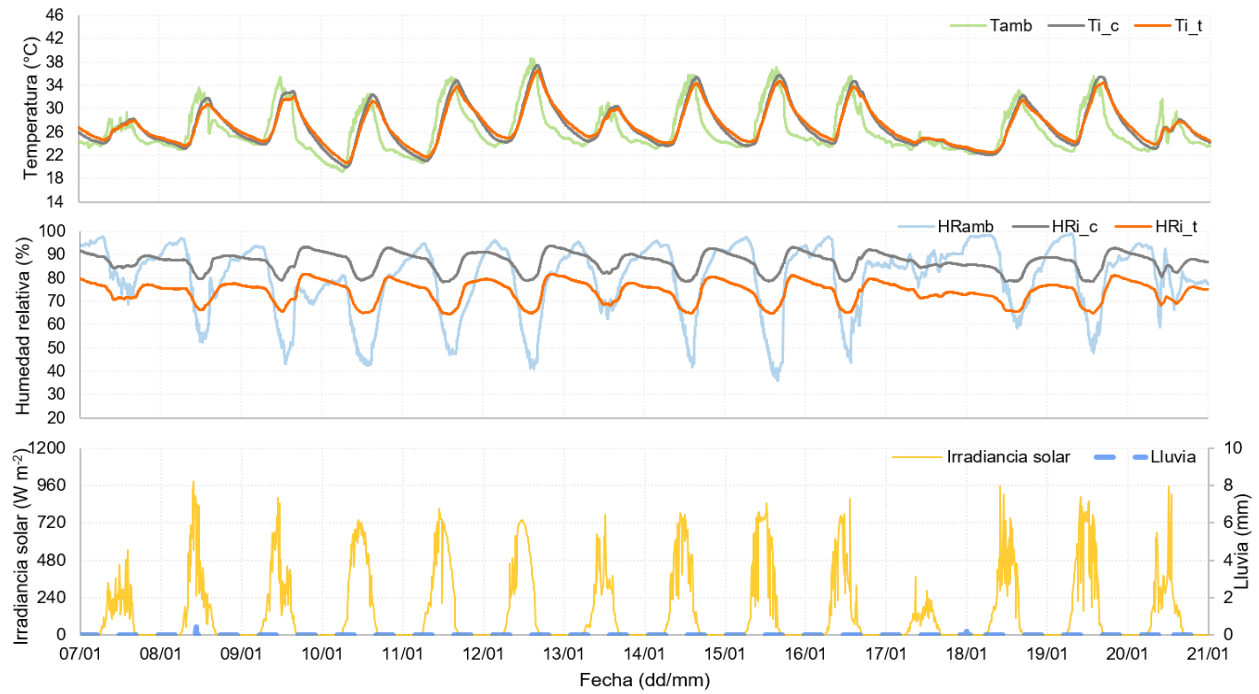


Figura I.3 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 7 al 20 de enero de 2024.

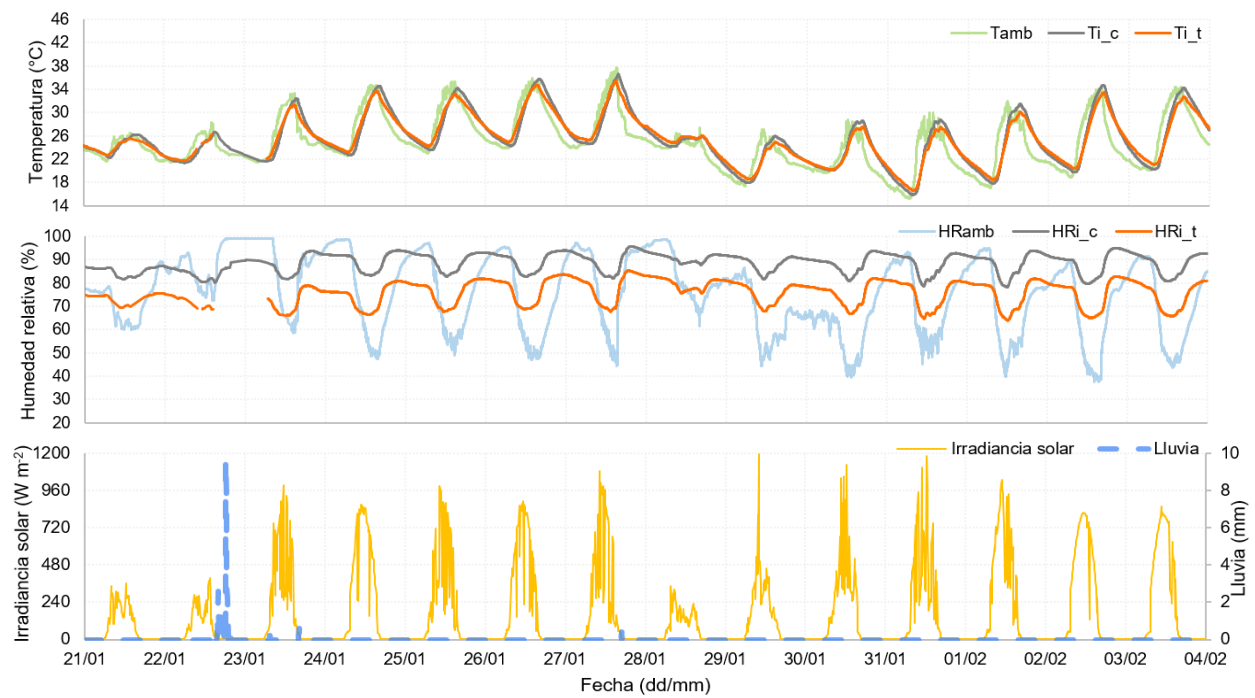


Figura I.4 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 21 de enero al 3 de febrero de 2024.

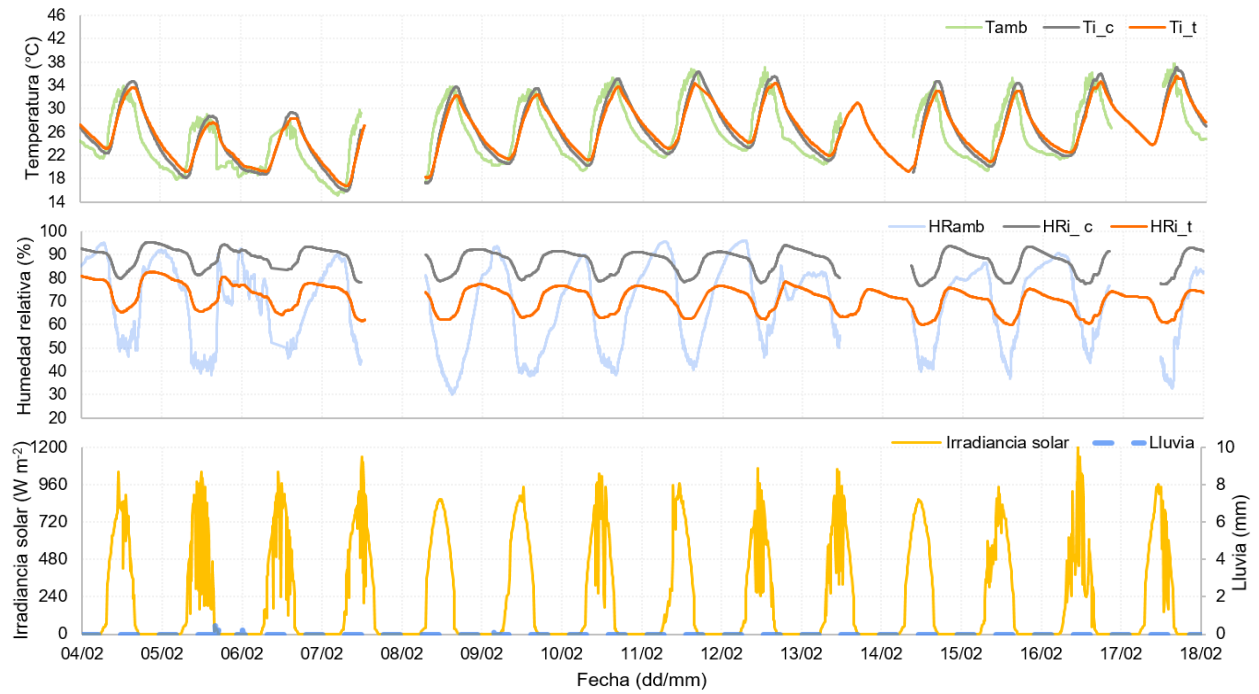


Figura I.5 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 4 al 17 de febrero de 2024.

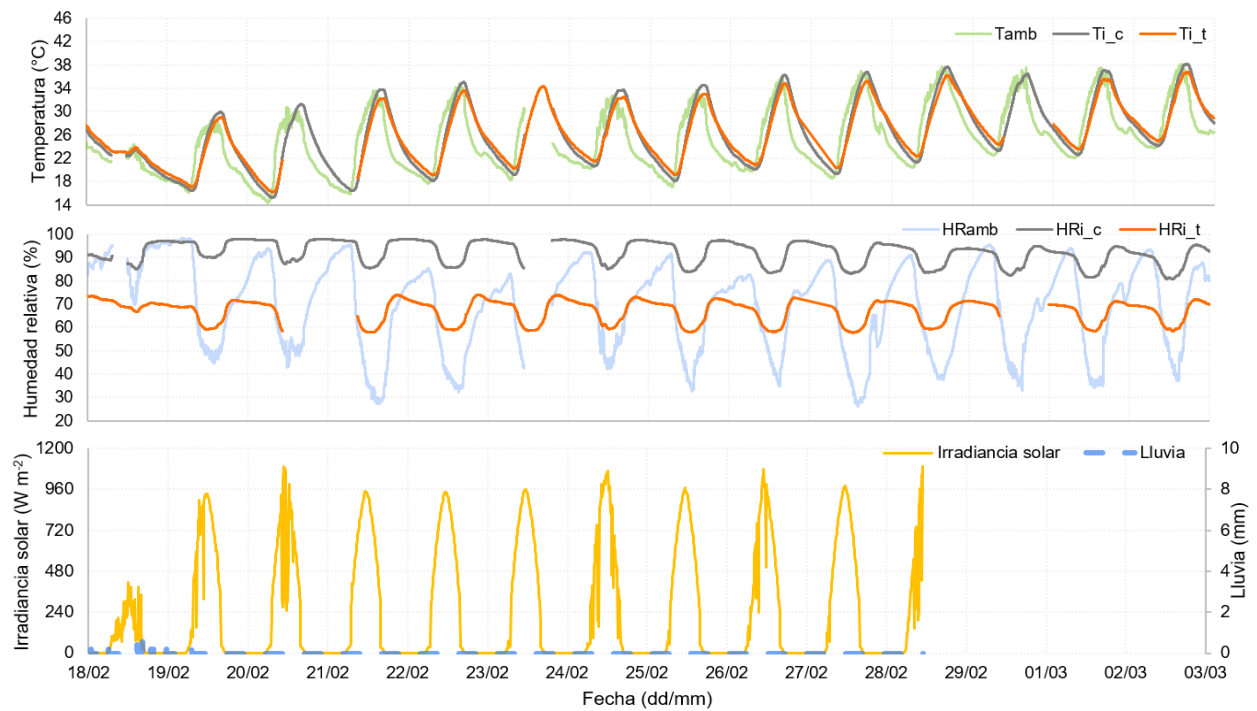
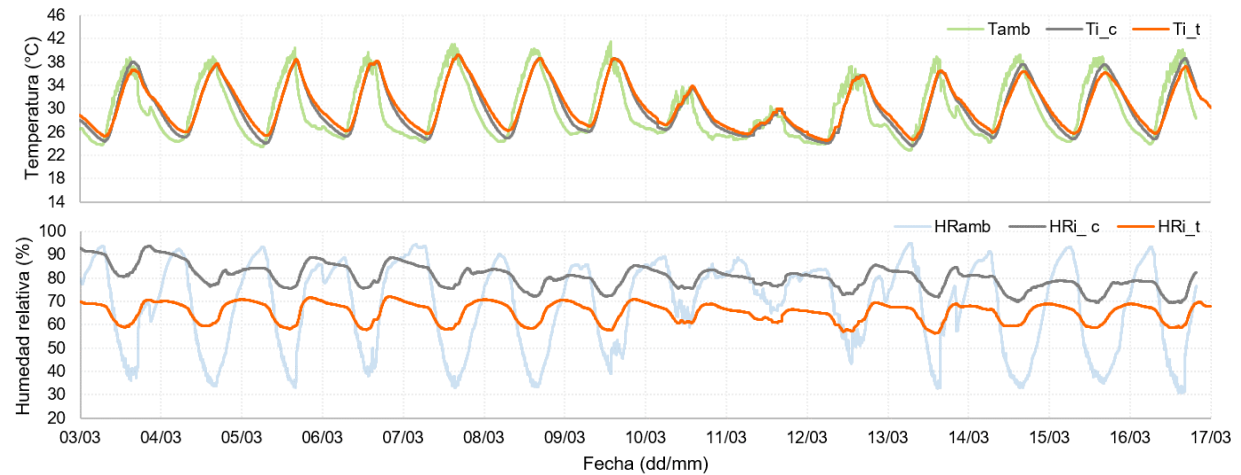


Figura I.6 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 18 de febrero al 2 de marzo de 2024.



