

Hotel Tierra Patagonia
Cuzco Fegers, 2014
Mirador del Sarmiento
y el macizo del Paine

BARRIA, 2013



Revista
Hábitat
Sustentable

ISSN 0719-0700

Vol. 13 N° 1

Junio

2023



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO



**Revista
Hábitat
Sustentable**

ISSN 0719-0700
Vol. 13 N°. 1
diciembre
2023



UNIVERSIDAD DEL BÍO BÍO

RECTOR:

MAURICIO CATALDO MONSALVES

DECANO FACULTAD DE ARQUITECTURA, CONSTRUCCIÓN Y DISEÑO:

ROBERTO EDUARDO BURDILES ALLENDE

EDITORA RESPONSABLE:

Maureen Trebilcock-Kelly / Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
aperezf@ubiobio.cl

Alexis Pérez-Fargallo / Departamento Ciencias de la Construcción, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
mtrebilc@ubiobio.cl

PRODUCTORA EDITORIAL:

JOCELYN VIDAL RAMOS / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
javidal@ubiobio.cl

ASISTENTE EDITORIAL:

Arq M^ÁRIA PAZ CID ALARCÓN / Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
mpcid@ubiobio.cl

CORRECCIÓN DE ESTILO:

Dra. OLGA OSTRIA REINOSO / Departamento Estudios Generales

GESTIÓN INFORMÁTICA:

KARINA LEIVA / Universidad del Bío-Bío, Chile

DIRECTOR DE ARTE Y DIAGRAMACIÓN:

IGNACIO A. SÁEZ ARANEDA

CONSEJO EDITORIAL:

Dra. M^ª BEATRIZ PIDERIT MORENO / Departamento de Teoría y Diseño de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño, Universidad del Bío - Bío, Concepción, Chile

Dr. RODRIGO GARCÍA ALVARADO / Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile

Dra. NINA HORMAZÁBAL / Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile

Dr. WALDO BUSTAMANTE / Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile

Dr. ERNESTO KUCHEN / Instituto Regional de Planeamiento y Hábitat, San Juan, Argentina

Dra. CRISTINA ENGEL DE ALVAREZ / Universidade Federal do Espírito Santo, Brasil

Dr. OLAVO ESCORCIA OYOLA / Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia

Dr. ALEXANDER GONZÁLEZ CASTAÑO / Universidad Pontificia Bolivariana de Medellín, Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Colombia

Dr. CARLOS RUBIO-BELLIDO / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dra. MARÍA DEL PILAR MERCADER MOYANO / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dr. VICENTE FLORES ALÉS / Universidad de Sevilla, Sevilla, España

Dr. FLAVIO CELIS D'AMICO / Universidad de Alcalá, Madrid, España

Dr. ERNESTO ECHEVERRÍA VALIENTE / Universidad de Alcalá, Madrid, España

TRADUCCIONES:

KEVIN WRIGHT

PORTADA:

HERNAN BARRIA CHATEAU

/ Acuarela del Hotel Tierra Patagonia de la arquitecta chilena Cazú Zegers, 2023.

DIRECCIÓN:

Avda. Collao 1202

CP: 4081112. Concepción, Chile

TEL.(56-41)3111409

Revista HS indexada en Scopus, SciELO, ERIHPLUS, Emerging Source Citation Index de Clarivate Analytics, Latindex Catálogo 2.0, Avery Index, DOAJ, Dialnet, Redib, EBSCO, Rebiun, JornalOcs y ARLA.

HS se adhiere a la Declaración de San Francisco Sobre la Evaluación de la Investigación (DORA).

Los criterios expuestos en los artículos son de exclusiva responsabilidad de sus autores y no reflejan necesariamente la opinión de la dirección de la revista.

