

ANÁLISIS DEL CONFORT TÉRMICO DE VIVIENDAS CON DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUCTIVOS UBICADAS SOBRE 3000 M.S.N.M. EN LA ZONA RURAL ANDINA DE ECUADOR

Recibido 29/03/2025
Aceptado 06/06/2025

THERMAL COMFORT ANALYSIS OF DWELLINGS WITH DIFFERENT CONSTRUCTION SYSTEMS LOCATED ABOVE 3000 M.A.S.L. IN THE RURAL ANDEAN ZONE OF ECUADOR

ANÁLISE DO CONFORTO TÉRMICO DO HABITAÇÃO COM DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUTIVOS LOCALIZADOS ACIMA DOS 3.000 METROS DE ALTITUDE ZONA RURAL ANDINA DO EQUADOR

Andrea Nataly Moreno-Albuja

Magíster en Construcciones
Estudiante-Graduada
Universidad de Cuenca, Riobamba, Ecuador
<https://orcid.org/0009-0006-7579-4599>
natalymorenoa@gmail.com

Vanessa Guillén-Mena

Magíster en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Edificación y Urbanismo
Estudiante de Doctorado en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura
Universidad del País Vasco, Bilbao, España
<https://orcid.org/0000-0003-4001-1831>
vguillen001@ikasle.ehu.eus

Nathalie Madeleine Santamaría-Herrera

Máster en Arquitectura
Estudiante de Doctorado en Eficiencia Energética y Sostenibilidad en Ingeniería y Arquitectura - Profesora de la Carrera de Arquitectura
Universidad del País Vasco - Universidad Nacional de Chimborazo, Bilbao, España
<https://orcid.org/0000-0002-7854-3836>
nsantamaria014@ikasle.ehu.eus



RESUMEN

Esta investigación analiza el confort térmico de cuatro unidades de vivienda no climatizadas con diferentes sistemas constructivos, ubicadas en una zona rural andina de Ecuador sobre los 3000 m.s.n.m., para determinar estrategias pasivas de diseño. Para esto se describen características del entorno y constructivas de dos viviendas neo vernáculas con materiales naturales (TRA-01 y TRA-02) y dos viviendas con materiales modernos (CON-01 y CON-02). Se monitorizaron las variables de temperatura y humedad relativa exterior e interior durante 8 días, así como temperaturas de superficies de la envolvente y se evaluó el rango de confort mediante la temperatura operativa. Los resultados mostraron que tres viviendas presentaron temperaturas interiores estables, aunque solo la vivienda de fardos de paja estuvo parcialmente dentro del rango de confort. El estudio concluye que el aislamiento térmico de la envolvente, el diseño bioclimático y calidad constructiva son necesarios para mantener temperatura adecuada en estas zonas de clima frío.

Palabras clave

aislación térmica, arquitectura bioclimática, eficiencia energética, sistemas constructivos

ABSTRACT

This research examines the thermal comfort of four non-air-conditioned dwellings located in a rural Andean region of Ecuador, at an altitude of 3,000 meters above sea level (masl), to identify passive design strategies. The study describes the environmental and construction characteristics of two neo-vernacular dwellings built with natural materials (TRA-01 and TRA-02) and two dwellings with modern materials (CON-01 and CON-02). Indoor and outdoor temperature and relative humidity variables were monitored for eight days, along with envelope surface temperatures. The comfort range was evaluated using the operating temperature. The results showed that three dwellings had stable indoor temperatures, although only the straw bale dwelling was partially within the comfort range. The study concludes that the envelope's thermal insulation, bioclimatic design, and construction quality are needed to maintain adequate temperatures in these cold climate zones.

Keywords

thermal insulation, bioclimatic architecture, energy efficiency, construction systems

RESUMO

Esta pesquisa analisa o conforto térmico de quatro unidades habitacionais sem ar condicionado, localizadas numa zona rural andina do Equador a uma altitude de 3000 metros acima do nível do mar, para determinar estratégias de design passivo. Para tal, são descritas as características ambientais e construtivas de duas casas neovernaculares construídas com materiais naturais (TRA-01 e TRA-02) e de duas casas com materiais modernos (CON-01 e CON-02). As variáveis temperaturas exterior e interior e humidade relativa foram monitorizadas durante 8 dias, assim como as temperaturas das superfícies do invólucro, a gama de conforto foi avaliada através da temperatura operacional. Os resultados mostraram que três casas apresentaram temperaturas interiores estáveis, embora apenas a casa de fardos de palha estivesse parcialmente dentro do intervalo de conforto. O estudo conclui que o isolamento térmico da envolvente do edifício, o design bioclimático e a qualidade da construção são necessárias para manter a temperatura adequada nessas zonas de clima frio.

Palavras-chave:

isolamento térmico, arquitetura bioclimática, eficiência energética, sistemas construtivos

INTRODUCCIÓN

En los últimos años las emisiones provenientes de la industria de la construcción y las relacionadas con la operación de edificios han sido responsables del 38% de las emisiones globales de CO₂ (Guillén Mena et al., 2015). Parte de esta situación se debe a que existe un creciente interés de las personas en mejorar su calidad de vida mediante un ajuste del ambiente térmico de las edificaciones (Chang et al., 2021).

En este sentido, se ha observado que algunas construcciones vernáculas, típicamente ubicadas en zonas rurales de China e India, pueden requerir menos recursos energéticos para regular el ambiente térmico de las edificaciones, en parte debido a su diseño pasivo y a que los residentes rurales tienden a adaptarse al clima de manera natural (Chang et al., 2021; Dhaka et al., 2015). Por ejemplo, estrategias de adaptación como abrir o cerrar puertas y ventanas; ingerir bebidas frías o calientes; incrementar o disminuir capas de vestimenta; etc. (Dhaka et al., 2015; Indraganti, 2010). Estudios demuestran que los edificios vernáculos pueden lograr un ahorro de energía en refrigeración y calefacción en comparación con alternativas modernas o de bajo costo, principalmente debido a sus estrategias de diseño pasivo y al uso de materiales locales (Cojocaru y Isopescu, 2021).

Un estudio realizado en la zona altoandina del Perú, Harman (2010) denotó que las viviendas con materiales modernos, como hormigón o acero, presentan una menor capacidad de resistencia térmica, lo que genera una prolongada exposición a temperaturas muy bajas que se ven reflejadas en la salud de las familias. Otro estudio en Perú mostró que el uso de estrategias pasivas de calefacción más eficientes logró un incremento promedio de 9,5 °C al interior de las viviendas altoandinas ubicadas entre los 3000 y 5000 msnm (Cerrón Contreras, 2022).

A pesar de que no existe suficiente investigación referente al análisis del confort térmico en edificaciones localizadas en Ecuador (Gallardo et al., 2016; Mino-Rodríguez, 2021), y menos aún en edificaciones vernáculas (Tapia, 2017; Moscoso-García y Quesada-Molina, 2023), es importante mencionar que existen varias construcciones de arquitectura tradicional que podrían ser relevantes; especialmente aquellas ubicadas en condiciones climáticas desfavorables. Un estudio sobre edificaciones vernáculas en estas condiciones climáticas puede aportar significativamente en la identificación de estrategias pasivas eficaces y así orientar a las edificaciones que vienen en camino. Ya que se debe tener presente que al igual que las edificaciones responden a un contexto, a una cultura y a un clima único, también lo hacen las necesidades de confort térmico y las expectativas de los habitantes (Gallardo et al., 2016).

El objetivo principal de esta investigación consiste en analizar el confort térmico de unidades de vivienda ubicadas sobre los 3000 msnm con características diferentes que incluyen el sistema constructivo, materiales, espesores de la envolvente, número de pisos y orientación para determinar las mejores estrategias pasivas de climatización. Para ello, se plantea la descripción de características de cuatro unidades de vivienda, dos con sistemas constructivos neo vernáculos y dos con sistemas constructivos modernos. Posteriormente, se monitoriza asincrónicamente las variables ambientales como la temperatura del aire y humedad relativa tanto al interior como exterior de las edificaciones, más las temperaturas de superficies al interior de la envolvente. De esta manera, la investigación aporta con evidencia de la efectividad de las estrategias de diseño pasivo en viviendas localizadas en zonas andinas sobre los 3000 msnm para alcanzar el confort térmico. Así mismo, la investigación responde a la pregunta si las viviendas con sistemas constructivos neo vernáculos presentan un mejor comportamiento térmico en climas fríos que las viviendas que sólo utilizan materiales modernos.