*no se cuentan con los datos de irradiancia solar y lluvia de estos días.

Figura I.7 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 3 al 16 de marzo de 2024.

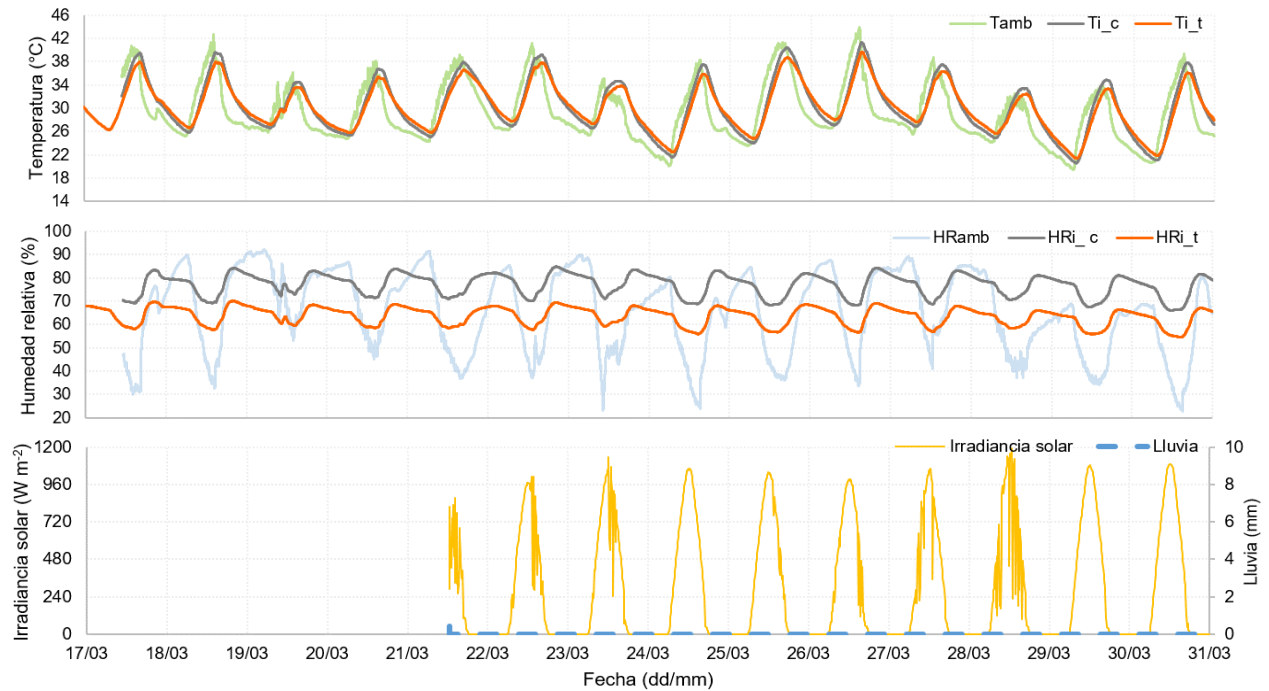


Figura I.8 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 17 al 30 de marzo de 2024.

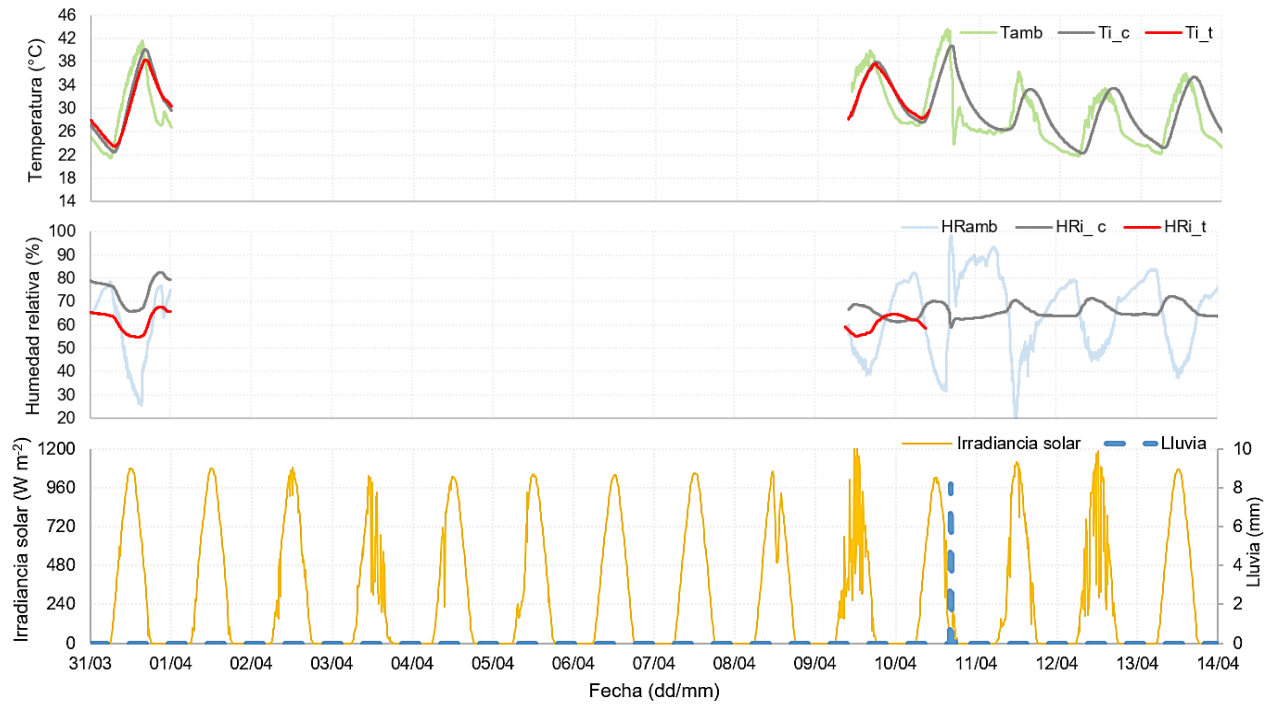


Figura I.9 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 31 de marzo al 13 de abril de 2024.

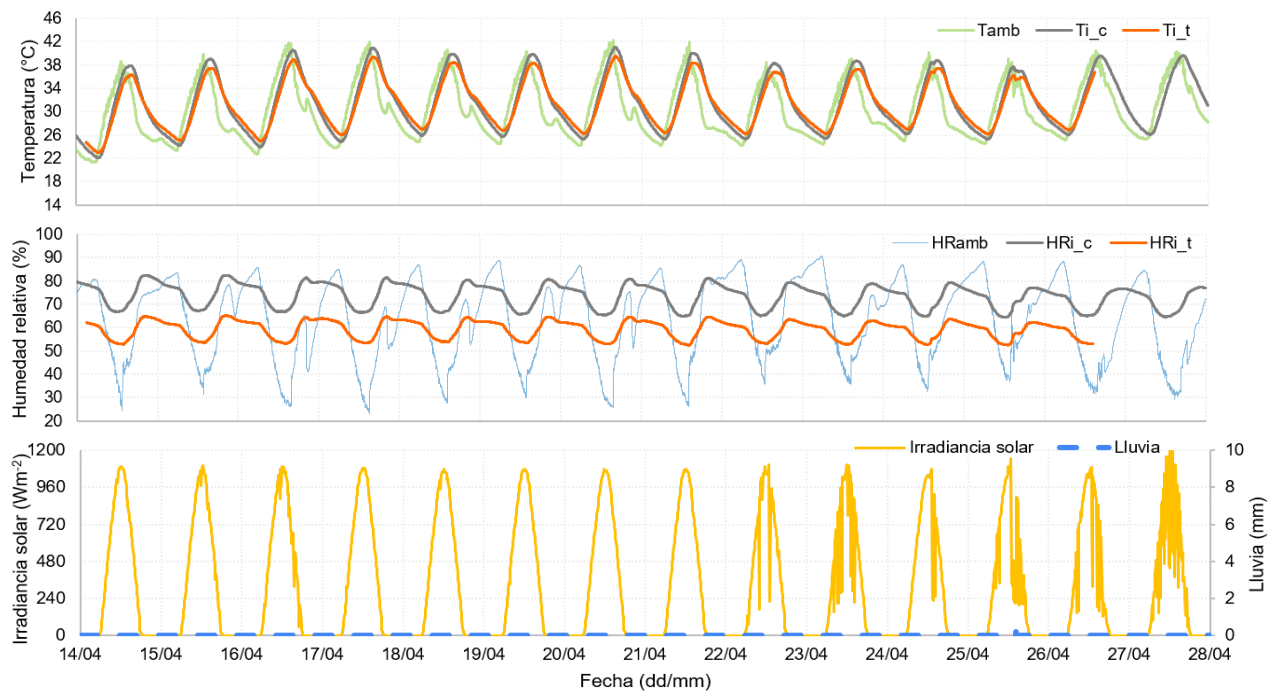


Figura I.10 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 14 al 27 de abril de 2024.

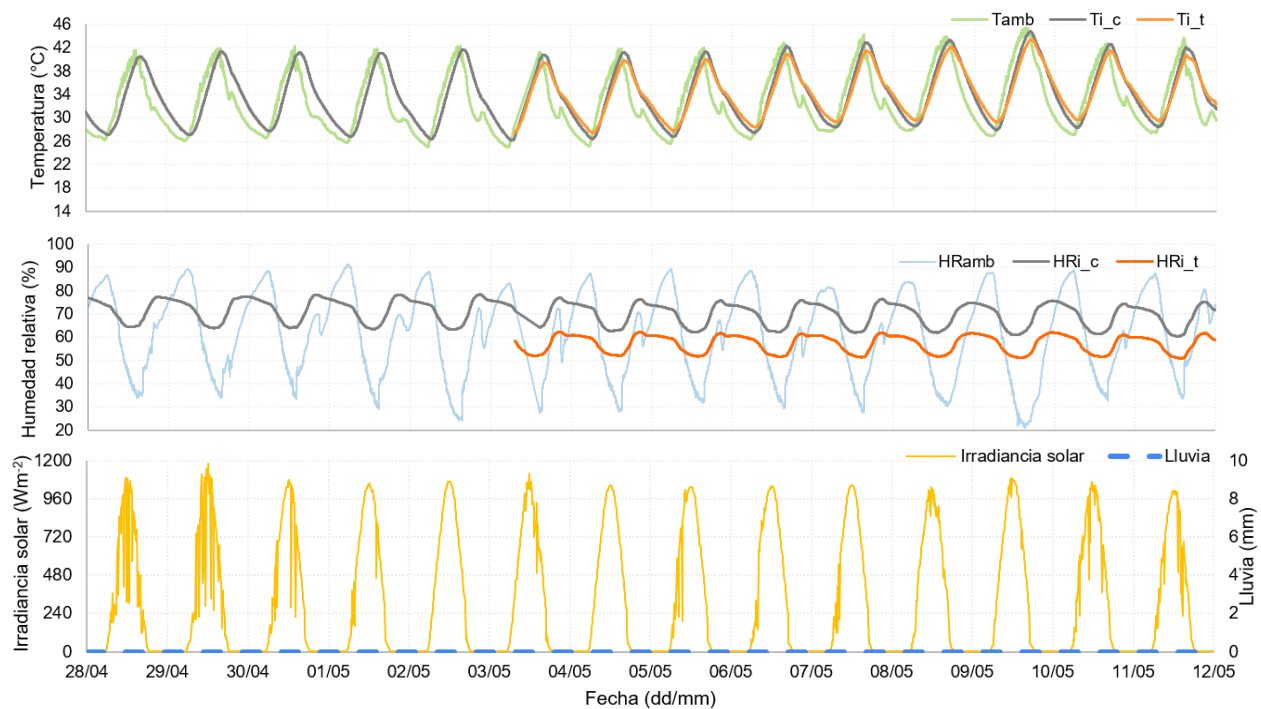


Figura I.11 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 28 de abril al 11 de mayo de 2024.