Revista Hábitat Sustentable es editada por el Facultad de Arquitecturas Construcción y Diseño de la Universidad del Bío-Bío, es financiada por el Fondo de Publicaciones Periódicas de la Vicerrectoría Académica, la Dirección General de Investigación, Desarrollo e Innovación y la Dirección de Postgrado de la Universidad del Bío-Bío junto al Programa de Información Científica Concurso Fondos de Publicación de Revistas Científicas 2018 Proyecto Código: FP180007



- 04 **EDITORIAL**
Maureen Trebilcock-Kelly, Alexis Pérez-Fargallo
- 08 **EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD Y TRANSMITANCIA TÉRMICA DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE TIERRA**
Santiago Cabrera, Anabela Guillarducci, Dianela González, Mariano Suárez
- 20 **SUSTAINABILITY IN THE BRAZILIAN TIMBER HOUSING VIRTUAL MARKET**
Victor Almeida-De Araujo, Juliano Souza-Vasconcelos, Sheyla Mara Baptista-Serra, José Carlos Paliari, André Luis Christoforo
- 30 **SUFICIENCIA LUMÍNICA DE AMBIENTES INTERIORES EN ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO**
Lucas Arango-Díaz, María Alejandra Garavito-Posada, Juan Sebastian Calle-Medina, Adriana Marcela Murcia Cardona, Olga Lucia Montoya-Flórez, Sebastián Pinto-Quintero
- 42 **EFFECTIVIDAD A FUTURO DE LAS ESTRATEGIAS DE DISEÑO PASIVAS EN VIVIENDAS**
Gustavo Javier Barea Paci, Carolina Ganem Karlen, María Cecilia Molina, Pia Mateo
- 56 **MEJORA DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE COLEGIOS EN LA REGIÓN ALTOANDINA DEL PERÚ. EL CASO DEL “MÓDULO PREFABRICADO AULA TIPO HELADAS - PRONIED”**
Martin Wieser, Antonio Garaycochea, Varinia Prada
- 68 **CAMBIO CLIMÁTICO Y CONFORT TÉRMICO EN LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL COLOMBIANA**
Luisa Fernanda Callejas-Ochoa, Manuela Marín-Echeverri, Michel Steven Puerta-Sepúlveda, Valentina Arroyave-Molina, Monique Silva Neves
- 84 **EVALUACIÓN TÉRMICA, LUMÍNICA Y TERMOGRÁFICA DE UNA SOLUCIÓN HABITACIONAL DE MADERA EN CLIMA TEMPLADO CÁLIDO PARA EL HÁBITAT POPULAR**
Graciela Melisa Viegas, Jesica B. Esparza, Gustavo Alberto San Juan
- 96 **APORTES DE LA METODOLOGÍA DE AULA INVERTIDA EN EL PROCESO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA**
Alejandro Guerrero-Torrenegra, María Machado-Penso, Jorge Aldea-López, Nelsy Londoño-Bermúdez
- 108 **EL TAPANCO EN VIVIENDAS VERNÁCULAS DE QUERÉTARO, MÉXICO. USO Y EFICIENCIA HIGROTÉRMICA**
Martin Hernandez-Chavela, Flavio Roberto Ceja-Soto, Ángel Marroquín de Jesús
- 120 **VIABILIDAD DEL MODELO DE CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO BAJO CONDICIONES DE CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO: AHORRO ENERGÉTICO EN REFRIGERACIÓN EN CAMPECHE, MÉXICO**
Oscar May-Tzuc, Mario Antonio Jiménez-Torres, Andrea del Rosario Cruz y Cruz, Román Canul-Turrisa, Juan Edgar Andrade-Durán, Felipe Noh-Pat

EDITORIAL

La editorial de la Revista Hábitat Sustentable V13N1 no puede comenzar de otra manera que expresando nuestro más sincero agradecimiento a la Dra. Claudia Muñoz Sanguinetti por su arduo trabajo durante los últimos ocho años. Gracias a su labor, la revista ha logrado ser incluida en indexaciones tan relevantes como SCOPUS, SCIELO, EIHPUS y EMERGING SOURCES CITATION INDEX (ESCI-WOS).

El constante esfuerzo de la Dra. Muñoz, junto con el equipo editorial, los autores, los revisores y el interés de los lectores, ha permitido mejorar el impacto de la Revista HS. Este año 2023, nos complace anunciar que ha ingresado al tercer cuartil en el área de Arquitectura de SJR (Scimago Journal & Country Rank). Esperamos que, con el trabajo conjunto de todos, la revista continúe mejorando su impacto y alcance.