CONDICIONES DEL LUGAR DE ESTUDIO

La parroquia San Juan, (-1.633887, -78.781584), con una altitud de 3160 msnm está ubicada a 16 km de la ciudad de Riobamba-Ecuador. La Norma Ecuatoriana de la Construcción en su capítulo de Eficiencia Energética NEC-HS-EE (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018) determina que los asentamientos ubicados entre los 3000 y 5000 msnm corresponden a la zona climática fría 5, la que se asimila a la zona climática 5c según la clasificación ASHRAE 90.1. En los Andes centrales del Ecuador, la oscilación térmica no está relacionada con las estaciones del año, sino que se caracteriza por una marcada oscilación que se da entre el día y la noche como resultado de su ubicación geográfica en latitud y altitud. La Figura 1 presenta la temperatura mensual promedio del período 2018-2022, donde se identifica que la temperatura promedio mensual es de 10.55 °C. Los meses más fríos son julio, agosto y septiembre con una media de 9.71 °C, y el mes más caluroso es febrero con 11,17 °C (INAHMI, 2023). Esta información climática evidencia una baja variación estacional, típica de climas de alta montaña en zonas tropicales. También registra amplitudes térmicas diarias elevadas, como se observó el 3 de noviembre del año 2020, cuando la temperatura mínima fue de 0.3 °C y la máxima de 21.2 °C que resulta en una amplitud de 20,9 °C. Estos datos permiten contextualizar y justificar las condiciones climáticas bajo las que se evalúa el confort térmico de las viviendas en estudio y, junto con otros parámetros ambientales como la humedad relativa y la dirección del viento, contribuyen a una comprensión más precisa. En cuanto a la humedad

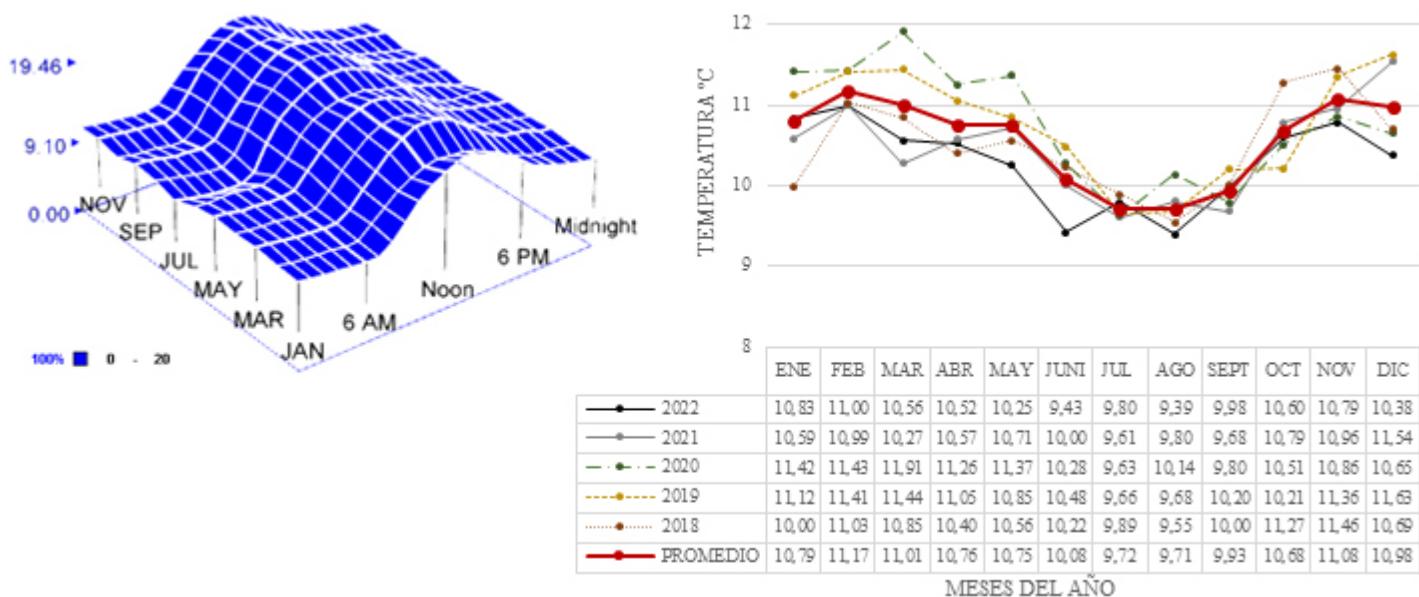


Figura 1. Temperatura mensual promedio del período 2018-2022. Fuente: INAHMI (2023).

relativa, el promedio mensual es de 80,82%, que alcanza sus valores más altos en abril, mayo y junio. El viento predominante proviene del Este-Sureste, al ser los meses de agosto y septiembre los más ventosos con velocidades promedio de 2,41 y 2,48 m/s, respectivamente (INAHMI, 2023).

Los primeros habitantes de esta parroquia fueron descendientes de los Puruhá, quienes construían sus viviendas con piedra, tapial o adobe como envolvente y estructura portante y la paja o teja como cubierta (Villacís, 2010). En los últimos 4 censos de vivienda que se han realizado en Ecuador, en los años 1990, 2001, 2010 y 2022, se observó que en la Parroquia San Juan el uso de tapial o adobe tuvo una disminución de 41%, 22%, 14% y 5% respectivamente. Mientras que el uso de ladrillo o bloque incrementó del 57% en 1990 al 86% en el 2022 (Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC], 2024). En cuanto a la cubierta, el uso de la paja desaparece y se reemplaza por zinc, teja, fibrocemento y mayormente losa de hormigón con 43%.

Este fenómeno, no sólo genera que se pierdan las cualidades térmicas asociadas a las construcciones vernáculas que emplean materiales locales y estrategias pasivas adaptadas al entorno; sino también la pérdida de una valiosa fuente de conocimiento ancestral, un recurso clave para ofrecer soluciones sostenibles relevantes para el diseño contemporáneo. (Moscoso-García y Quesada-Molina, 2023).

METODOLOGÍA

La metodología propuesta incluye 4 fases: la descripción de cuatro casos de estudio, la monitorización de las viviendas, determinación del rango de confort térmico y su respectivo análisis. Esta última fase se encuentra abordada en la presentación de resultados y discusiones.

FASE I: SELECCIÓN DE CASOS DE ESTUDIO

Para este estudio se eligieron 4 viviendas, dos viviendas neo vernáculas construidas con materiales naturales, TRA-01 (108.72 m²) de un piso con paredes de tapial restauradas y TRA-02 (171.51 m²) de dos pisos con paredes de fardos de paja con diseño contemporáneo. Asimismo, dos viviendas con materiales modernos, de un piso CON-01 (89.20 m²) de ladrillo y dos pisos CON-02 (127.41 m²) de bloque de hormigón (Figura 2). En la Tabla 2 se presentan los sistemas constructivos, materiales y espesores de envolventes encontrados en las viviendas. En ninguna vivienda existe sistema de refrigeración mecánico instalado, ni sistema de calefacción en funcionamiento.

En cuanto al entorno inmediato de las viviendas, se encuentran ubicadas en un radio de 2 km. CON-02 está dentro del centro del poblado de San Juan con un entorno semi-consolidado, a diferencia de las demás viviendas que se encuentran aisladas por lo que presentan mejores prestaciones de iluminación y ventilación interior, pero más influencia de los vientos predominantes del Este (Tabla 1).



Figura 2. Casos de estudio seleccionados: (a) TRA-01 vivienda de tapial; (b) TRA-02 vivienda de fardos de paja; (c) CON-01 vivienda de ladrillo; (d) CON-02 vivienda de bloque de hormigón. Fuente: Elaboración de las Autoras.

Tabla 1. Características de las viviendas. Fuente: Elaboración de los Autores.

	Área (m ²)	Altitud (m.s.n.m.)	# de plantas	Orientación de la fachada principal	Dirección de viento predominante	Sistema de Calefacción	Ubicación/ Contexto	Infiltraciones
TRA-01	108,72	3.263	1	E	E	Ninguno	Independiente en un contexto no urbano, con cerramiento parcial	Sí
TRA-02	171,51	3.243	2	N	E	Ninguno	Independiente en un contexto no urbano, sin cerramiento, con barrera de vegetación	Sí
CON-01	89,20	3.276	1	E	E	Ninguno	Independiente en un contexto no urbano, situada en una colina, sin cerramiento	Sí
CON-02	127,41	3.229	2	NO	E	Ninguno	Independiente construida en un contexto urbano semi consolidado-sin vecinos, con cerramiento	Sí

Tabla 2. Sistemas constructivos, materiales, espesores de envolventes y Transmitancia Térmica (Valor U). Fuente: Elaboración de los Autores.