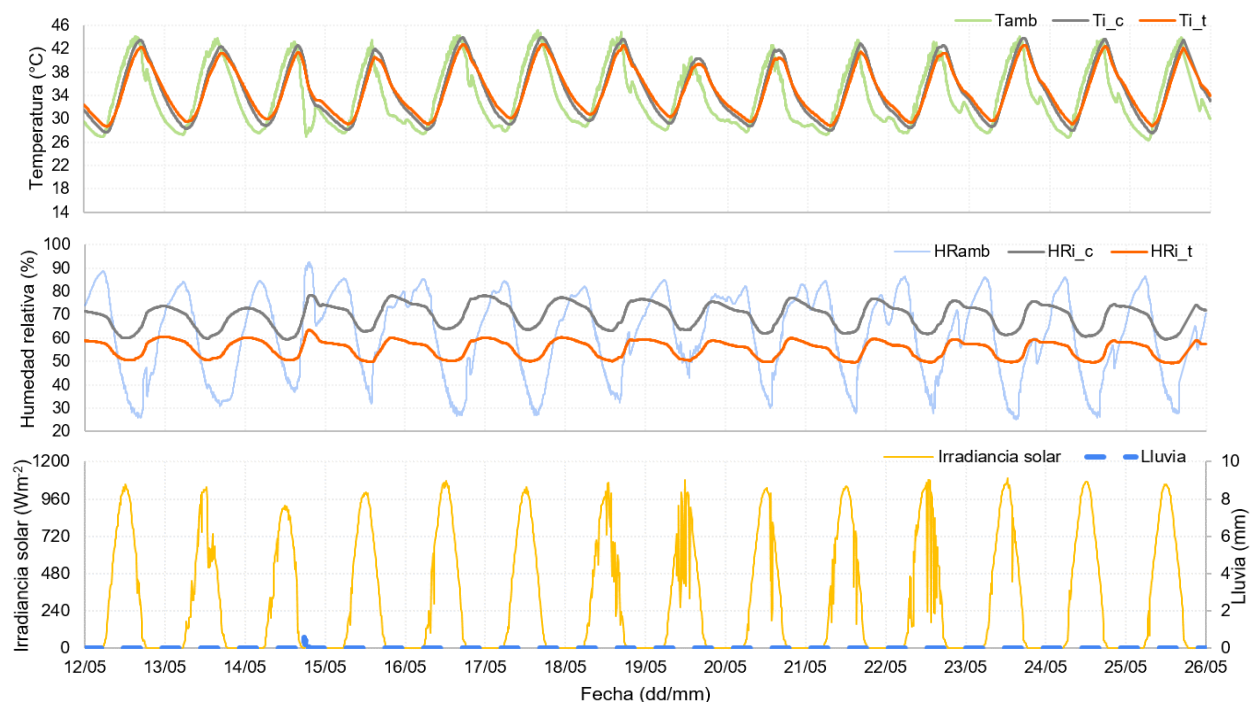


Figura I.12 Condiciones ambientales y comportamiento del ambiente interior de las celdas experimentales del 12 al 25 de mayo de 2024.

ANEXO J. DIFERENCIAL DE TEMPERATURA ENTRE EL PICO DE TEMPERATURA DEL AMBIENTE EXTERIOR Y EL PICO DE TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR.

Tabla J.1 Diferencial de temperatura en °C entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales.

Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc
10/12/2023	2.6	1.8	04/01/2024	2.4	1.4	29/01/2024	2.2	1.2	23/02/2024	-	-
11/12/2023	2.7	2.2	05/01/2024	1.7	0.5	30/01/2024	0.9	-0.2	24/02/2024	0.3	-0.9
12/12/2023	1.9	1.2	06/01/2024	2.2	1.3	31/01/2024	2.6	1.2	25/02/2024	0.7	-0.8
13/12/2023	1.7	1.6	07/01/2024	1.4	1.1	01/02/2024	1.9	0.4	26/02/2024	1.0	-0.4
14/12/2023	3.8	3.2	08/01/2024	3.0	1.8	02/02/2024	0.9	-0.5	27/02/2024	1.7	0.2
15/12/2023	2.0	1.1	09/01/2024	3.4	2.4	03/02/2024	1.7	0.2	28/02/2024	1.5	0.0
16/12/2023	0.9	0.3	10/01/2024	1.2	0.1	04/02/2024	0.3	-0.8	29/02/2024	-	1.1
17/12/2023	2.2	1.6	11/01/2024	1.7	0.5	05/02/2024	1.5	0.4	01/03/2024	2.0	0.4
18/12/2023	1.2	0.3	12/01/2024	2.1	1.1	06/02/2024	-0.5	-1.6	02/03/2024	1.3	-0.1
19/12/2023	1.3	0.5	13/01/2024	1.1	0.6	07/02/2024	-	-	03/03/2024	2.1	0.7
20/12/2023	2.4	1.0	14/01/2024	1.4	0.4	08/02/2024	1.5	0.1	04/03/2024	1.3	1.4
21/12/2023	3.2	2.1	15/01/2024	2.3	1.2	09/02/2024	0.9	-0.2	05/03/2024	1.9	2.2
22/12/2023	2.2	1.0	16/01/2024	1.9	0.9	10/02/2024	1.5	0.1	06/03/2024	1.5	1.7
23/12/2023	2.2	1.1	17/01/2024	1.0	1.1	11/02/2024	-	0.4	07/03/2024	1.8	1.9
24/12/2023	2.3	1.3	18/01/2024	1.6	0.8	12/02/2024	2.8	1.6	08/03/2024	1.6	1.6
25/12/2023	3.1	2.1	19/01/2024	1.2	0.1	13/02/2024	-	0.0	09/03/2024	2.9	2.9
26/12/2023	1.7	0.7	20/01/2024	1.6	1.4	14/02/2024	1.4	-0.3	10/03/2024	-0.1	0.3
27/12/2023	2.0	1.1	21/01/2024	-	0.3	15/02/2024	2.2	0.8	11/03/2024	0.4	0.7
28/12/2023	0.4	0.0	22/01/2024	-	1.6	16/02/2024	1.6	0.3	12/03/2024	1.5	1.5
29/12/2023	0.7	-0.2	23/01/2024	1.0	0.0	17/02/2024	2.1	0.6	13/03/2024	2.4	2.5
30/12/2023	2.2	1.5	24/01/2024	1.1	0.2	18/02/2024	0.6	0.9	14/03/2024	2.9	1.7
31/12/2023	2.1	0.8	25/01/2024	2.2	1.2	19/02/2024	-0.2	-1.1	15/03/2024	2.8	1.4
01/01/2024	2.1	0.8	26/01/2024	1.2	0.1	20/02/2024	-	-0.6	16/03/2024	2.9	1.5
02/01/2024	1.3	0.1	27/01/2024	2.3	1.2	21/02/2024	1.3	-0.2	17/03/2024	2.8	1.3
03/01/2024	2.6	1.6	28/01/2024	1.3	1.3	22/02/2024	1.3	-0.2	18/03/2024	4.8	3.1

cmt: celda con el muro a escala reducida del material a base de *pak'luum*, cmc: celda con el muro a escala reducida de bloques huecos de concreto.

Tabla J.1 Diferencial de temperatura en °C entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales. Continuación...

Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc
19/03/2024	2.5	1.6	13/04/2024	-	-	08/05/2024	1.8	0.6
20/03/2024	2.8	1.4	14/04/2024	2.2	0.6	09/05/2024	2.0	0.7
21/03/2024	2.6	1.4	15/04/2024	2.3	0.8	10/05/2024	1.3	0.1
22/03/2024	3.3	1.9	16/04/2024	2.8	1.2	11/05/2024	3.0	1.5
23/03/2024	-0.3	-1.1	17/04/2024	2.6	1.1	12/05/2024	1.9	0.7
24/03/2024	2.4	0.8	18/04/2024	2.2	0.8	13/05/2024	2.5	1.4
25/03/2024	2.5	0.9	19/04/2024	2.0	0.4	14/05/2024	1.9	0.6
26/03/2024	4.3	2.7	20/04/2024	2.8	1.2	15/05/2024	2.9	1.5
27/03/2024	2.4	1.3	21/04/2024	3.6	1.9	16/05/2024	1.5	0.3
28/03/2024	0.3	-0.7	22/04/2024	1.7	0.2	17/05/2024	2.4	1.2
29/03/2024	0.6	-0.9	23/04/2024	1.7	0.3	18/05/2024	2.4	0.0
30/03/2024	3.3	1.5	24/04/2024	2.7	1.4	19/05/2024	1.2	0.2
31/03/2024	3.4	1.6	25/04/2024	2.8	1.3	20/05/2024	2.2	0.8
01/04/2024	-	-	26/04/2024	-	0.9	21/05/2024	2.1	0.7
02/04/2024	-	-	27/04/2024	-	0.6	22/05/2024	1.9	0.6
03/04/2024	-	-	28/04/2024	-	1.0	23/05/2024	1.5	0.3
04/04/2024	-	-	29/04/2024	-	0.4	24/05/2024	1.2	0.0
05/04/2024	-	-	30/04/2024	-	1.2	25/05/2024	1.8	0.4
06/04/2024	-	-	01/05/2024	-	0.7			
07/04/2024	-	-	02/05/2024	-	0.5			
08/04/2024	-	-	03/05/2024	1.7	0.4			
09/04/2024	2.4	2.0	04/05/2024	2.0	0.6			
10/04/2024	-	-	05/05/2024	2.1	0.7			
11/04/2024	-	-	06/05/2024	1.9	0.6			
12/04/2024	-	-	07/05/2024	2.8	1.3			

cmt: celda con el muro a escala reducida del material a base de *pak'luum*, cmc: celda con el muro a escala reducida de bloques huecos de concreto.

ANEXO K. DESFASE TEMPORAL ENTRE EL PICO DE TEMPERATURA DEL AMBIENTE EXTERIOR Y EL PICO DE TEMPERATURA DEL AMBIENTE INTERIOR DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES.

Tabla K.1 Desfase temporal en horas entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales.

Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc
10/12/2023	0.6	0.9	04/01/2024	0.7	0.7	29/01/2024	3.4	3.4	23/02/2024	-	-
11/12/2023	1.6	1.5	05/01/2024	2.6	1.6	30/01/2024	3.2	3.1	24/02/2024	2.7	2.5
12/12/2023	2.7	2.5	06/01/2024	2.5	2.2	31/01/2024	3.4	3.2	25/02/2024	2.5	2.3
13/12/2023	0.6	0.5	07/01/2024	2.3	2.0	01/02/2024	3.9	3.7	26/02/2024	1.0	0.9
14/12/2023	1.9	1.9	08/01/2024	1.0	2.5	02/02/2024	1.1	1.0	27/02/2024	2.1	1.9
15/12/2023	3.7	3.5	09/01/2024	3.9	3.6	03/02/2024	2.4	2.4	28/02/2024	1.9	1.7
16/12/2023	1.4	1.4	10/01/2024	0.7	0.6	04/02/2024	3.0	2.7	29/02/2024	-	0.4
17/12/2023	1.2	1.0	11/01/2024	1.8	1.7	05/02/2024	2.0	1.9	01/03/2024	1.0	1.0
18/12/2023	3.4	3.2	12/01/2024	2.1	2.0	06/02/2024	1.5	0.9	02/03/2024	2.0	1.9
19/12/2023	2.6	2.1	13/01/2024	2.8	2.4	07/02/2024	-	-	03/03/2024	0.7	0.6
20/12/2023	3.8	3.6	14/01/2024	2.0	2.0	08/02/2024	2.2	1.9	04/03/2024	1.1	1.1
21/12/2023	2.5	2.1	15/01/2024	1.1	1.0	09/02/2024	2.7	2.5	05/03/2024	0.4	0.3
22/12/2023	3.2	2.9	16/01/2024	0.5	1.1	10/02/2024	1.8	1.8	06/03/2024	2.6	2.5
23/12/2023	2.5	1.2	17/01/2024	1.1	2.7	11/02/2024	-	2.3	07/03/2024	2.0	2.0
24/12/2023	2.2	1.8	18/01/2024	1.5	1.5	12/02/2024	3.0	2.8	08/03/2024	1.9	1.6
25/12/2023	1.0	1.3	19/01/2024	2.8	2.0	13/02/2024	-	-	09/03/2024	1.1	1.1
26/12/2023	1.9	1.8	20/01/2024	0.7	1.1	14/02/2024	0.9	0.7	10/03/2024	3.1	3.0
27/12/2023	2.7	2.3	21/01/2024	-	1.2	15/02/2024	1.9	1.7	11/03/2024	1.9	2.1
28/12/2023	1.3	1.1	22/01/2024	-	0.9	16/02/2024	2.6	2.6	12/03/2024	3.7	3.7
29/12/2023	1.1	0.8	23/01/2024	0.0	0.7	17/02/2024	0.8	0.8	13/03/2024	1.2	1.2
30/12/2023	1.8	1.4	24/01/2024	1.9	2.8	18/02/2024	0.5	0.6	14/03/2024	1.0	1.1
31/12/2023	1.1	1.2	25/01/2024	0.0	0.8	19/02/2024	2.5	2.2	15/03/2024	0.6	0.5
01/01/2024	1.9	1.8	26/01/2024	1.4	2.2	20/02/2024	-	4.4	16/03/2024	1.0	0.9
02/01/2024	2.1	2.2	27/01/2024	-0.4	0.5	21/02/2024	2.3	1.7	17/03/2024	2.5	2.6
03/01/2024	1.9	1.9	28/01/2024	0.6	0.5	22/02/2024	1.4	1.2	18/03/2024	0.6	0.5

cmt: celda con el muro a escala reducida del material a base de *pak'luum*, cmc: celda con el muro a escala reducida de bloques huecos de concreto.