Como nuevos editores, deseamos enfatizar nuestro compromiso con la importancia de la investigación en los campos del diseño y la construcción del entorno construido, desde una perspectiva local y cercana a la realidad del Sur Global.

El Sur Global es un concepto que fue desarrollado por el economista alemán Willy Brandt en la década de 1980. Se utiliza para describir las diferencias económicas, políticas y sociales entre los países del hemisferio norte (conocido como el Norte Global) y un grupo de países y regiones ubicados principalmente en el hemisferio sur, especialmente en África, Asia y América Latina.

Este término surgió como una forma de abordar las dinámicas de poder y las desigualdades que existen entre los países en el orden global. Reconoce las disparidades y desafíos que enfrentan los países del Sur Global, donde persisten niveles significativos de desigualdad en los estándares de vida, la esperanza de vida y el acceso a los recursos.

En esta zona del planeta donde existe un predominio de los climas tropicales, las estrategias pasivas, los sistemas constructivos vernáculos, la arquitectura bioclimática y el uso de materiales locales desempeñan un papel relevante para abordar los desafíos asociados con el cambio climático, la descarbonización y otros problemas ambientales.

Además, este contexto socioeconómico implica adaptaciones climáticas y respuestas diferentes a la "necesidad" de confort ambiental. Es importante destacar

que se estima que más de 120 millones de personas viven por encima de los 2,500 metros de altitud en el Sur Global. Todos los países con más de un millón de habitantes en estas altitudes extremas se encuentran en esta región.

Ante la escasez de recursos económicos, las condiciones climáticas extremas y la falta de acceso a soluciones tecnológicas avanzadas, existe una mayor adaptación al ambiente. Acciones personales, que requieren poco o nada de energía, predominan en aquellos lugares donde no se puede costear la energía, o no se tiene acceso a ella. En cierto modo, las prioridades son otras en muchas zonas de África, Asia y América Latina. Por otro lado, el cambio climático tiene y tendrá un impacto muy importante en el hemisferio sur, implicando en muchos casos una reducción de las condiciones de confort ambiental y en otros un incremento del consumo energético por la penetración masiva de sistemas de climatización.

En las últimas dos décadas, muchos países del Sur Global han impulsado políticas y regulaciones en el acceso a la energía, la eficiencia energética y la energía renovable, sin embargo, aún existen brechas importantes en la región. Si bien la Línea de Brandt tiene más de 40 años, a la vista de los desarrollos en materia de sustentabilidad, eficiencia energética, uso de energías renovables y otros aspectos relacionados con el confort ambiental, su demarcación territorial parece tener vigencia en la mayoría de los países respecto a dichas temáticas, teniendo además relación con aspectos climáticos, de altitud, de emisiones y acceso a la energía.

Las barreras en el Sur Global a las que se enfrentan las áreas del diseño y construcción de edificios son más y mayores que en la mayoría de los países del Norte Global. Además, los conceptos han sido desarrollados en el hemisferio norte, lo cual hace que sus definiciones en muchos casos no se correspondan con las realidades del hemisferio sur, implicando no solo ajustes en torno a los conceptos, también nuevas formas de evaluarlos y medirlos. En este sentido, la Revista Hábitat Sustentable busca ser un referente en el desarrollo de investigaciones relacionadas con el Sur Global desde una mirada propia desarrollada en la región. Es importante que se promueva la investigación y el desarrollo de soluciones específicas, teniendo en cuenta la realidad arquitectónica, constructiva, socioeconómica, tecnológica y ambiental de la región, para poder abordar los desafíos y brechas existentes.

EDITORIAL

The Editorial of Hábitat Sustentable V13N1 cannot begin in any other way than by expressing our most sincere gratitude to Dr. Claudia Muñoz Sanguinetti for her hard work over the last eight years. Thanks to her work, the journal has been included in important indexations such as SCOPUS, SCIELO, EIHPLUS, and EMERGING SOURCES CITATION INDEX (ESCI-WOS).

The constant efforts of Dr. Muñoz, together with the editorial team, the authors, the reviewers, and the interest of the readers, have allowed us to improve the impact of Hábitat Sustentable. This year 2023, we are pleased to announce that it has entered the third quartile in SJR's Architecture area (Scimago Journal & Country Rank). We hope that, with everyone's joint work, the journal will continue to improve its impact and reach.