Vivienda	Componente	Material	Espesor (cm)	U ¹ (W/m ² K)
TRA-01	CIMENTACIÓN	Cimiento corrido de piedra	40	-
	ESTRUCTURA	Autoportante de tapial	80	-
	PAREDES EXTERIORES	Pintura+Mortero fibra de Vidrio+Tapial+Mortero+Pintura	1.5+80+1.5	0,94
	PAREDES INTERIORES	Pintura+Mortero Cemento+Ladrillo+Mortero Cemento+Pintura	15	-
	PISO	Losa de hormigón+Media duela pino	40+2.5	1,53
	CUBIERTA	Chapa de aluminio+Vigas de madera+Cámara de aire+Plancha de yeso	0.6+5+1.2	2,87
	VENTANAS	Marco de madera+vidrio	4+0.6	1,51
TRA-02	CIMENTACIÓN	Losa de cimentación de hormigón	0.15	-
	ESTRUCTURA	Poste y viga de madera eucalipto tipo escalera	40	-
	PAREDES EXTERIORES	Cal+Revoque barro+Fardos de paja+Revoque barro+Cal	0.5+2.5+35+2.5+0.5	0,21
	PAREDES INTERIORES	Cal+Revoque barro+quincha+Revoque barro+Cal	0.5+2.5+6+2.5+0.5	-
	PISO	Losa hormigón+Piedra pómez+Forjado de madera+Tablero triplex+Piso flotante	10+15+6+1.8+1.4	0,55
	CUBIERTA	Lámina asfáltica+Tablero triplex+Paja entre vigas+Tablero tetrapack y Estera de totora	0.2+1.8+15+1.2+1.5	0,45
	VENTANAS	Vidrio+Cámara de aire+Vidrio. Marco PVC	0.6+6+0.6	2,75
CON-01	CIMENTACIÓN	Zapatas aisladas de hormigón	120	-
	ESTRUCTURA	Estructura metálica	-	-
	PAREDES EXTERIORES	Pintura+Mortero Cemento+Ladrillo+Mortero+Pintura	1+10+1	3,10
	PAREDES INTERIORES	Pintura+Mortero Cemento+Ladrillo+Mortero+Pintura	1+10+1	-
	PISO	Contrapiso de hormigón+Baldosa	40+0.4	2,00
	CUBIERTA	Lámina de fibrocemento acanalado o láminas translúcidas+ Plancha de yeso	0.4+1.2	5,21
	VENTANAS	Marco aluminio+Vidrio	0.4	5,73
CON-02	CIMENTACIÓN	Zapatas aisladas de hormigón	120	-
	ESTRUCTURA	Hormigón armado	-	-
	PAREDES EXTERIORES	Enlucido mortero+Bloque hormigón+Enlucido mortero	1.5+10+1	2,83
	PAREDES INTERIORES	Pintura+Mortero+Bloque hormigón+Mortero+baldosa	1+0.7+1,5	-
	PISO	Contrapiso de hormigón+Cerámica	25+0.4	2,54
	CUBIERTA	Losa plana de hormigón+Bloques de pómez	25	4,02
	VENTANAS	Marco aluminio+Vidrio azul	0.4	5,73

¹ Valores de Transmitancia térmica calculados en base a Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018; Ministerio de vivienda y agenda urbana, 2022

Tabla 3. Información detallada de los equipos de medición. Fuente: Elaboración de los Autores.

#	Nombre Comercial	Descripción	Parámetros de medición	Rango	Precisión
1	ESP32	Microcontrolador con conectividad inalámbrica	Conexión Wi-Fi 802.11 b/g/n, Bluetooth 4.2 y BLE	150 Mbps	
2	LM35	Circuito integrado sensor de temperatura	Temperatura	-55 a 150°C	± 0,5°C
3	Datalogging traceable barometer	Grabador digital de temperatura ambiente, humedad relativa y presión barométrica	Temperatura ambiente	0 a 65°C	± 0,4°C
			Humedad	0% a 95%	±3%
			Presión barométrica	500mbar a 1030mbar	±4 mbar

FASE II: MONITORIZACIÓN DE VIVIENDAS

En esta etapa se colocaron equipos para medición de temperatura del aire, humedad relativa y sensores de temperatura superficial. En la Figura 3 se presentan las ubicaciones en los planos arquitectónicos y fotografías de colocación al interior y exterior, mientras que la Tabla 3 muestra especificaciones de los equipos de medición.

Se monitorearon las variables de humedad relativa y temperatura del aire de las 4 viviendas cada 5 minutos durante un período de 8 días cada una, entre el 20 de mayo y el 31 de julio del 2023. La frecuencia y período de monitoreo se basa en el estudio de Quesada Molina y Bustillos Yaguana (2018). La medición de las viviendas no fue síncrona, debido a la disponibilidad de equipos se midió una a la vez, lo que se discute en limitaciones del estudio.

Se colocaron 3 termohigrómetros en cada vivienda (Figura 3), uno al exterior (A), otro en el área social interior (B) y el tercero en el dormitorio más frío (C). Los sensores interiores se colocaron en el centro de las habitaciones o a 1m mínimo de distancia de las paredes exteriores, y a 1,10m de altura que sigue las directrices de la Norma Española UNE-EN ISO 7726, la que indica que "cuando no sea posible interrumpir la actividad en curso, es necesario situar los sensores en posiciones tales que los intercambios térmicos sean aproximadamente iguales a aquéllos a los que la persona esté expuesta" (UNE-EN ISO 7726, 2020). Los sensores exteriores se colocaron en un lugar protegido de la lluvia y de la radiación solar directa.

La medición de la temperatura de las superficies interiores se realizó en 6 lugares como indica la Atecyr (2010), una pared por cada orientación, cubierta y piso en contacto con el suelo. La monitorización se realizó en

el área social (B) de las viviendas cada 30 minutos durante 3 días y se obtuvo un promedio para un solo día. Las mediciones en las superficies se realizaron con el objetivo de calcular la temperatura radiante media (Trm), y con este valor la temperatura operativa (Top) que servirá para una evaluación integral del confort.

Para la adquisición de datos de temperatura de las superficies interiores se utilizó microcontroladores ESP32 de manera inalámbrica, cada uno con un sensor LM35 que es capaz de medir la temperatura en un rango desde -55°C a 150°C con un intervalo de salida del sensor de 10mV por cada grado centígrado, y enviar a un microcontrolador maestro que graba la información en una memoria SD CARD en un archivo con extensión .txt, para su posterior tratamiento de información.

FASE III: DETERMINACIÓN DEL RANGO DE CONFORT TÉRMICO

Para entender el papel que desempeña la envolvente en el confort térmico de las viviendas, se busca definir el rango de confort térmico de los 4 casos de estudio. Como menciona Chang et al. (2021) en su estudio, la temperatura operativa (Top) es uno de los índices de confort térmico más utilizados y pertinente a este estudio, dado que considera exhaustivamente los efectos de la temperatura del aire exterior, la radiación (ASHRAE Standard 55, 2020). El cálculo de la Top se muestra en Ecuación 1, donde (Trm) es la temperatura radiante media que se obtuvo en base a la Ecuación 2 que utiliza la temperatura de las superficies del recinto cuando las paredes, el suelo y el techo están a diferentes temperaturas (Atecyr, 2010).

Una vez obtenida la Top, para determinar el rango de confort térmico en las viviendas estudiadas (Tabla 4), se utilizó la Herramienta de CBE de Confort Térmico



Figura 3. Plantas y ubicación de equipos en casos de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

de Berkeley (Tartarini et al., 2020) basado en el método adaptativo de la Norma UNE-EN 16798-1. Con esta herramienta se determinó los rangos de confort (clases) según la temperatura exterior media predominante la que responde a "la media aritmética de la temperatura exterior media diaria durante un período no menor a 8, ni mayor a 30 días seguidos previo al día en cuestión" (ASHRAE Standard 55, 2020).

La Norma EN-16798, establece 3 clases de confort térmico, las clases varían según su nivel de exigencia y aceptación. Las horas de confort de cada vivienda se basarán en el rango de la Clase III de confort térmico.

$$T_{op} \approx \frac{T_{rm} + T_s}{2}$$

$$T_{rm} = \frac{(0.08(T_{s\ techo} + T_{s\ suelo}) + 0.23(T_{s\ derecha} + T_{s\ izquierda}) + 0.35(T_{s\ dante} + T_{s\ detrás}))}{2(0.08 + 0.23 + 0.35)}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

MONITOREO DE TEMPERATURA INTERIOR Y EXTERIOR

En la Figura 4 se observan las temperaturas mínimas, máximas y promedio de los espacios monitorizados. Durante la monitorización de temperatura del aire exterior de las viviendas (Figura 5), se registraron las temperaturas más bajas en la madrugada entre las 3h00 y 6h00, mientras que, las temperaturas más altas se registran durante las 14h00 y 16h00.