Tabla K.1 Desfase temporal en horas entre el pico de temperatura del ambiente exterior y el pico de temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales. Continuación...

Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc	Fecha	cmt	cmc
19/03/2024	1.9	1.7	13/04/2024	-	-	08/05/2024	1.5	1.0
20/03/2024	0.7	0.6	14/04/2024	2.9	2.8	09/05/2024	2.0	1.6
21/03/2024	1.1	1.0	15/04/2024	2.3	1.9	10/05/2024	1.1	0.8
22/03/2024	2.9	2.7	16/04/2024	1.4	1.2	11/05/2024	0.5	0.4
23/03/2024	5.9	4.7	17/04/2024	1.0	0.7	12/05/2024	1.8	1.6
24/03/2024	1.0	0.7	18/04/2024	1.8	1.5	13/05/2024	1.4	1.1
25/03/2024	1.5	1.3	19/04/2024	2.0	1.6	14/05/2024	0.9	0.9
26/03/2024	0.6	0.6	20/04/2024	0.5	0.5	15/05/2024	0.8	0.6
27/03/2024	2.7	2.6	21/04/2024	0.8	0.8	16/05/2024	2.0	1.7
28/03/2024	2.4	1.3	22/04/2024	2.8	2.4	17/05/2024	1.4	1.1
29/03/2024	2.1	1.7	23/04/2024	1.7	1.3	18/05/2024	0.5	0.5
30/03/2024	1.0	0.8	24/04/2024	2.9	2.3	19/05/2024	2.0	1.9
31/03/2024	0.9	0.6	25/04/2024	1.5	1.4	20/05/2024	2.3	2.2
01/04/2024	-	-	26/04/2024	-	1.4	21/05/2024	1.0	0.9
02/04/2024	-	-	27/04/2024	-	1.8	22/05/2024	3.0	2.9
03/04/2024	-	-	28/04/2024	-	1.9	23/05/2024	1.4	1.2
04/04/2024	-	-	29/04/2024	-	0.5	24/05/2024	0.5	0.5
05/04/2024	-	-	30/04/2024	-	1.4	25/05/2024	0.6	0.7
06/04/2024	-	-	01/05/2024	-	1.5			
07/04/2024	-	-	02/05/2024	-	1.5			
08/04/2024	-	-	03/05/2024	1.5	1.4			
09/04/2024	1.5	2.0	04/05/2024	1.6	1.5			
10/04/2024	-	-	05/05/2024	0.7	0.6			
11/04/2024	-	-	06/05/2024	0.8	0.7			
12/04/2024	-	-	07/05/2024	0.9	0.8			

cmt: celda con el muro a escala reducida del material a base de *pak'luum*, cmc: celda con el muro a escala reducida de bloques huecos de concreto.

ANEXO L. DIFERENCIAL DE TEMPERATURA ENTRE EL PICO DE TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE EXTERIOR Y EL PICO DE TEMPERATURA DE LA SUPERFICIE INTERIOR DEL MURO DE TIERRA Y DEL MURO DE BLOQUES DE CONCRETO.

Tabla L.1 Diferencia de temperatura en °C entre el pico de temperatura de la superficie exterior y el pico de temperatura de la superficie interior del muro del material a base de *pak'luum* y del muro de bloques huecos de concreto.

Fecha	mt	mc	Fecha	mt	mc	Fecha	mt	mc	Fecha	mt	mc
10/12/2023	2.9	0.8	04/01/2024	2.7	0.4	29/01/2024	3.1	0.4	23/02/2024	1.0	-1.4
11/12/2023	2.2	0.6	05/01/2024	2.6	0.1	30/01/2024	2.7	0.0	24/02/2024	2.1	0.0
12/12/2023	2.6	0.6	06/01/2024	2.1	0.0	31/01/2024	4.3	0.5	25/02/2024	1.2	-0.5
13/12/2023	1.7	0.2	07/01/2024	1.1	0.3	01/02/2024	3.8	-0.2	26/02/2024	1.5	-0.6
14/12/2023	2.2	0.4	08/01/2024	3.2	0.8	02/02/2024	0.9	-0.9	27/02/2024	1.5	-0.5
15/12/2023	2.1	-0.1	09/01/2024	3.6	0.6	03/02/2024	2.0	-0.1	28/02/2024	1.9	-0.2
16/12/2023	2.8	0.0	10/01/2024	1.5	-0.2	04/02/2024	2.0	-0.5	29/02/2024	-1.6	-6.5
17/12/2023	3.5	0.9	11/01/2024	1.7	-0.3	05/02/2024	2.7	-0.1	01/03/2024	2.5	0.4
18/12/2023	2.1	-0.2	12/01/2024	1.4	-0.4	06/02/2024	2.6	-0.5	02/03/2024	2.3	0.3
19/12/2023	2.4	-0.2	13/01/2024	1.5	0.4	07/02/2024	6.2	3.8	03/03/2024	2.3	0.4
20/12/2023	3.6	0.5	14/01/2024	1.8	0.1	08/02/2024	1.5	-0.6	04/03/2024	1.6	0.6
21/12/2023	3.1	0.3	15/01/2024	1.8	-0.1	09/02/2024	1.2	-0.4	05/03/2024	2.0	0.8
22/12/2023	2.5	0.0	16/01/2024	2.8	0.5	10/02/2024	1.7	-0.3	06/03/2024	1.8	0.9
23/12/2023	2.5	0.5	17/01/2024	1.3	-0.9	11/02/2024	2.5	-0.3	07/03/2024	1.9	0.6
24/12/2023	2.1	0.0	18/01/2024	1.6	-0.2	12/02/2024	3.6	0.3	08/03/2024	1.9	0.6
25/12/2023	2.8	0.7	19/01/2024	1.3	0.0	13/02/2024	1.9	4.0	09/03/2024	3.0	1.5
26/12/2023	3.3	0.7	20/01/2024	4.4	2.2	14/02/2024	1.8	-0.3	10/03/2024	2.1	1.0
27/12/2023	2.1	0.0	21/01/2024	1.3	0.3	15/02/2024	2.1	0.0	11/03/2024	1.5	0.6
28/12/2023	1.8	-0.6	22/01/2024	2.3	0.9	16/02/2024	2.2	-0.1	12/03/2024	2.4	1.2
29/12/2023	3.2	0.2	23/01/2024	1.9	0.3	17/02/2024	2.1	0.1	13/03/2024	2.5	1.2
30/12/2023	3.2	0.0	24/01/2024	1.0	-0.4	18/02/2024	-2.2	-1.1	14/03/2024	2.6	0.9
31/12/2023	1.4	-0.6	25/01/2024	2.2	0.4	19/02/2024	0.9	-0.9	15/03/2024	2.7	0.8
01/01/2024	1.8	-0.5	26/01/2024	1.3	-0.3	20/02/2024	7.5	-0.6	16/03/2024	2.9	0.8
02/01/2024	1.0	-0.7	27/01/2024	2.4	0.3	21/02/2024	1.2	-0.6	17/03/2024	2.6	0.4
03/01/2024	1.6	-0.4	28/01/2024	-0.3	-0.8	22/02/2024	1.2	-0.7	18/03/2024	3.7	1.2

mt: muro a escala reducida del material a base de *pak'luum*, mc: muro a escala reducida de bloques huecos de concreto.

Tabla L.1 Diferencial de temperatura en °C entre el pico de temperatura de la superficie exterior y el pico de temperatura de la superficie interior del muro del material a base de *pak'luum* y del muro de bloques huecos de concreto. Continuación...

Fecha	mt	mc	Fecha	mt	mc	Fecha	mt	mc
19/03/2024	3.1	1.2	13/04/2024	-	-	08/05/2024	1.9	0.2
20/03/2024	3.6	1.4	14/04/2024	2.4	0.4	09/05/2024	1.9	0.1
21/03/2024	2.3	0.5	15/04/2024	2.6	0.4	10/05/2024	2.1	0.4
22/03/2024	3.4	1.1	16/04/2024	2.6	0.4	11/05/2024	4.0	1.6
23/03/2024	3.9	1.2	17/04/2024	2.5	0.5	12/05/2024	1.9	0.2
24/03/2024	2.3	0.3	18/04/2024	2.5	0.6	13/05/2024	2.4	0.6
25/03/2024	2.6	0.4	19/04/2024	2.8	0.7	14/05/2024	3.0	0.9
26/03/2024	4.6	1.8	20/04/2024	-	0.6	15/05/2024	3.3	1.1
27/03/2024	3.3	0.9	21/04/2024	3.6	1.1	16/05/2024	1.6	0.0
28/03/2024	2.4	0.6	22/04/2024	2.8	0.5	17/05/2024	2.1	0.4
29/03/2024	1.7	0.1	23/04/2024	2.7	0.8	18/05/2024	2.6	0.7
30/03/2024	2.6	0.5	24/04/2024	3.4	1.3	19/05/2024	2.6	0.7
31/03/2024	2.8	0.4	25/04/2024	3.8	1.5	20/05/2024	3.1	1.1
01/04/2024	-	-	26/04/2024	-	0.8	21/05/2024	2.8	0.9
02/04/2024	-	-	27/04/2024	-	0.4	22/05/2024	2.7	0.7
03/04/2024	-	-	28/04/2024	-	0.9	23/05/2024	1.8	0.2
04/04/2024	-	-	29/04/2024	-	0.6	24/05/2024	1.6	0.2
05/04/2024	-	-	30/04/2024	-	1.2	25/05/2024	2.6	0.8
06/04/2024	-	-	01/05/2024	-	0.7			
07/04/2024	-	-	02/05/2024	-	0.4			
08/04/2024	-	-	03/05/2024	2.0	0.4			
09/04/2024	2.4	0.6	04/05/2024	2.4	0.6			
10/04/2024	-	-	05/05/2024	2.3	0.6			
11/04/2024	-	-	06/05/2024	2.1	0.4			
12/04/2024	-	-	07/05/2024	2.6	0.7			

mt: muro a escala reducida del material a base de *pak'luum*, mc: muro a escala reducida de bloques huecos de concreto.

ANEXO M. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA EN LAS SUPERFICIES INTERNAS DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES.

En la Figura M.1 se muestra, para unos días de diciembre de 2023, las temperaturas en las superficies internas (Si) de la celda con el muro del material a base de la mezcla *pak'luum* (t) y de la celda con el muro de bloques huecos de concreto (c), respectivamente. De igual forma, en la Figura M.2 se presentan dichas temperaturas para unos días de marzo de 2024. Inicialmente se puede observar que las temperaturas en las caras aisladas (derecha, izquierda, posterior, superior e inferior) son muy cercanas entre sí, una diferencia de alrededor de 1°C entre sí en ambas celdas y en ambos periodos, donde la cara superior es la que muestra las temperaturas mayores. En el periodo de diciembre se encontraron diferencias de 0.8-2.5°C entre los picos de temperatura de la superficie interna de la cara superior (aislada) y de la superficie interna del muro del material a base de la mezcla *pak'luum*. En el periodo de marzo, estas diferencias fueron de 1.7-3.0°C. En el caso del muro de bloques huecos de concreto, los picos de temperatura de la superficie interna de la cara superior y de la superficie interna del muro mostraron diferencias de 0.4-1.7°C en el periodo de diciembre, y de 0.9-2.0°C en el periodo de marzo.