As new editors, we wish to emphasize our commitment to the importance of research in the fields of design and construction of the built environment, from a local perspective and close to the reality of the Global South.

The Global South is a concept developed by the German economist Willy Brandt in the 1980s. It is used to describe the economic, political, and social differences between the countries of the northern hemisphere (known as the Global North) and a group of countries and regions located mainly in the southern hemisphere, especially in Africa, Asia, and Latin America.

This term emerged as a way to address the power dynamics and inequalities that exist between countries on a global scale. It recognizes the disparities and challenges faced by the countries of the Global South, where significant levels of inequality in living standards, life expectancy, and access to resources persist.

In this area of the planet, where tropical climates predominate, passive strategies, vernacular building systems, bioclimatic architecture, and the use of local materials play an important role in addressing the challenges associated with climate change, decarbonization, and other environmental problems.

In addition, this socio-economic context implies climatic adaptations and different responses to the "need" for environmental comfort. It is important to note that it is estimated that more than 120 million people live above 2,500 meters of altitude in the Global South, and all

countries with more than one million inhabitants at these extreme altitudes are located in this region.

Faced with scarce economic resources, extreme climatic conditions, and the lack of access to advanced technological solutions, there is a greater adaptation to the environment. Personal actions, which require little or no energy, predominate in those places where energy cannot be afforded, or where there is no access to it. In some ways, the priorities are different in many areas of Africa, Asia, and Latin America. On the other hand, climate change has and will have a major impact on the southern hemisphere, often involving a reduction in environmental comfort conditions, and in others, increased energy consumption due to the massive penetration of air conditioning systems.

In the last two decades, many Global South countries have promoted policies and regulations in energy access, energy efficiency, and renewable energy. However, there are still important gaps in the region. Although Brandt's Line is now over 40 years old, given the developments in sustainability, energy efficiency, the use of renewable energies, and other aspects related to environmental comfort, its territorial demarcation seems to be valid in most countries regarding these issues but is also related to climate aspects, altitude, emissions, and access to energy.

The barriers in the Global South faced by the areas of building design and construction are more and greater than in most countries of the Global North. In addition, the concepts have been developed in the northern hemisphere, which means that their definitions often do not match the realities of the southern hemisphere, implying not only adjustments around the concepts but also new ways of evaluating and measuring them. In this sense, Hábitat Sustentable seeks to be a reference in the development of research related to the Global South from a perspective developed in the region itself. It is important to promote the research and development of specific solutions, taking into account the architectural, constructive, socio-economic, technological, and environmental reality of the region, to address existing challenges and gaps.

EDITORIAL

O editorial da Revista Hábitat Sustentable V13N1 só pode começar expressando nossos mais sinceros agradecimentos à Dra. Claudia Muñoz Sanguinetti por seu trabalho árduo nos últimos oito anos. Graças ao seu trabalho, a revista foi incluída em índices relevantes, como SCOPUS, SCIELO, EIHPPLUS e EMERGING SOURCES CITATION INDEX (ESCI-WOS).

O esforço constante do Dr. Muñoz, juntamente com a equipe editorial, os autores, os revisores e o interesse dos leitores, nos permitiu melhorar o impacto da Revista HS. Neste ano de 2023, temos o prazer de anunciar que ela entrou no terceiro quartil na área de Arquitetura do SJR (Scimago Journal & Country Rank). Esperamos que, com a colaboração de todos, a revista continue a aumentar seu impacto e alcance.

Como novos editores, queremos enfatizar nosso compromisso com a importância da pesquisa nas áreas de projeto e construção do ambiente construído, com uma perspectiva local e mais próxima da realidade do Sul Global.

O Sul Global é um conceito que foi desenvolvido pelo economista alemão Willy Brandt na década de 1980. Ele é usado para descrever as diferenças econômicas, políticas e sociais entre os países do hemisfério norte (conhecido como Norte Global) e um grupo de países e regiões localizados principalmente no hemisfério sul, especialmente na África, Ásia e América Latina. Esse termo surgiu como uma forma de abordar a dinâmica de poder e as desigualdades que existem entre os países na ordem global. Ele reconhece as disparidades e os desafios enfrentados pelos países do Sul Global, onde persistem níveis significativos de desigualdade nos padrões de vida, na expectativa de vida e no acesso a recursos.