La vivienda de un piso TRA-01 registró una temperatura exterior mínima de 3,77°C, máxima de 29,33°C y promedio 12,22°C. En el área social (B), la temperatura mínima absoluta fue de 11,70°C, mientras que en la habitación (C) fue 11,80°C, con una temperatura promedio de aproximadamente 13,00°C. Las paredes de tapial de 0,80 m de espesor aportaron una baja transmitancia térmica (Tabla 2) y una amplitud térmica máxima de 3°C al interior.

La vivienda TRA-02 presentó en el exterior una temperatura mínima de 6,15°C, máxima de 21,95°C y promedio 12,07°C. El área social osciló entre 16,43 y 21,95°C y la habitación de 17,50 a 24,05°C. La temperatura promedio en el área social fue 19,88°C y en la habitación 20,46°C, en la segunda planta es ligeramente más alta posiblemente por radiación solar captada en cubierta. La amplitud térmica máxima fue de 7,52°C, el diseño contemporáneo incluyó paredes de fardos de paja como material aislante. Este sistema contribuye a incrementar hasta 9°C la temperatura interior respecto al exterior, según Suasaca Pelinco et al. (2020).

La vivienda CON-01 de un piso mostró una amplitud térmica máxima de 11,17°C, con paredes de ladrillo de 0,10m. En el área social (B), la temperatura mínima absoluta

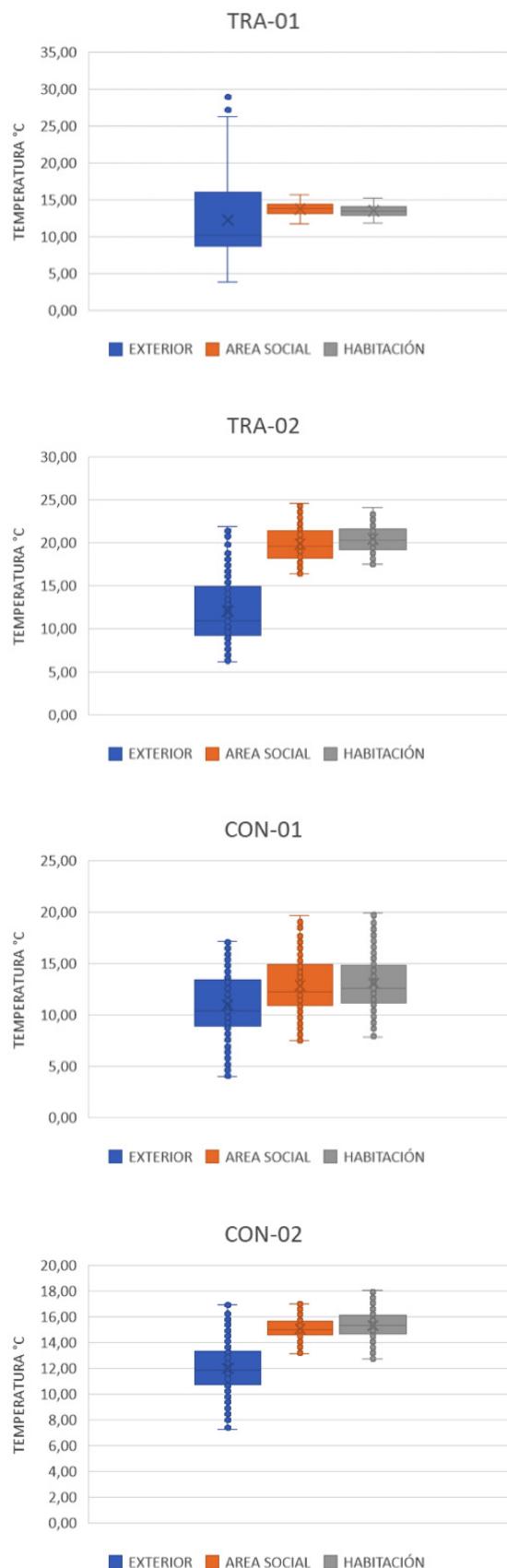


Figura 4. Temperaturas mínimas, máximas y promedio de cada caso de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

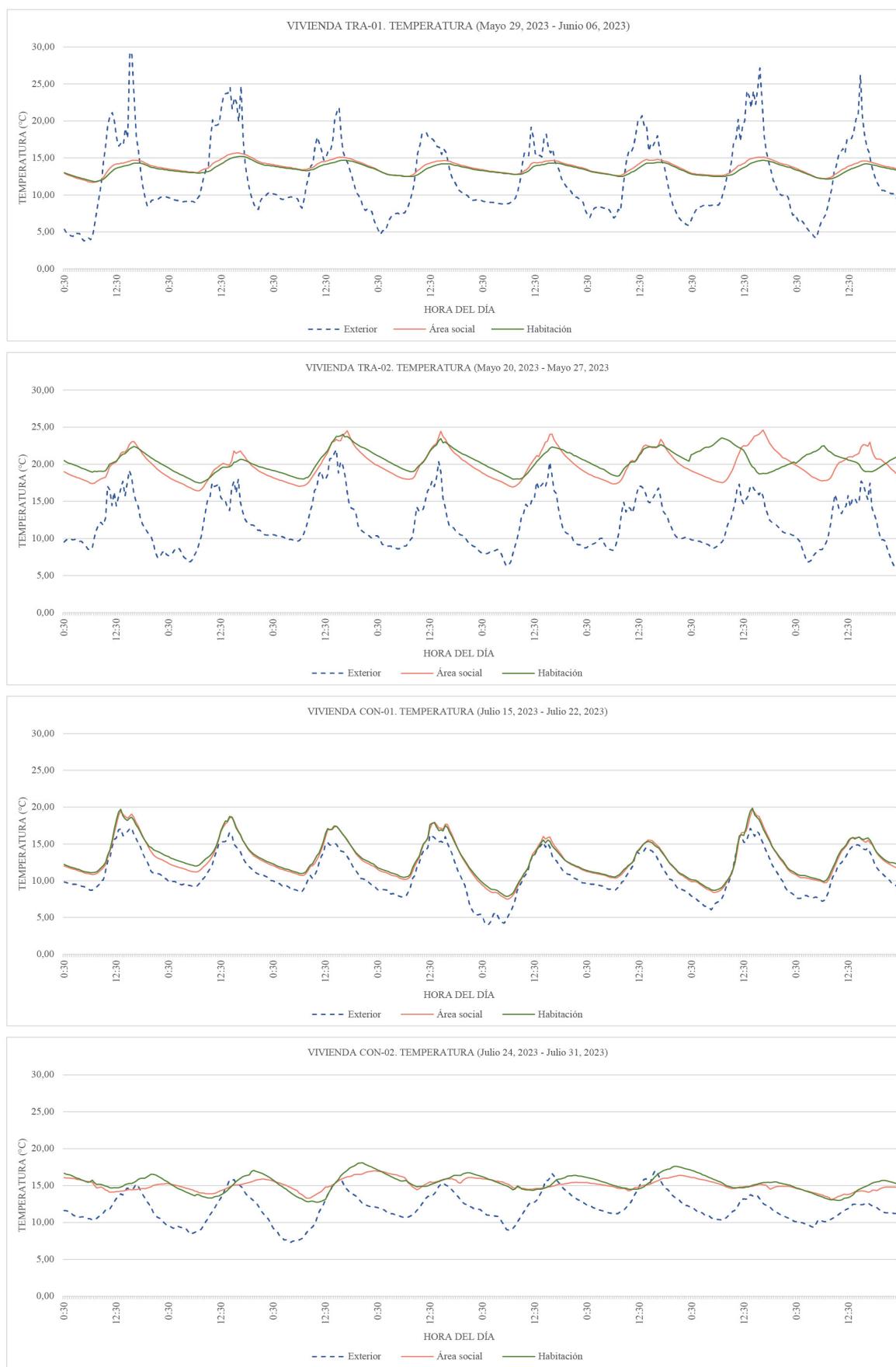


Figura 5. Monitoreo de temperatura interna y externa. Fuente: Elaboración de los Autores.