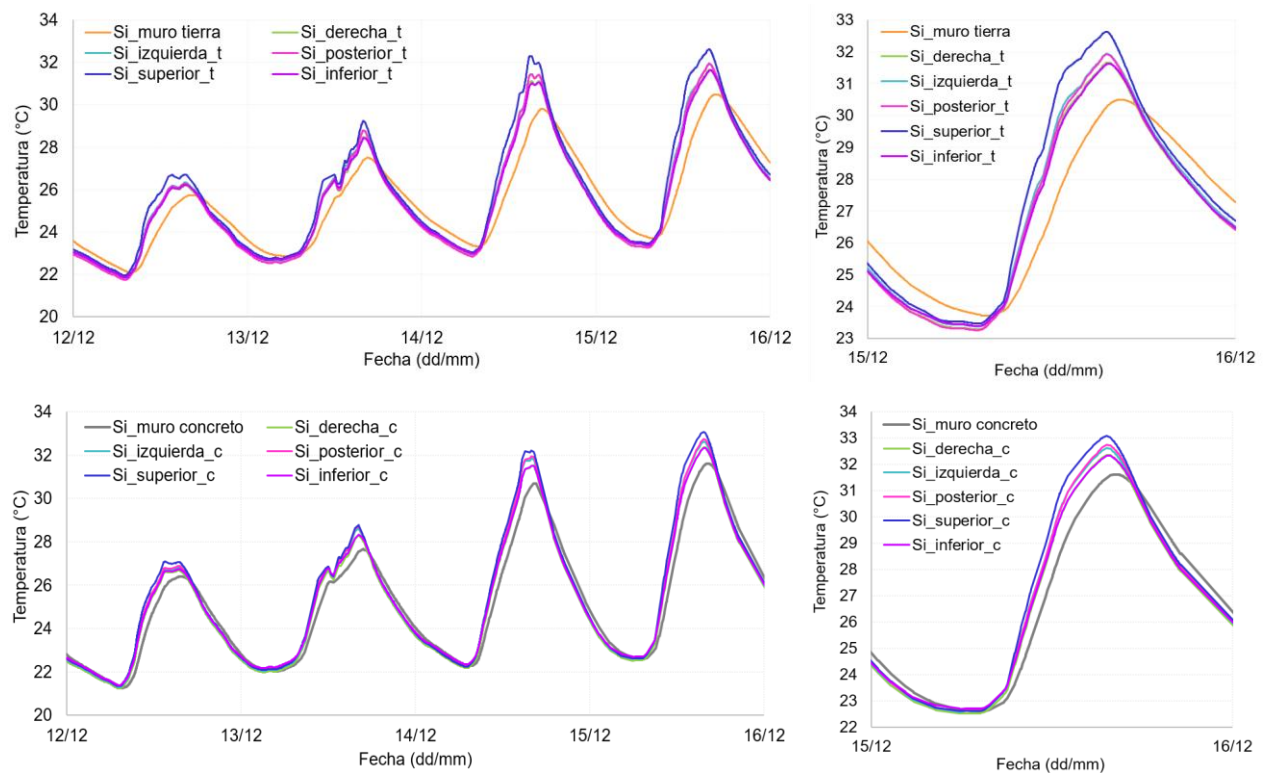


Figura M.1 Comportamiento de la temperatura de la superficie interna del muro y de las caras aisladas de las celdas experimentales del 12 al 16 de diciembre de 2023.

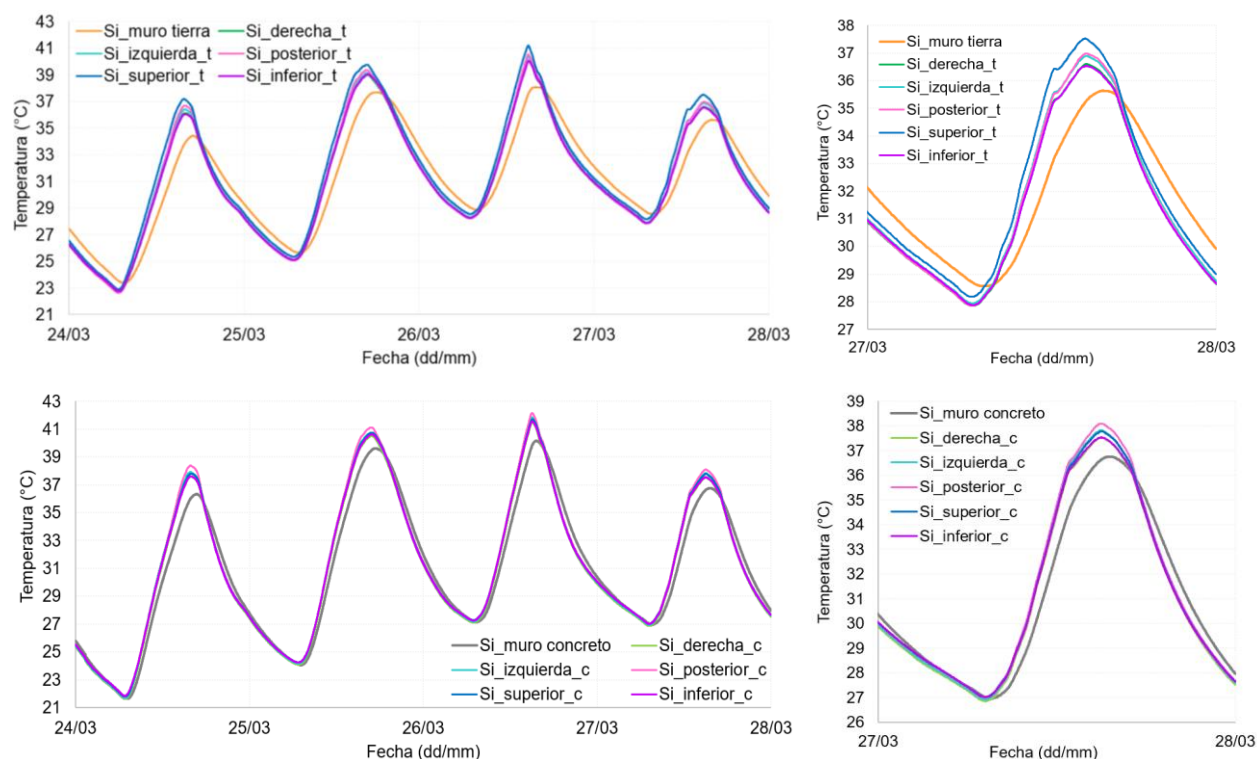


Figura M.2 Comportamiento de la temperatura de la superficie interna del muro y de las caras aisladas de las celdas experimentales del 24 al 28 de marzo de 2024.

En la Figura M.3 se muestran las temperaturas de la superficie interna de la cara superior de ambas celdas en el periodo de marzo (t: tierra, c: concreto). Nótese que las temperaturas son ligeramente mayores en la celda con el muro de bloques huecos de concreto.

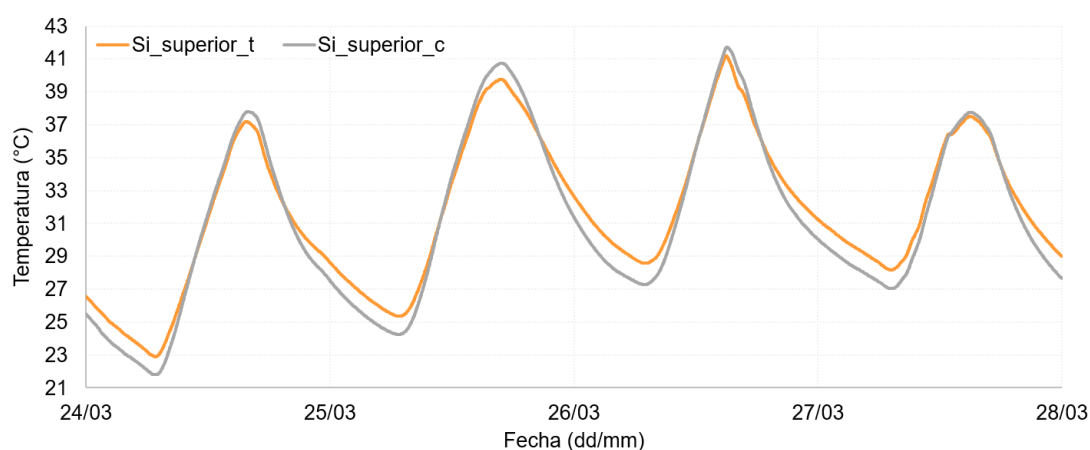


Figura M.3 Comportamiento de la temperatura de la superficie interna de la cara superior de las celdas experimentales del 24 al 28 de marzo de 2024.

ANEXO N. COMPORTAMIENTO DE LA HR DENTRO DEL MURO A ESCALA REDUCIDA A BASE DE *PAK'LUUM*.

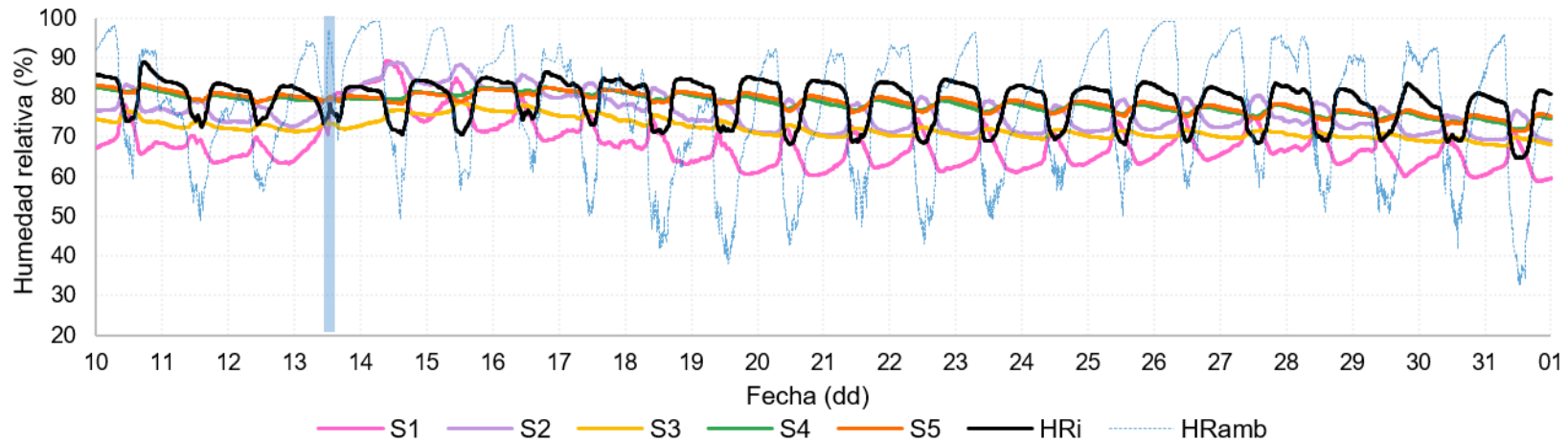


Figura N.1 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de *pak'luum* en el mes de diciembre de 2023.

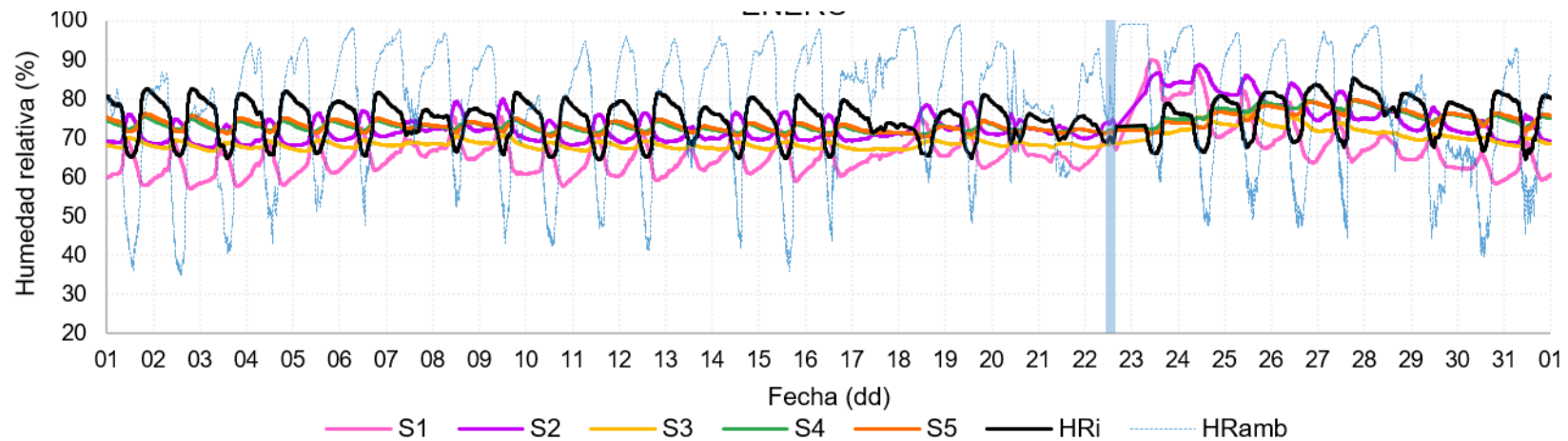


Figura N.2 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de *pak'luum* en el mes de enero de 2024.