Nessa área do planeta, onde predominam os climas tropicais, as estratégias passivas, os sistemas de construção tradicionais, a arquitetura bioclimática e o uso de materiais locais desempenham um papel relevante no enfrentamento dos desafios associados às mudanças climáticas, à descarbonização e a outros problemas ambientais.

Além disso, esse contexto socioeconômico implica adaptações climáticas e diferentes respostas à "necessidade" de conforto ambiental. É importante

ressaltar que se estima que mais de 120 milhões de pessoas vivam acima de 2.500 metros de altitude no Sul Global. Todos os países com mais de um milhão de habitantes nessas altitudes extremas estão nessa região.

Diante da escassez de recursos econômicos, das condições climáticas extremas e da falta de acesso a soluções tecnológicas avançadas, há uma maior adaptação ao meio ambiente. Ações pessoais, que exigem pouca ou nenhuma energia, predominam onde a energia é inacessível ou financeiramente inviável. De certa forma, as prioridades são outras em muitas partes da África, Ásia e América Latina. Por outro lado, a mudança climática teve e terá um grande impacto no Sul Global, em muitos casos levando a uma redução nas condições de conforto ambiental e, em outros, a um aumento no consumo de energia devido à penetração maciça de sistemas de climatização.

Nas últimas duas décadas, muitos países do Sul Global promoveram políticas e regulamentações sobre acesso à energia, eficiência energética e energia renovável, mas ainda há lacunas significativas na região. Embora a Linha Brandt tenha mais de 40 anos, em vista dos desenvolvimentos em sustentabilidade, eficiência energética, uso de energia renovável e outros aspectos relacionados ao conforto ambiental, sua demarcação territorial parece ainda ser válida na maioria dos países no que diz respeito a essas questões, bem como em relação ao clima, altitude, emissões e acesso à energia.

As barreiras no Sul Global nas áreas de projeto e construção de edifícios são maiores e mais numerosas do que na maioria dos países do Norte Global. Além disso, os conceitos foram desenvolvidos no hemisfério norte, o que significa que suas definições, em muitos casos, não correspondem às realidades do hemisfério sul, implicando não apenas ajustes nos conceitos, mas também novas formas de avaliá-los e mensurá-los. Nesse sentido, a Revista Hábitat Sustentable busca ser uma referência no desenvolvimento de pesquisas relacionadas com o Sul Global a partir de uma ótica desenvolvida na região. É importante promover a pesquisa e o desenvolvimento de soluções específicas, levando em conta a realidade arquitetônica, construtiva, socioeconômica, tecnológica e ambiental da região, de modo a abordar os desafios e as lacunas existentes.

Maureen Trebilcock-Kelly
Coeditora Hábitat Sustentable
Departamento Diseño y Teoría de la Arquitectura, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0002-1984-0259>
mtrebilc@ubiobio.cl



Alexis Pérez-Fargallo
Coeditor Hábitat Sustentable
Departamento de Ciencias de la Construcción, Facultad de Arquitectura, Construcción y Diseño
Universidad del Bío-Bío, Concepción, Chile
<https://orcid.org/0000-0001-7071-7523>
aperezf@ubiobio.cl



EVALUACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD Y TRANSMITANCIA TÉRMICA DE ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE TIERRA

Recibido 28/12/2022
Aceptado 12/04/2023

EVALUATION OF THE THERMAL CONDUCTIVITY AND TRANSMITTANCE COEFFICIENT OF EARTHEN CONSTRUCTIVE ELEMENTS

VALIAÇÃO DO COEFICIENTE DE CONDUTIVIDADE E TRANSMITÂNCIA TÉRMICA DE ELEMENTOS CONSTRUTIVOS DE TERRA

Santiago Cabrera

Grupo de investigación y desarrollo en técnicas de construcción con tierra, Facultad Regional Santa Fe
Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe, Argentina
<https://orcid.org/0000-0003-1300-4927>
spcabrera@outlook.com