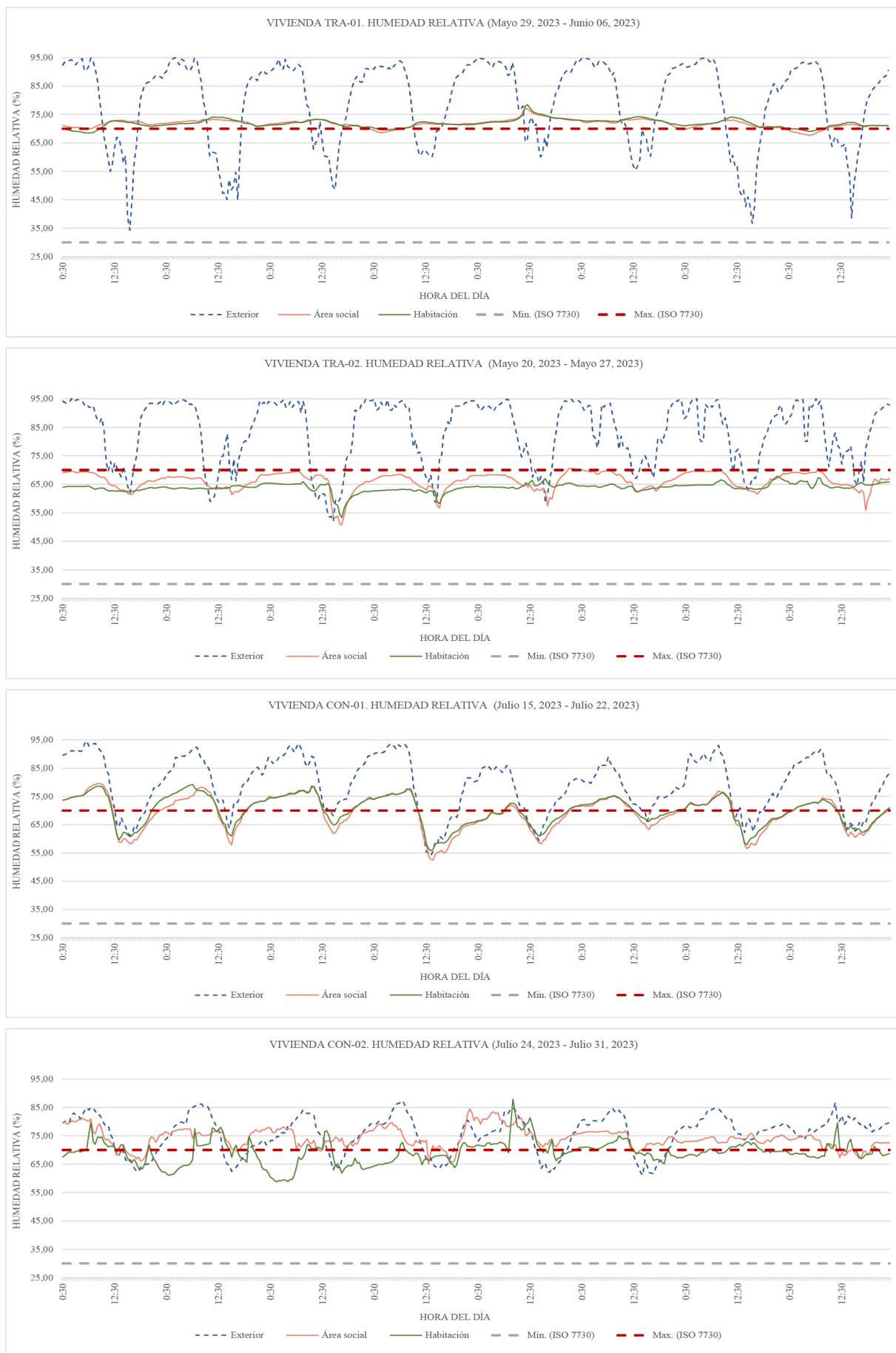


Figura 6. Monitoreo de humedad relativa interior y exterior. Fuente: Elaboración de los Autores.

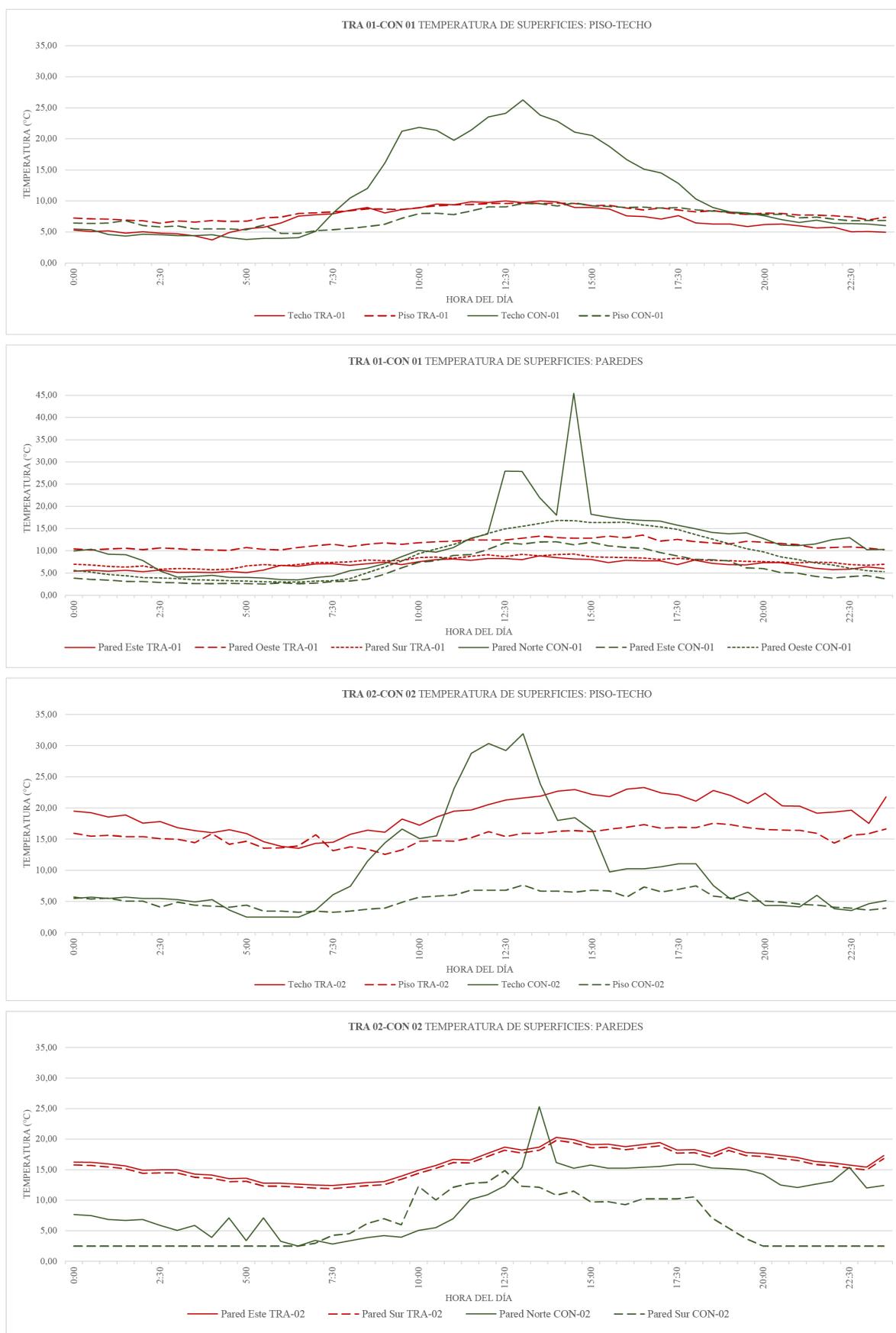


Figura 7. Temperatura de superficies. Fuente: Elaboración de los Autores.

Tabla 4. Rango de evaluación de confort de las viviendas. Fuente: Tartarini et al., (2020).

ID	Temperatura exterior media predominante (°C)	Rango de confort Clase I (°C)	Rango de confort Clase II (°C)	Rango de confort Clase III (°C)
TRA-01	12,22	19,8 - 24,8	18,8 - 25,8	17,8 - 26,8
TRA-02	12,07	19,8 - 24,8	18,8 - 25,8	17,8 - 26,8
CON-01	10,95	19,4 - 24,4	18,4 - 25,4	17,4 - 26,4
CON-02	12,00	19,8 - 24,8	18,8 - 25,8	17,8 - 26,8

fue de 7,52°C, y en la habitación (C) descendió a 7,87°C. La temperatura promedio interior fue aproximadamente 13°C y en el exterior 11°C, con fluctuaciones de temperaturas del día a la noche similares en interior y exterior.