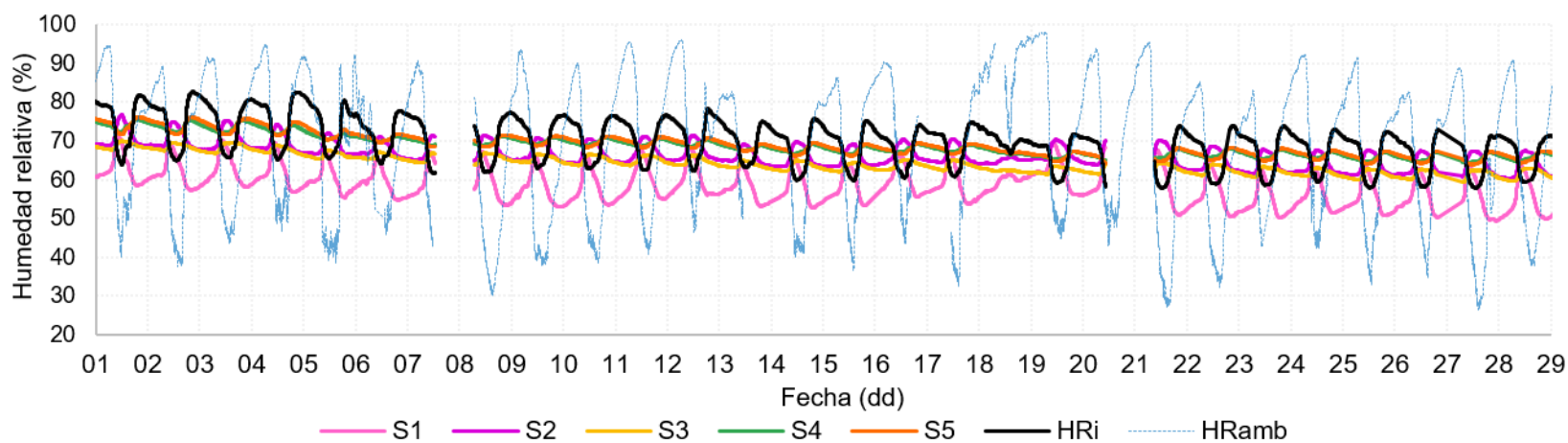


Figura N.3 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de *pak'luum* en el mes de febrero de 2024.

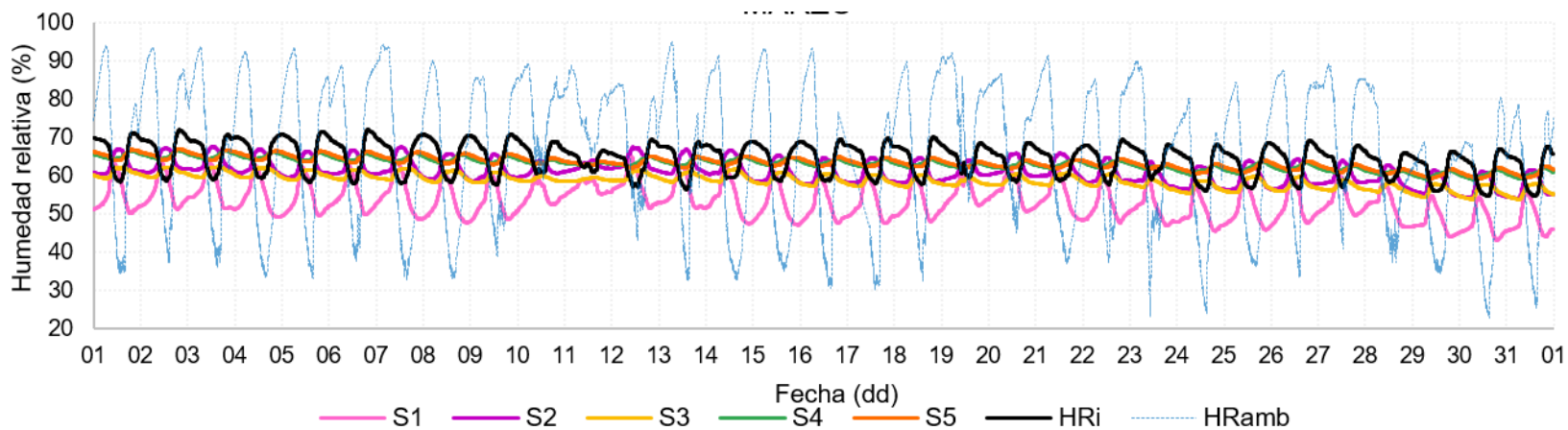


Figura N.4 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de *pak'luum* en el mes de marzo de 2024.

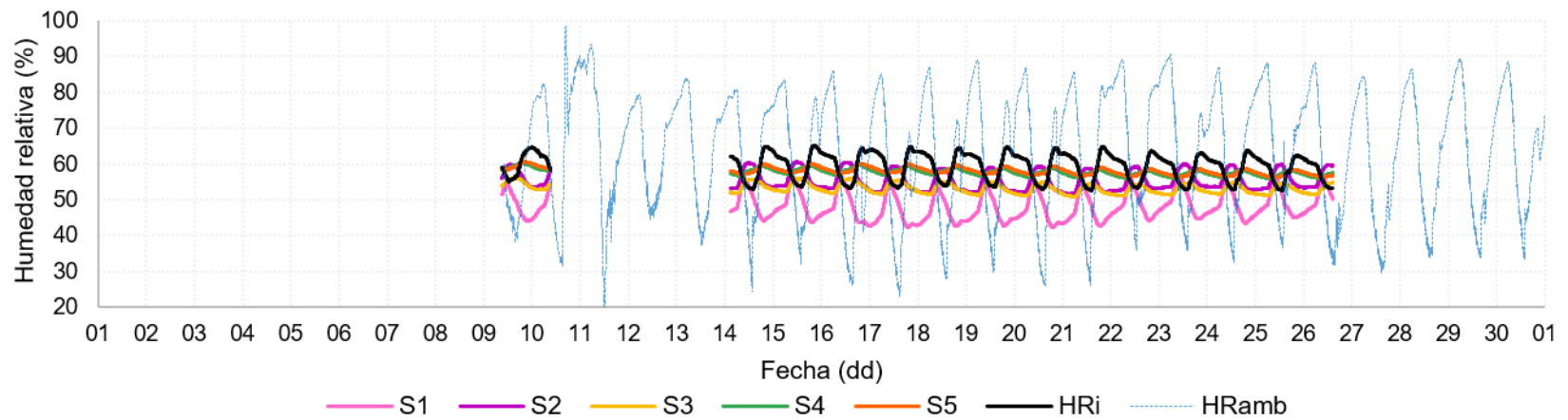


Figura N.5 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de *pak'luum* en el mes de abril de 2024.

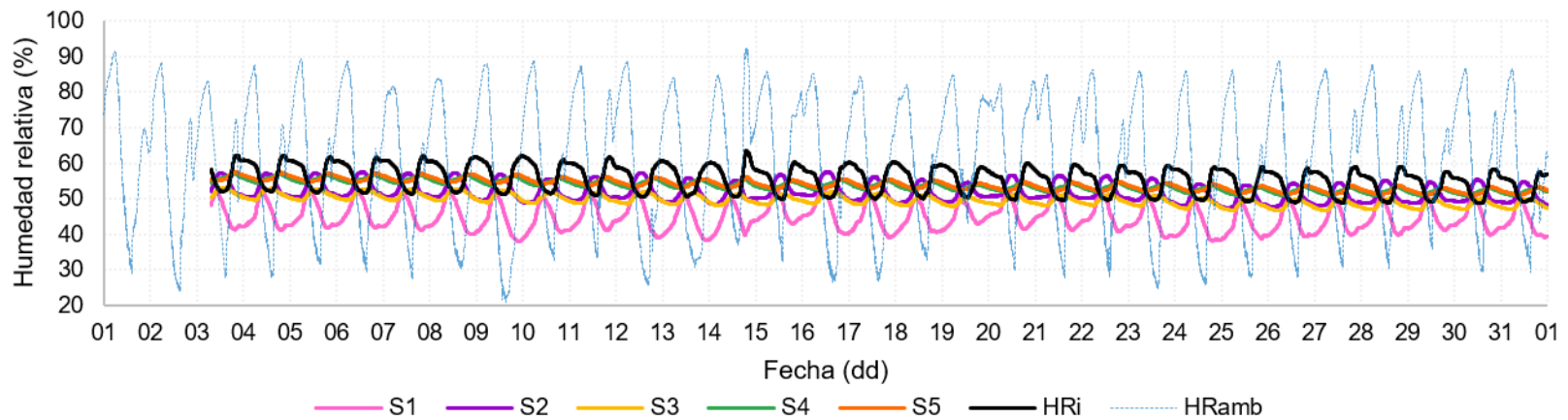


Figura N.6 Comportamiento de la humedad relativa del aire exterior y dentro del muro del material a base de *pak'luum* en el mes de mayo de 2024.

ANEXO O. COMPARACIÓN DE LOS VALORES MEDIDOS Y SIMULADOS DE LA TEMPERATURA DE AMBIENTE INTERIOR DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES.

En las siguientes figuras se muestra la temperatura del ambiente interior de la celda experimental con el muro del material a base de *pak'luum* en sus valores medidos ($T_{ai_med_tie}$) y en sus valores simulados ($T_{ai_sim_tie}$). Asimismo se muestra la temperatura del ambiente interior de la celda experimental con el muro de bloques huecos de concreto en sus valores medidos ($T_{ai_med_con}$) y en sus valores simulados ($T_{ai_sim_con}$). La comparación abarca desde el mes de enero a mayo de 2024. Como podrá observarse, hay datos experimentales faltantes.

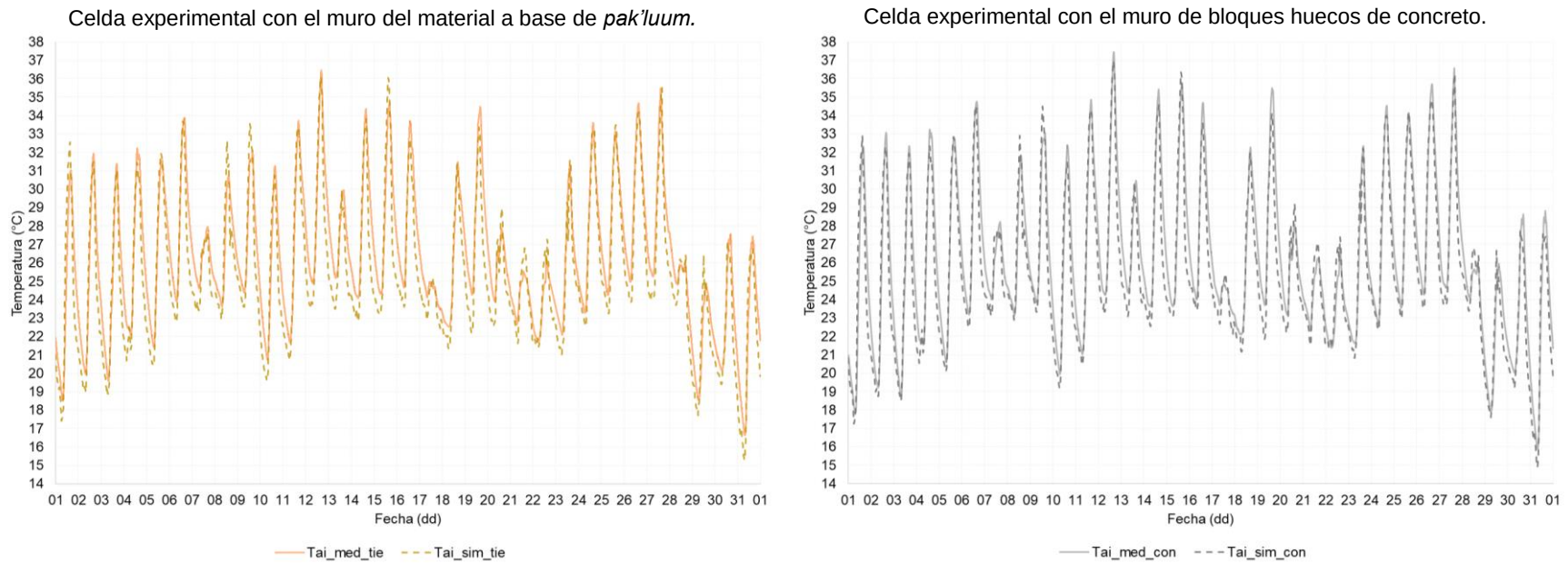


Figura O.1 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de enero de 2024: valores medidos y valores simulados.