Anabela Guillarducci

Centro de investigación y desarrollo para la construcción y la vivienda, Facultad Regional Santa Fe
Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0216-7264>
aguillarducci@frsf.utn.edu.ar

Dianela González

Centro de investigación y desarrollo para la construcción y la vivienda, Facultad Regional Santa Fe
Universidad Tecnológica Nacional, Santa Fe, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0197-2288>
dgonzalez@frsf.utn.edu.ar

Mariano Suarez

Centro de investigación y desarrollo para la construcción y la vivienda,
Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Santa Fe, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-2291-7982>
msuarez@frsf.utn.edu.ar



RESUMEN

En este trabajo se pretende determinar la conductividad térmica de diferentes elementos constructivos de tierra producidos con materiales característicos del centro este de la provincia de Santa Fe (Argentina) y evaluar su aptitud para ser empleados en la construcción de envolventes que cumplan con los requerimientos de aislación térmica solicitados por la normativa nacional correspondiente. Para ello se confeccionaron probetas siguiendo las diferentes técnicas de construcción con tierra empleadas en la región (bloque de tierra comprimida, adobe, tapia, quincha y revoques) y se midió su coeficiente de conductividad térmica, con el cual se calculó la transmitancia térmica de diferentes paquetes constructivos de tierra. Los resultados obtenidos indican que las técnicas de construcción con tierra evaluadas presentan, en todos los casos, un mejor desempeño térmico que los tradicionales muros de ladrillo cerámico macizo o bloques de hormigón, siendo la quincha la técnica con mayor capacidad de aislamiento térmico.

Palabras clave

aislamiento térmico, muros, materiales de construcción

ABSTRACT

The aim of this work is to determine the thermal conductivity of different earthen constructive elements produced with materials typical of the central-eastern part of the Province of Santa Fe (Argentina), and to evaluate their suitability to be used in the construction of envelopes that comply with the thermal insulation requirements of the corresponding National Regulations. For this purpose, test specimens were made following the different earth construction techniques used in the region (compressed earth block, adobe, rammed earth (*tapia*), wattle and daub (*quincha*), and plaster), and their thermal conductivity coefficient was measured, with which the thermal transmittance of different earth construction packages was calculated. The results obtained indicate that the earth construction techniques evaluated show, in all cases, a better thermal performance than traditional solid ceramic brick or concrete block walls, with wattle and daub being the technique with the highest thermal insulation capacity.

Keywords

climate change, housing, sustainable development, resilience

RESUMO

O objetivo deste trabalho é determinar a condutividade térmica de diferentes elementos construtivos de terra produzidos com materiais característicos do centro-leste da província de Santa Fé (Argentina) e avaliar sua adequação para uso na construção de envelopes de edifícios que atendam aos requisitos de isolamento térmico dos regulamentos nacionais correspondentes. Para isso, foram feitos corpos de prova de acordo com as diferentes técnicas de construção com terra utilizadas na região (bloco de terra comprimida, adobe, tapia, quincha e gesso) e foi medido seu coeficiente de condutividade térmica, com o qual foi calculada a transmitância térmica de diferentes pacotes construtivos de terra. Os resultados obtidos indicam que as técnicas de construção com terra avaliadas apresentam, em todos os casos, melhor desempenho térmico do que as tradicionais paredes sólidas de tijolos cerâmicos ou blocos de concreto, sendo a quincha a técnica com maior capacidade de isolamento térmico.

Palavras-chave:

isolamento térmico, paredes, materiais de construção.

INTRODUCCIÓN

Frente al contexto de crecimiento continuo respecto de los precios de la energía a nivel mundial y en pos de apoyar los esfuerzos globales para mitigar el calentamiento global, la utilización de envolventes adecuados a los contextos locales se configura como una estrategia para mejorar la eficiencia energética de los edificios. La elección de envolventes adecuados presenta beneficios, no sólo en cuanto a los ahorros energéticos de los espacios, la mejora del microclima interior y la reducción de emisiones contaminantes obtenidos, sino también en relación con la viabilidad técnica y económica de un proyecto (Balter et al., 2020).