La vivienda CON-02 de dos pisos de hormigón y bloque, registró una oscilación térmica regular. Los promedios de temperatura fueron al exterior 12°C, área social 15,07°C y habitación 15,33°C. Los espacios interiores mostraron temperaturas mínimas de 13,10 °C (B) y 12,75°C (C) y máximas de 17°C (B) y 18°C (C).

MONITOREO DE HUMEDAD RELATIVA EN INTERIOR Y EXTERIOR

La humedad relativa (HR) en el exterior de las 4 viviendas estudiadas fluctúa entre 35% y 95%, al ser mayor cuando la temperatura es menor y viceversa (Figura 6).

En cuanto a la HR interior, los límites según la Norma Técnica Ecuatoriana [NTE] INEN-ISO 7730 son 30% al 70%. El área social (B) de la vivienda TRA-01 estuvo dentro de los límites solo el 9,92% del tiempo monitoreado, semejante a la habitación (C) con 10,44%. En la vivienda CON-01 el área social (B) y la habitación (C) estuvieron dentro del límite 48,56% y 46,48% respectivamente. Este resultado se debe a que la alta transmitancia térmica de los materiales de la cubierta, en este caso fibrocemento y láminas translúcidas, de la vivienda CON-01 permiten la transmisión acelerada de calor, que incrementan la temperatura interior en ciertas horas del día, por ende, que disminuye el valor de la humedad relativa.

Durante todo el tiempo de monitoreo, la vivienda TRA-02 estuvo dentro de los límites de HR. El área social (B) de la vivienda CON-02 solo estuvo el 12,53% del tiempo a diferencia de la habitación (C) que estuvo dentro de los límites el 59,79%. Esto se debe a que el área social (B) de la vivienda CON-02 se encuentra en planta baja y por la presencia de un cerramiento de mampostería y ausencia de superficie acristalada, no ingresa calor por radiación.

MONITOREO DE LA TEMPERATURA DE SUPERFICIES

En TRA-01, las temperaturas del piso y techo, con valores U de 1,53 W/m²K y 2,87 W/m²K respectivamente (Tabla 2), mostraron oscilaciones mínimas de 3,22°C y 6,28°C.

La vivienda CON-01, con un valor U del techo de 5,21 W/m²K, presentó una variación de temperatura superficial interna de hasta 20°C. Esta marcada oscilación podría estar asociada no solo al bajo rendimiento térmico de la cubierta, sino también a una alta exposición a radiación solar durante el día y a la presencia de superficies translúcidas. Las temperaturas de las superficies de las paredes de la vivienda TRA-01, las que poseen un valor U de 0,94 W/m²K a pesar de presentar valores de temperatura bajos, se mantuvieron en un rango de oscilación mínimo y constante (Figura 7). En la vivienda CON-01, las paredes poseen un valor U de 3,10 W/m²K por lo que se observa en la Figura 8 la ganancia y pérdida acelerada de calor.

En cuanto a las viviendas de dos plantas, la vivienda TRA-02 con un valor U en piso de 0,55 W/m²K y en techo de 0,45 W/m²K se mantuvieron en un rango de oscilación constante, a pesar de la amplitud térmica diaria del exterior. Sin embargo, el techo de la vivienda CON-02, el que posee un valor U de 4,02 W/m²K evidencia una ganancia y pérdida significativa de calor (Figura 7).

Se presentó el mismo caso, un rango de oscilación mínimo y constante en las paredes de la vivienda TRA-02, las que poseen un valor U de 0,21 W/m²K. Por otro lado, la temperatura de las paredes de la vivienda CON-02 cuyo valor U es de 2,83 W/m²K sufrió un cambio brusco de al menos 20°C entre las 11:00 y 15:00 horas.

EVALUACIÓN DEL CONFORT TÉRMICO

Las viviendas TRA-01, TRA-02 y CON-02 presentaron un valor de temperatura exterior media predominante de 12°C y la vivienda CON-01, que es la vivienda con mayor altitud, presentó un valor de 10,95°C por lo que 3 de las 4 viviendas serán evaluadas con un mismo rango de confort y la vivienda CON-01 será evaluada con un rango ligeramente menor (Tabla 4).

Las viviendas TRA-01 y CON-01 se encuentran por debajo de la zona de confort, como se observa en la Figura 8. Sin embargo, la vivienda TRA-01 presenta una temperatura más constante que la vivienda CON-01. En esta última, los picos de temperatura más elevados provocaron que, en promedio, alcance un período diario de confort de 0,75 horas (Figura 9).

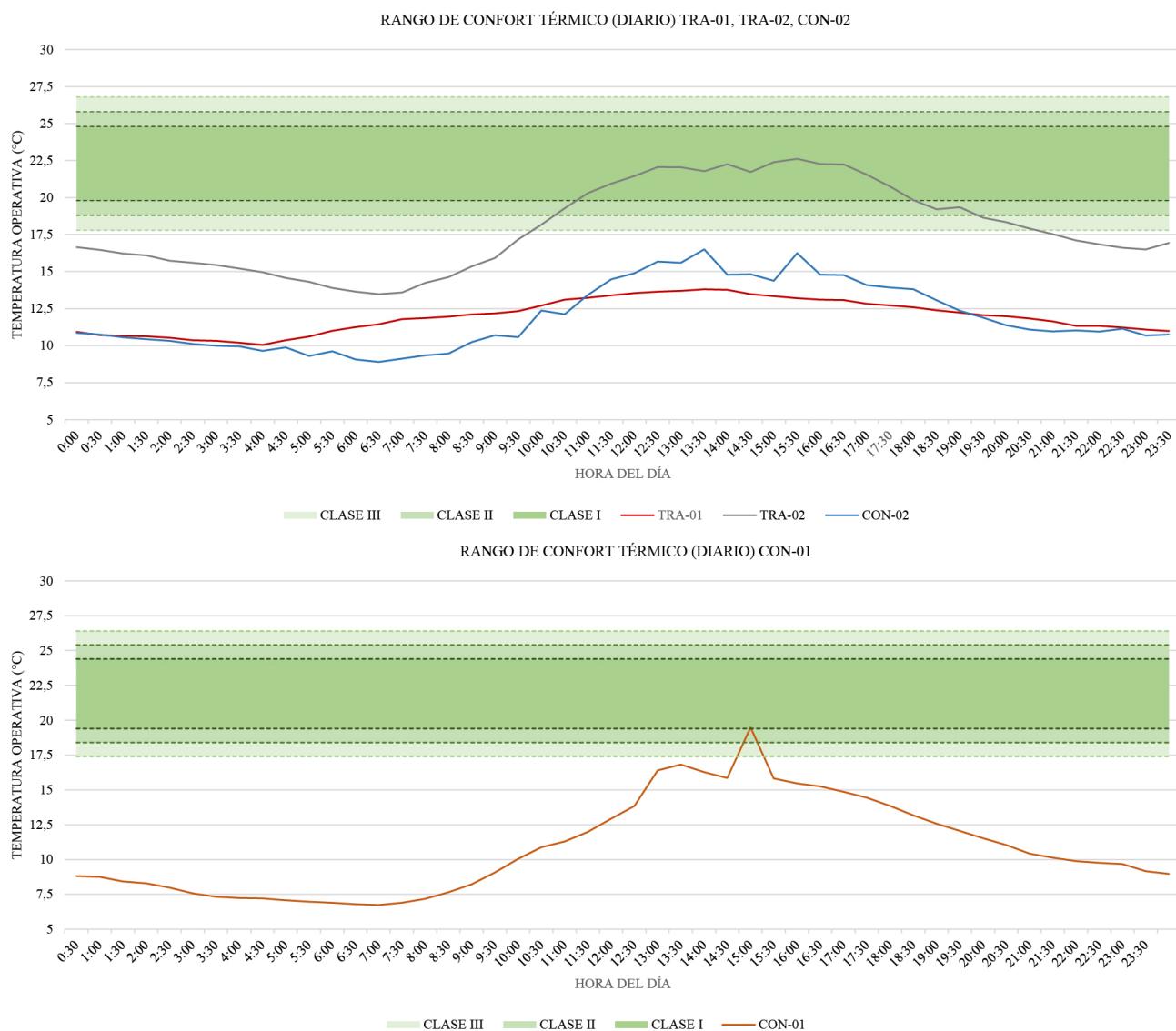


Figura 8. Confort térmico casos de estudio. Fuente: Elaboración de los Autores.