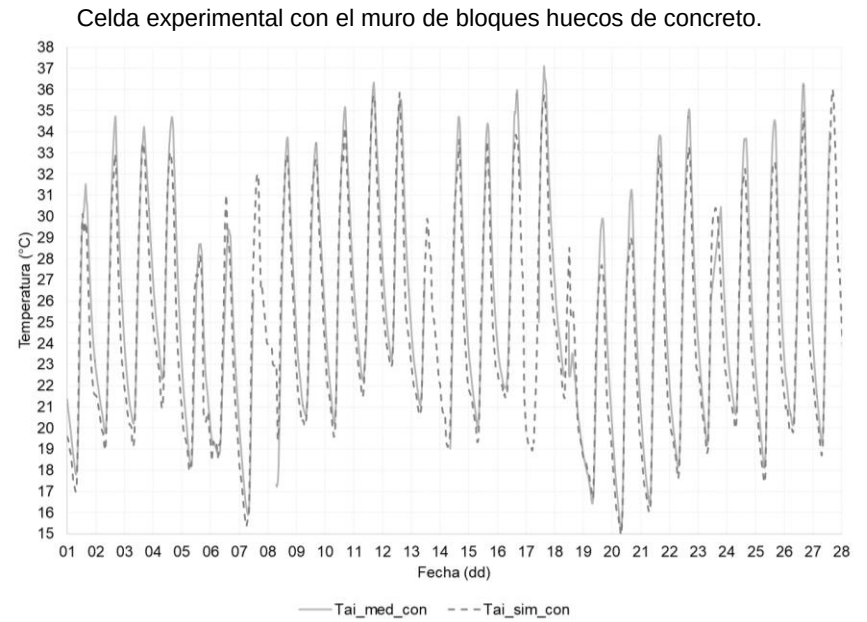
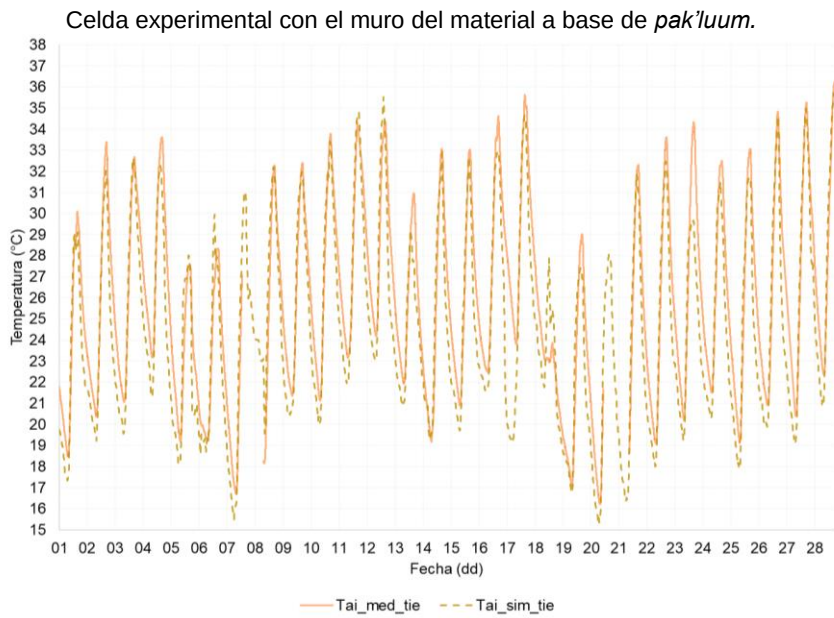


Figura O.2 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de febrero de 2024: valores medidos y valores simulados.

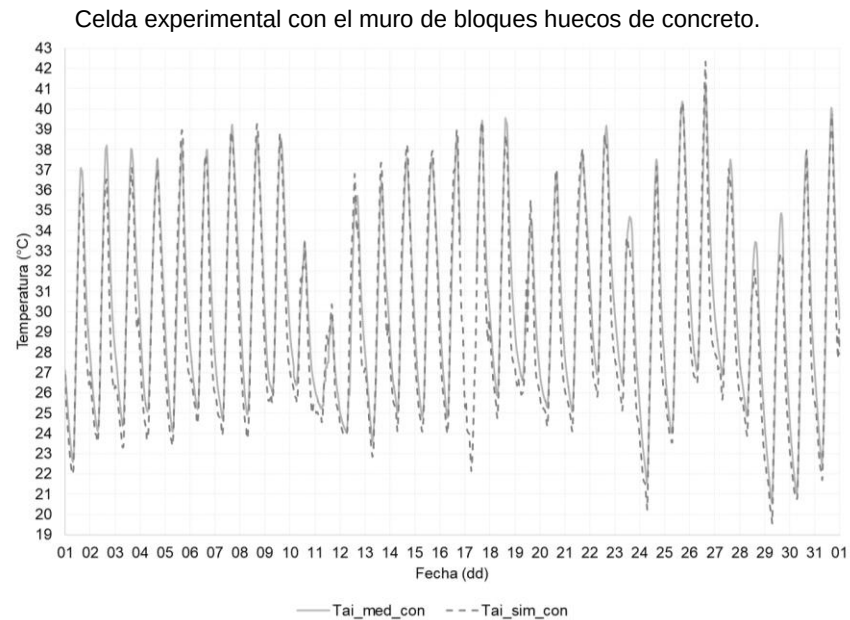
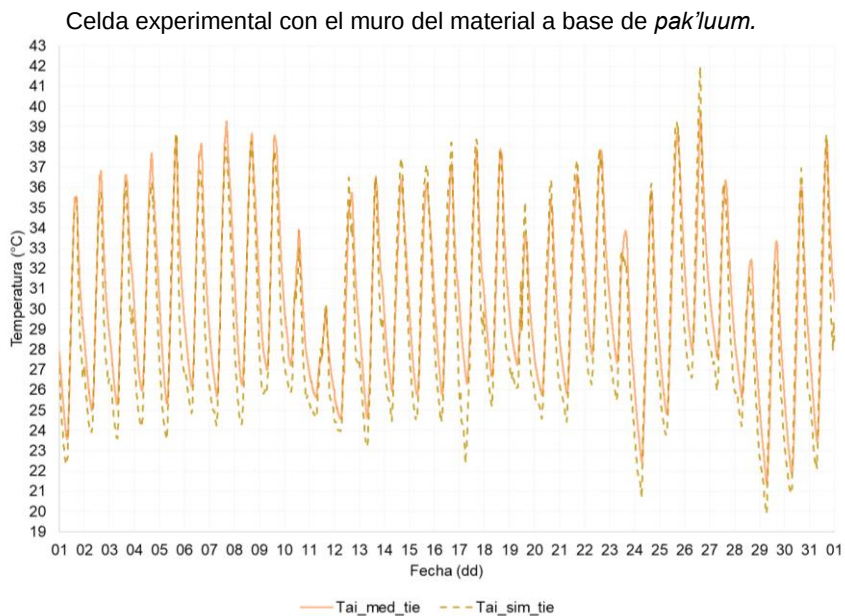
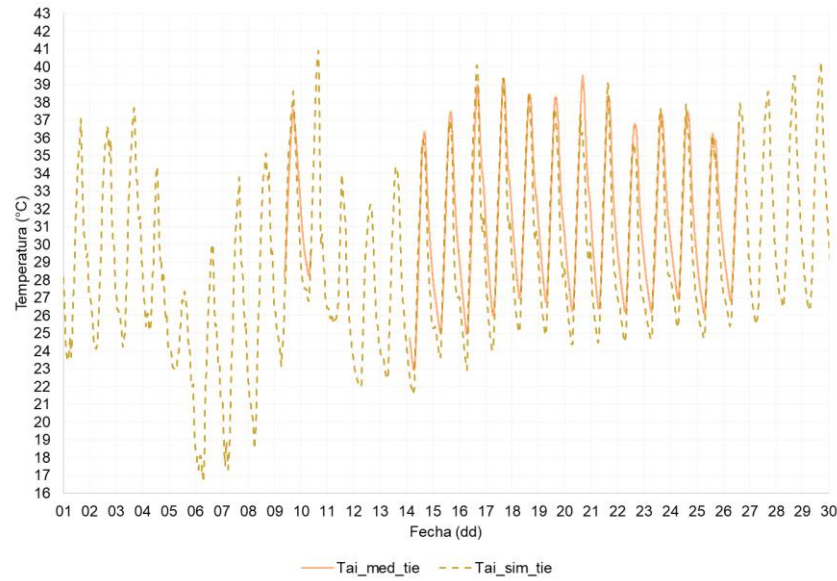


Figura O.3 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de marzo de 2024: valores medidos y valores simulados.

Celda experimental con el muro del material a base de *pak'luum*.



Celda experimental con el muro de bloques huecos de concreto.

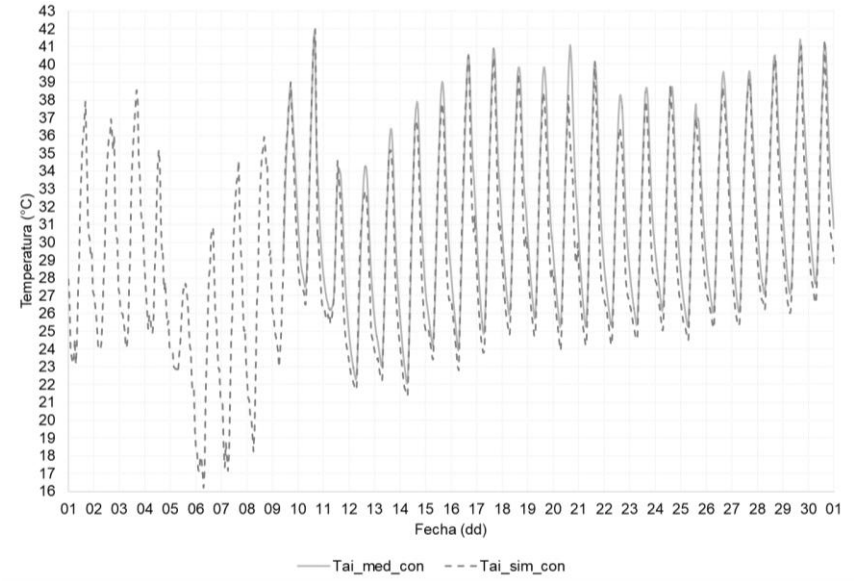
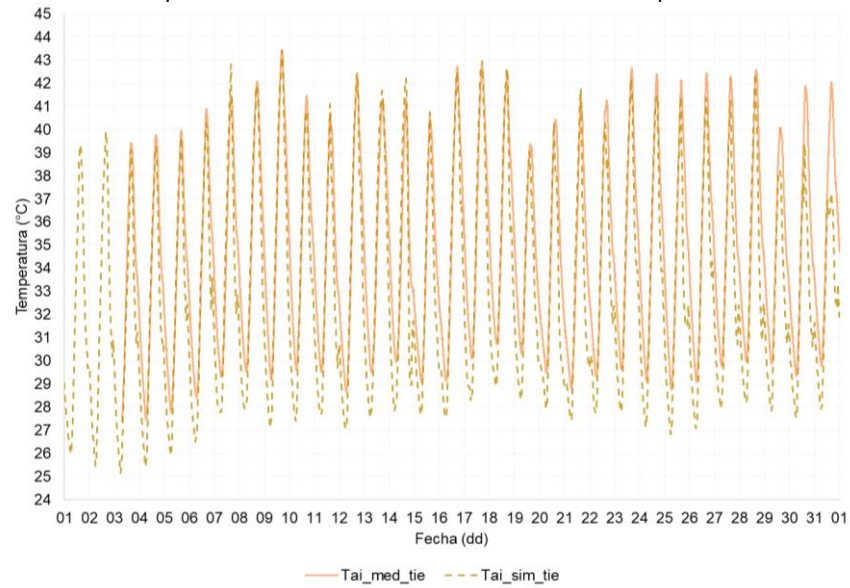


Figura O.4 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de abril de 2024: valores medidos y valores simulados.

Celda experimental con el muro del material a base de *pak'luum*.



Celda experimental con el muro de bloques huecos de concreto.

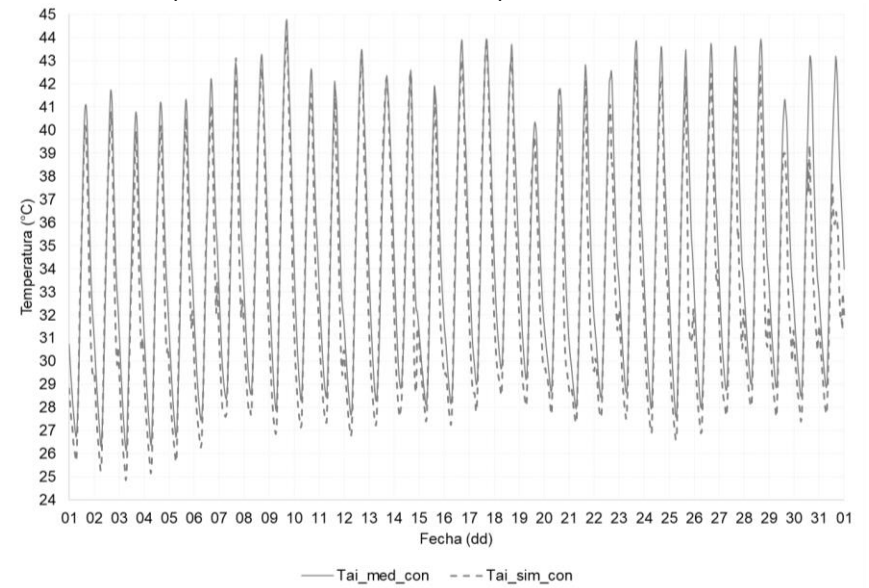


Figura O.5 Comportamiento de la temperatura del ambiente interior de las celdas experimentales en el mes de mayo de 2024: valores medidos y valores simulados.