En este contexto, pueden resaltarse las potencialidades de los muros de cerramiento contruidos con tierra, cuya continuidad histórica se debe en gran medida a la abundancia de su materia prima, la economía de sus procesos constructivos, sus cualidades bioclimáticas y a la armonía de su interrelación con el ambiente natural en que se desarrolla (Pacheco-Torgal & Jalali, 2012). Esto lo saben, sustentan y defienden los pueblos con tradiciones locales, especialmente aquellas ligadas a cultos ancestrales con la tierra, quienes con sabiduría popular producen arquitectura adecuándose al clima y costumbres de cada sitio y sociedad (Fernandes et al., 2019).

Existen numerosas técnicas y sistemas constructivos que emplean tierra como materia prima preponderante (Rotondaro, 2018), sin embargo, estas pueden clasificarse de manera simplificada dentro de las siguientes categorías:

- **Técnicas mixtas:** la tierra se emplea como material de relleno y revestimiento, valiéndose de una estructura portante independiente, generalmente construida con madera. Las técnicas más empleadas en Argentina son: la quincha, la cual se caracteriza por su estructura secundaria de cañas o listones de madera equiespaciados entre 10 y 15 cm y dispuestos en sentido horizontal o diagonal; la tierra alivianada o paja encofrada y el enchorizado (Esteves & Cuitiño, 2020).
- **Técnicas monolíticas:** mediante el moldeo directo con las manos o la utilización de encofrados móviles llenos con morteros compactados o vertidos, se construyen muros monolíticos, generalmente con capacidad portante. El mayor exponente de estas técnicas es la tapia (Tepale Gamboa, 2016).
- **Técnicas de albañilería:** aquellas que emplean componentes prefabricados de pequeñas dimensiones, producidos previamente a la construcción de la vivienda. Estos componentes se adhieren entre sí empleando morteros de tierra. Los muros contruidos con bloques de tierra comprimida

(BTC) o adobes son ejemplos de estas técnicas (Dorado et al., 2022).

Una de las características más importantes de la tierra como material de construcción se relaciona con sus propiedades térmicas, en particular con su capacidad de transmitir calor. Esta capacidad se puede definir en función de una de sus propiedades físicas fundamentales: el coeficiente de conductividad térmica (λ), a partir del cual puede determinarse la transmitancia térmica de una envolvente (K) directamente vinculada a su aislamiento térmico (Cuitiño et al., 2020).

A pesar de la extensa bibliografía existente sobre las propiedades térmicas de los materiales, no se han publicado en textos académicos investigaciones sobre el coeficiente de conductividad térmica de elementos constructivos de tierra producidos con materiales propios de la provincia de Santa Fe (Argentina), lo cual imposibilita el cálculo preciso de la transmitancia térmica de los muros de cerramiento contruidos con estos elementos.

En lo que respecta al marco normativo, en Argentina son varias las normas que definen los lineamientos de acondicionamiento térmico de las edificaciones. Por ejemplo, la norma IRAM 11601:2010 establece la densidad aparente y conductividad térmica de los materiales de construcción más empleados en el país y el procedimiento de cálculo para determinar la resistencia térmica y su inversa. Asimismo, determina la transmitancia térmica (K) de muros y cerramientos, cuyos valores deberían ser inferiores a los máximos admisibles establecidos por las normas IRAM 11605:2010 e IRAM 11900:2017 para cada región del País, definidas en la norma IRAM 11603:2012. Sin embargo, en lo que respecta a las propiedades térmicas de los elementos constructivos elaborados con tierra, este conjunto de normas únicamente indica el valor de la conductividad térmica de BTC con densidad de 1800 kg/m³. De esta manera, la determinación del coeficiente de conductividad térmica para diferentes elementos constructivos de tierra producidos con materiales locales es crucial para el desarrollo normativo en Argentina. El objetivo de este trabajo, por lo tanto, consiste en determinar el coeficiente de conductividad térmica de diferentes elementos constructivos de tierra producidos con materiales característicos del centro este de la provincia de Santa Fe (Argentina) y evaluar su aptitud para ser empleados en la construcción de muros que cumplan con los requerimientos de aislamiento térmico solicitados por la normativa nacional correspondiente.