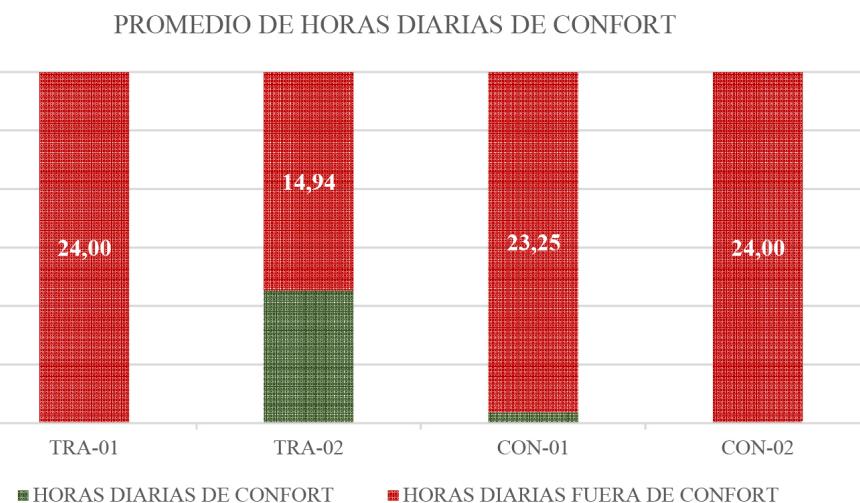


Figura 9. Promedio de Horas de Confort Térmico diarias. Fuente: Elaboración de los Autores.

En la vivienda TRA-01, la temperatura operativa se encontraba entre 4°C y 8°C fuera del rango de confort térmico en comparación con la vivienda CON-01 donde existen horas durante el día en las que está 12°C fuera del rango de confort térmico.

Con respecto a la vivienda TRA-02, con temperaturas extremas en el exterior se encuentra apenas 4°C fuera del rango de confort térmico y presenta 9 horas de confort diarias en promedio (Figura 9). Esto responde al uso de materiales aislantes en la envolvente y al uso de superficies acristaladas con un valor U de 2,75 W/m²K. La vivienda CON-02, a pesar de tener 0 horas de confort diarias en promedio, existen horas durante el día que apenas está a 1°C fuera del rango de confort y en las temperaturas más extremas está a 10°C fuera del rango de confort térmico.

IDENTIFICACIÓN DE ESTRATEGIAS PASIVAS

Las estrategias pasivas de climatización identificadas en las distintas viviendas fueron las siguientes (TRA-01) la orientación con respecto al viento predominante, la masa térmica y el invernadero adosado, (TRA-02) la búsqueda de la óptima orientación, la barrera vegetal perimetral, el color de fachada y de cubierta, la masa térmica y la selección acertada del tipo de vidrio y de carpinterías y en la vivienda (CON-02) la masa térmica en cubierta, el color de la fachada y el cerramiento existente.

Debido a las bajas temperaturas nocturnas y matutinas, es necesario captar el calor por la mañana. La arquitectura vernácula del sector usa formas regulares, pequeñas, baja altura y mínimas aberturas. La vivienda TRA-02 divide el espacio en varios volúmenes que captan asoleamiento al este y oeste. Los dormitorios pueden orientarse al este con ventanas verticales para captar el calor a primeras horas de la mañana.

El aislamiento es indispensable en todos los componentes de la envolvente: piso, paredes, cubierta. Componentes con valores U sobre 3 W/m²K, resultan poco eficientes para mantener un confort térmico en el interior. Para zona climática fría 5, los requisitos de envolvente según la NEC-HS-EE (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda, 2018) es de U-2.8 en techos y U-2.35 en paredes de viviendas no climatizadas. Se sugiere replicar soluciones de paredes y techo de TRA-01 y TRA-02, así como cubierta de CON-02 cuyo aligeramiento de bloque de pómez, se convierte en un aislante térmico.

Es necesario evitar el sobrecalentamiento de los espacios debido a la radiación solar entre 12h00 a 16h00. Se puede minimizar el acristalamiento

o complementarlo con protección solar en las fachadas oeste y norte. La ventilación pasiva es posible durante el mediodía para regular la temperatura y renovar el aire. Sin embargo, las aberturas deben evitar orientarse en la dirección de los vientos predominantes.

LIMITACIONES DEL ESTUDIO Y FUTURAS INVESTIGACIONES

En cuanto a limitaciones del estudio, la monitorización in situ de temperaturas y humedad de los cuatro casos de estudio fueron registradas de manera asíncrona y por un período reducido de tiempo. Futuras investigaciones pueden incluir períodos más largos de monitorización para registrar posibles afectaciones de humedad en la época lluviosa del año. También se podrían realizar simulaciones digitales de un año completo, para contrastar los datos registrados en esta investigación.

Por otro lado, una limitación metodológica es la ausencia de datos sobre la altura interior y la ubicación vertical de los sensores, junto con las diferencias volumétricas y morfológicas entre las viviendas, lo que limita la comparabilidad entre los casos. Sin embargo, se registran aprendizajes de estrategias pasivas para un adecuado confort térmico al interior de las unidades de vivienda ubicadas entre 3000-5000 msnm.

CONCLUSIONES

Este estudio contribuye al campo del hábitat sustentable, con un enfoque empírico en viviendas ubicadas en climas fríos de alta montaña en la región andina. El contexto es poco investigado y el confort térmico cobra importancia debido a la escasa disponibilidad de sistemas activos de climatización en el mercado local. La información obtenida de los censos indica una tendencia creciente a sustituir sistemas constructivos tradicionales por soluciones modernas que, en la mayoría de los casos, presentan un desempeño térmico inferior y generan, además, una pérdida significativa del patrimonio construido. Por consiguiente, es importante explorar estrategias pasivas de acondicionamiento fundamentadas en conocimientos tradicionales.

Para identificar estrategias pasivas que mejoren las condiciones de confort térmico de viviendas ubicadas sobre los 3000 msnm en la región interandina, se describió y monitorizó la temperatura y humedad de 4 viviendas, dos neo vernáculas (TRA-01 y TRA-02) y dos viviendas con materiales modernos. (CON-01 y CON-02).

Los resultados mostraron que las viviendas neovernáculas presentaron una temperatura interior estable con una oscilación promedio de TRA-01 2,13°C y TRA-02 5,29°C. No obstante, TRA-01 se encuentra fuera del rango de confort el 100% del tiempo y TRA-02 se mantuvo dentro del rango de confort el 37.75%. Esta diferencia en el confort muestra que emplear materiales de baja transmitancia térmica como la paja y el sistema de doble vidrio en las ventanas, permiten elevar la temperatura interior. Para futuras investigaciones, se recomienda profundizar el análisis de esta tipología y explorar el potencial del uso de paja como material constructivo sostenible y con altas propiedades térmicas.

En el caso de la vivienda moderna CON-01, se observa que la temperatura interior presenta una tendencia diaria similar a la de la temperatura exterior, con una oscilación térmica de hasta 11,22°C en el interior. En cuanto a la vivienda moderna CON-02 muestra un comportamiento térmico más estable, con menores variaciones a lo largo del día. Esta diferencia se atribuye principalmente a las características constructivas de la cubierta: mientras que la cubierta de CON-02 incorpora materiales con mayor masa térmica, lo que favorece la amortiguación de las fluctuaciones térmicas, la cubierta de CON-01 presenta una menor capacidad de inercia térmica, que facilita las ganancias o pérdidas de calor, por ejemplo cuando en el interior hubo una temperatura mínima absoluta de 7,52°C, en el exterior había 4,73°C, es decir, la envolvente en el momento más crítico del día solo otorgó un incremento de 2,79°C de temperatura al interior con relación al exterior.

Tomando en cuenta los requisitos de envolvente para elementos opacos y ventanas para espacios habitables – no climatizados- de la zona climática 5 según la NEC-HS-EE, a pesar que la norma presenta un bajo nivel de exigencia, solo la envolvente de la vivienda TRA-02 cumple con los requisitos, estos valores se deben al uso de elementos aislantes en toda la envolvente de la casa. La vivienda TRA-01 no cumple con el requerimiento de envolvente en el techo y las viviendas CON-01 Y CON-02 no cumplen con el requerimiento de envolvente en el techo y paredes. Cabe mencionar que las 4 viviendas cumplen con el requerimiento de envolvente de ventanas y piso.

Estos resultados indican que la respuesta térmica de una vivienda no depende exclusivamente del valor de transmitancia térmica de los materiales empleados, sino también de su capacidad para almacenar y liberar calor, es decir, su inercia térmica. Asimismo, se sugiere que otros factores como, la orientación, la proporción de superficie acristalada,

entre otros, pueden tener una incidencia significativa en el comportamiento térmico interior. Por lo que, se recomienda abordar estos aspectos en futuras investigaciones para lograr un análisis más integral del desempeño térmico de las viviendas en zonas andinas sobre los 3000 m.s.n.m.