**ANEXO P. COMPORTAMIENTO DE LA TEMPERATURA DE AMBIENTE INTERIOR DE LAS CELDAS EXPERIMENTALES
(PERIODO SIMULADO).**

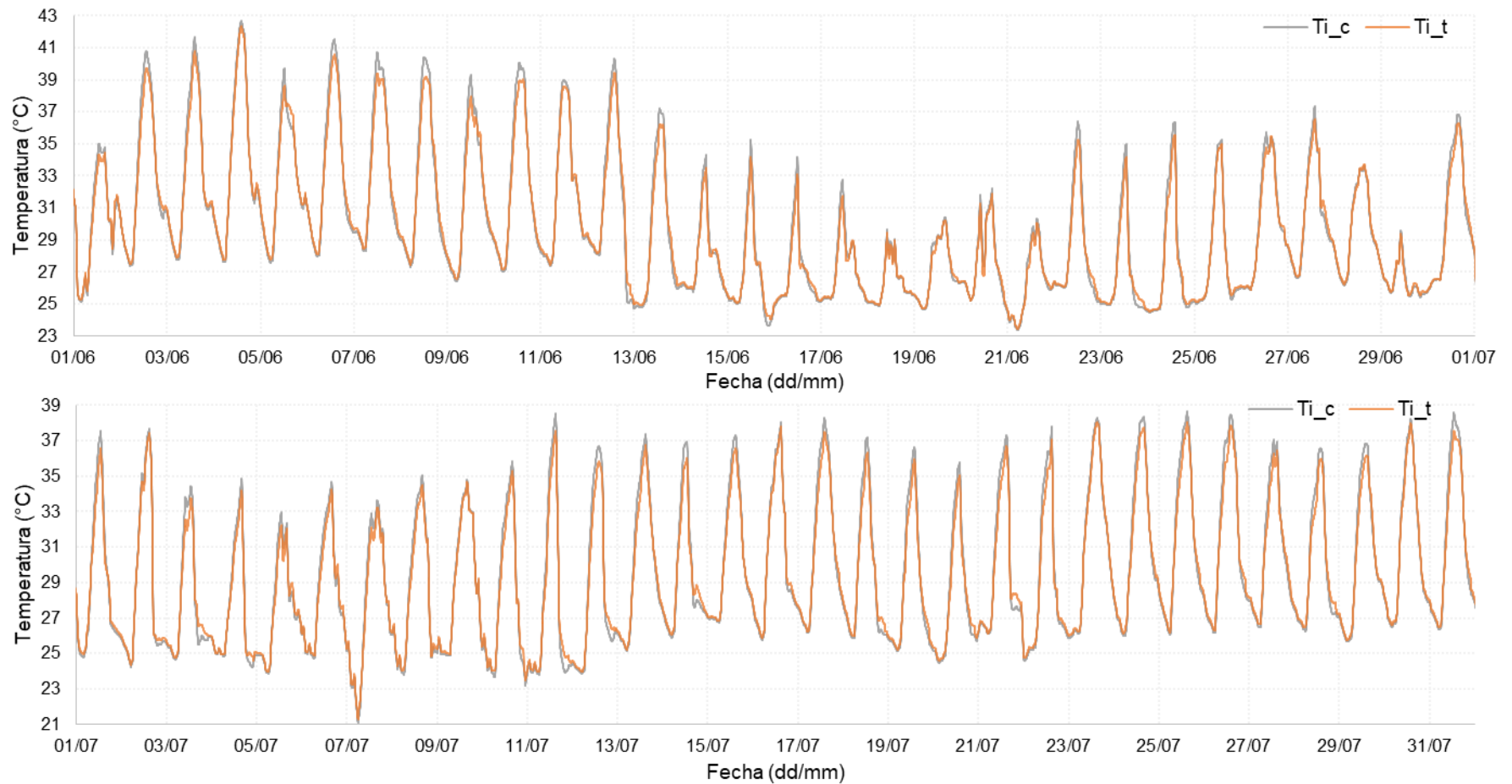


Figura P.1 Temperatura de ambiente interior de la celda experimental con muro de bloques huecos de concreto (Ti_c) y de la celda experimental con muro del material a base de *pak'luum* (Ti_t) en el mes de junio (arriba) y en el mes de julio de 2024 (abajo).

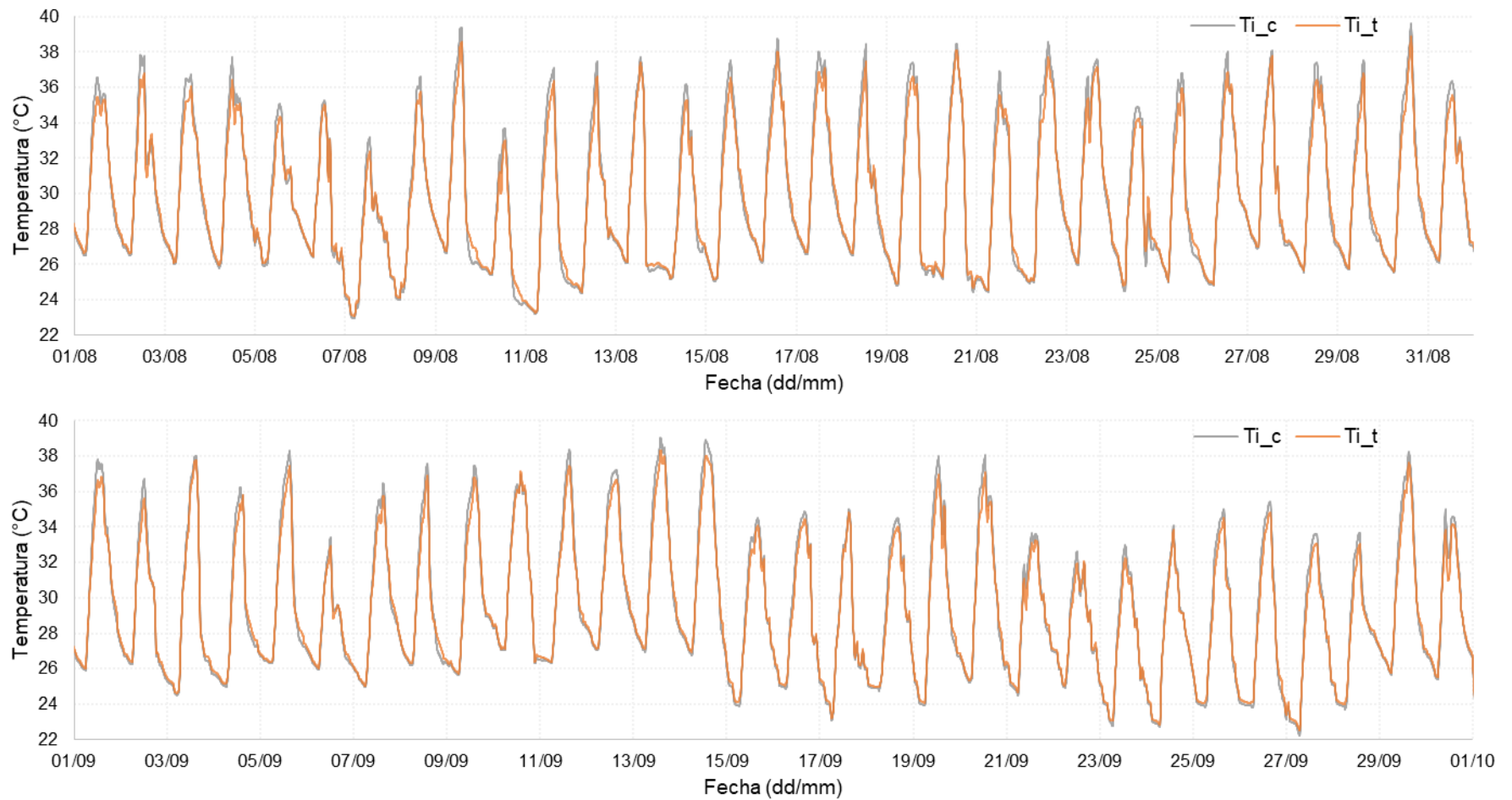


Figura P.2 Temperatura de ambiente interior de la celda experimental con muro de bloques huecos de concreto (Ti_c) y de la celda experimental con muro del material a base de *pak'luum* (Ti_t) en el mes de agosto (arriba) y en el mes de septiembre de 2024 (abajo).

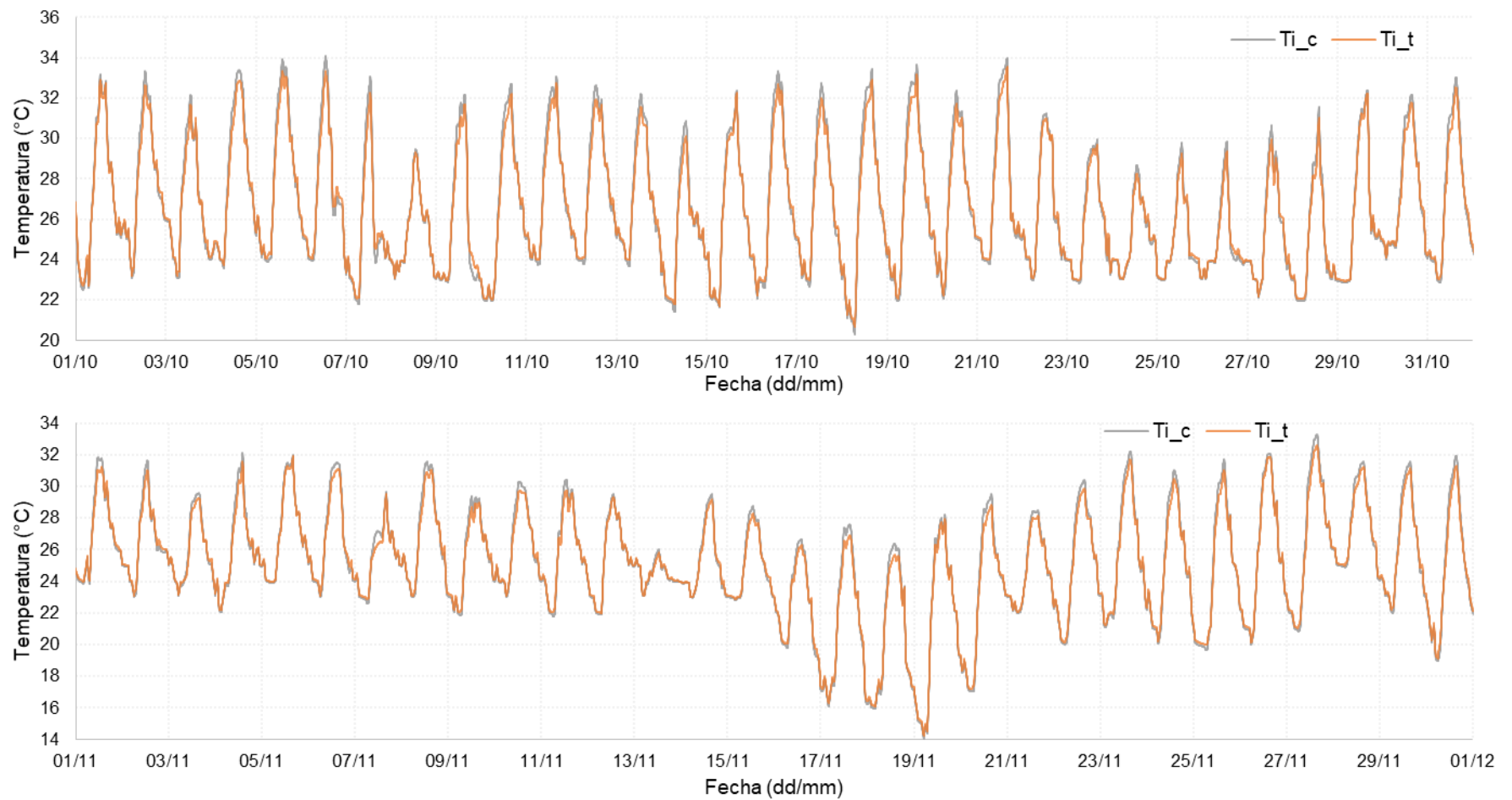


Figura P.3 Temperatura de ambiente interior de la celda experimental con muro de bloques huecos de concreto (Ti_c) y de la celda experimental con muro del material a base de *pak'luum* (Ti_t) en el mes de octubre (arriba) y en el mes de noviembre de 2024 (abajo).