Por otro lado, se observó que en la gran mayoría de las viviendas tradicionales de San Juan se ha reemplazado parte de los materiales vernáculos deteriorados por materiales modernos más asequibles, fáciles de instalar y económicos, lo que en ciertos casos representó una disminución en la calidad del clima interior. En otros casos, la naturaleza híbrida de las soluciones nos muestra que la coexistencia de materiales tradicionales con un diseño arquitectónico bioclimático contemporáneo respalda a las investigaciones que han demostrado que la incorporación de arquitectura vernácula es vital para alcanzar la sostenibilidad en las prácticas de arquitectura moderna (Moscoso-García y Quesada-Molina, 2023). En este sentido, se recomienda la documentación y análisis de la arquitectura vernácula del sector y provincia.

Finalmente, una limitación importante del estudio fue la imposibilidad de realizar monitoreos simultáneos entre viviendas, lo que afecta la comparabilidad directa de los resultados. Asimismo, no fue posible realizar mediciones a diferentes alturas del interior de la vivienda para considerar el gradiente térmico vertical. Por ello, se recomienda que en futuras investigaciones se incorporen mediciones más exhaustivas, simulaciones térmicas calibradas y un análisis más profundo del comportamiento higrotérmico de materiales vernáculos.

CONTRIBUCIÓN DE AUTORES CRediT

Conceptualización, A.N.M.A., V.F.G.M.; Curación de datos, A.N.M.A.; Análisis formal, A.N.M.A., V.F.G.M.; Adquisición de financiación A.N.M.A.; Investigación, A.N.M.A.; Metodología, A.N.M.A.; Administración de proyecto, A.N.M.A.; Recursos, A.N.M.A.-N.M.S.H.; Software. A.N.M.A.; Supervisión, V.F.G.M.; Validación, A.N.M.A., V.F.G.M., N.M.S.H.; Visualización, A.N.M.A.-N.M.S.H.; Escritura – borrador original, A.N.M.A.; Escritura – revisión y edición, A.N.M.A.-N.M.S.H.

AGRADECIMIENTOS

Artículo desarrollado bajo la Tesis de Magíster "ANÁLISIS COMPARATIVO DEL CONFORT TÉRMICO ENTRE UNIDADES DE VIVIENDA CON DIFERENTES SISTEMAS CONSTRUCTIVOS UBICADAS SOBRE 3000 M.S.N.M."

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASHRAE Standard 55 (2020). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. <https://www.ashrae.org/technical-resources/bookstore/standard-55-thermal-environmental-conditions-for-human-occupancy>
- Atecyr (2010). *Fundamentos de climatización*. Atecyr, Ed.
- Cerrón Contreras, A. (2022). Sistemas de calefacción pasiva para lograr el confort térmico en viviendas alto andinas de Perú. *Catedra Villarreal*, 10(1), 37–48. <https://doi.org/10.24039/cv20221011379>
- Chang, S., He, W., Yan, H., Yang, L., y Song, C. (2021). Influences of vernacular building spaces on human thermal comfort in China's arid climate areas. *Energy and Buildings*, 244, 110978. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.110978>
- Cojocaru, A., y Isopescu, D. (2021). Passive Strategies of Vernacular Architecture for Energy Efficiency. *Bulletin of the Polytechnic Institute of Iași. Construction. Architecture Section*, 67(2), 33 - 44. <https://doi.org/10.2478/bipca-2021-0013>
- Dhaka, S., Mathur, J., Brager, G., y Honnekeri, A. (2015). Assessment of thermal environmental conditions and quantification of thermal adaptation in naturally ventilated buildings in composite climate of India. *Building and Environment*, 86, 17–28. <https://doi.org/10.1016/J.BUILENV.2014.11.024>
- Gallardo, A., Palme, M., Lobato-Cordero, A., Beltrán, R. D., y Gaona, G. (2016). Evaluating thermal comfort in a naturally conditioned office in a temperate climate zone. *Buildings*, 6(3), 27. <https://doi.org/10.3390/buildings6030027>
- Guillén Mena, V., Quesada Molina, F., López Catalán, M., Orellana Valdés, D., y Serrano, A. (2015). Eficiencia energética en edificaciones residenciales Energetic efficiency in residential Buildings. *Estoa. Journal of the Faculty of Architecture and Urbanism*, 4(7), 59-67. <https://doi.org/10.18537/est.v004.n007.07>
- Harman, L. (2010). *Confort térmico en viviendas altoandinas un enfoque integral*. Balcari Editores.
- INAHMI. (2023). Datos de estación meteorológica San Juan. <https://servicios.inamhi.gob.ec/>
- INEN-ISO 7730. (2014). Norma Técnica Ecuatoriana [NTE] - Servicio Ecuatoriano de Normalización [INEN], Sobre ISO 7730: Ergonomía del entorno térmico.
- Indraganti, M. (2010). Behavioural adaptation and the use of environmental controls in summer for thermal comfort in apartments in India. *Energy and Buildings*, 42(7), 1019–1025. <https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2010.01.014>
- Instituto Nacional de Estadística y Censos [INEC]. (02, abril de 2024). Censo Ecuador Resultados. <https://www.censoecuador.gob.ec/resultados-censo/#historicos>
- Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2018). NEC Norma Ecuatoriana de la Construcción. *Eficiencia-Energética en Edificaciones Residenciales (EE)* (código NEC-HS-EE). <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/wp-content/uploads/2023/03/4.-NEC-HS-Eficiencia-Energetica.pdf>
- Ministerio de Vivienda y Agenda Urbana (2022). Documento Básico HE- Ahorro de energía. <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DBHE.pdf>
- Mino-Rodríguez, I. (2021). *A thermal comfort model for high-altitude regions in the Ecuadorian Andes* [Tesis de Doctorado, University College London]. UCL Discovery. <https://discovery.ucl.ac.uk/id/eprint/10139857>
- Moscoso-García, P., y Quesada-Molina, F. (2023). Analysis of Passive Strategies in Traditional Vernacular Architecture. *Buildings*, 13(8), 1984. <https://doi.org/10.3390/buildings13081984>
- Quesada Molina, F., y Bustillos Yaguana, D. (2018). Indoor environmental quality of urban residential buildings in Cuenca-Ecuador: Comfort standard. *Buildings*, 8(7), 90. <https://doi.org/10.3390/buildings8070090>
- Suasaca Pelinco, L., Apaza Mamani, A., Flores Alfaro, J. A., Perca Chura, O. A., y Quinto Machaca, W. (2020). Influencia de las pacas de avena en la temperatura y humedad en las viviendas en zonas altoandinas. *Revista Investigación & desarrollo*, 20(1), 215–227. <https://doi.org/10.23881/idup-bo.020.1-15i>
- Tapia, W. E. (2017). *El confort térmico en las edificaciones de arquitectura vernácula de la ciudad de Loja y Malacatos* [Tesis de Magíster, Universidad de Cuenca]. Repositorio Institucional de la Universidad de Cuenca. https://dspace-test.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/97/simple-search?query=&sort_by=scoreℴ=desc&rpp=10&filter_field_1=subject&filter_type_1>equals&filter_value_1=Arquitectura+tradicional&filter_field_2=subject&filter_type_2>equals&filter_value_2=Dise%C3%B1o+arquitect%C3%B3nico&etal=0&filtername=author&filterquery=Tapia+Chocho%C2C+Wilson+Eduardo&filtertype>equals
- Tartarini, F., Schiavon, S., Cheung, T., y Hoyt, T. (2020). CBE Thermal Comfort Tool: Online tool for thermal comfort calculations and visualizations. *SoftwareX*, 12, 100563. <https://doi.org/10.1016/j.softx.2020.100563>
- UNE-EN 16798-1 (2020). Asociación Normalización Española [UNE]. Eficiencia energética de los edificios. Ventilación de los edificios. Parte 1: Parámetros del ambiente interior a considerar para el diseño y la evaluación de la eficiencia energética de edificios incluyendo la calidad del aire interior, condiciones térmicas, iluminación y ruido. Módulo 1-6. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063261>

UNE-EN-ISO 7726 (2002). Asociación Normalización Española [UNE]. Ergonomía de los ambientes térmicos- Instrumentos de medida de las magnitudes físicas. Asociación Española de Normalización. <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0026478>

Villacís, D. (2010). Construcciones patrimoniales de Chimbacazo. En Instituto Nacional de Patrimonio Cultural (Ed.), *Guía de bienes culturales del Ecuador-CHIMBORAZO* (pp. 39-45). Ediecuatorial. https://www.patrimoniocultural.gob.ec/wp-content/uploads/2023/05/14_CHIMBORAZO.pdf