ANTECEDENTES

La medición del coeficiente de conductividad térmica (λ) de diferentes elementos constructivos de tierra ha sido ampliamente estudiado a nivel internacional, resaltándose los artículos publicados por Laborel-Préneron et al. (2018), Saidi et al. (2018) y El Fgaier et

al. (2016), en los cuales se determinó el coeficiente de conductividad térmica de adobes. Por su parte, se encuentran también las determinaciones realizadas por Millard y Aubert (2014) sobre bloques de tierra extruidos; y las efectuadas por Cagnon et al. (2014) y Ouedraogo et al. (2020) sobre BTC. Además, son de relevancia las investigaciones realizadas por Mosquera Arancibia (2013) para su tesis doctoral sobre la efectividad de emplear el método de la "aguja caliente" para determinar el λ en adobes y BTC; asimismo, el estudio realizado por Wieser et al. (2018) en el cual se evaluó la conductividad térmica sobre muestras de quincha, tierra alivianada y morteros de tierra; y, por último, la tesis desarrollada por Cabrera Córdova (2019) en la cual se determinó, entre otros parámetros, la conductividad térmica de adobes, revoques de tierra y empetate.

A pesar de los antecedentes mencionados, en Argentina son pocas las líneas de investigación desarrolladas a fin de cuantificar las propiedades térmicas de los materiales de tierra. En este sentido, se mencionan los trabajos realizados por Costantini Romero et al. (2021) y Costantini Romero y Francisca (2022), en los cuales se determinó el coeficiente de conductividad térmica de BTC producidos en la ciudad de Córdoba (Arg.) y el realizado por Cuitiño et al. (2015), en el que se determinó la transmitancia térmica (K) de diferentes paneles de quincha.

Debe mencionarse, además, que los resultados publicados en las investigaciones referenciadas, a pesar de encontrarse dentro de rangos similares, presentan diferencias significativas, motivadas principalmente por el tipo de suelo empleado en la confección de las probetas, la metodología de moldeo de estas y el equipo de ensayo utilizado. En lo que respecta a los equipos y metodologías empleados para la determinación de λ , se han utilizado los denominados métodos de la caja caliente¹, aguja térmica² y placas calientes³.

Finalmente, es importante destacar los trabajos realizados por el Comité RILEM (Fabbri et al., 2022), Volhard (2016), Cuitiño et al. (2020) y Minke (2005) en los cuales, pese a no efectuarse determinaciones directas de la conductividad térmica de los elementos constructivos de tierra, sí se realiza un análisis profundo de la variación de este coeficiente en función de variables como la técnica de construcción y la densidad de los elementos constructivos.

METODOLOGÍA

MATERIALES

La tierra empleada para la fabricación de las diferentes muestras se obtuvo de una cantera situada en la comuna de Monte Vera (Santa Fe, Arg.). En trabajos previos (Cabrera et al., 2022) se identificó el suelo empleado como una "arcilla de baja plasticidad CL" con un contenido de 54% de limo, 32% de arcilla y 14% de arena fina. Asimismo, las semicuantificaciones realizadas por DRX confirman que, desde el punto de vista mineralógico, el mineral preponderante es el cuarzo (65%), seguido por filosilicatos (arcillas) (25%) y feldespatos (9%). Los difractogramas de los agregados orientados de la fracción arcillosa de la tierra indican que los filosilicatos presentes en ella son illita, caolinita y esmectita.

La arena fina empleada en la corrección granulométrica posee una distribución de tamaños uniforme, en cuanto a que más del 90% de sus partículas poseen un tamaño comprendido entre 0.5 y 0.1 mm. Además, no se advierten aristas ni formas angulares en sus granos, presentando todos ellos una forma redondeada. Desde el punto de vista mineralógico, sus granos están constituidos mayoritariamente por cuarzo (95% en peso), contando únicamente con un 1% de arcillas.

La arena gruesa, también de sílice y con una distribución de tamaños de entre 2 y 3 mm, fue adquirida en la empresa Gravafilt en la ciudad de Paraná (Arg.), quienes la extraen por dragado en la cuenca alta del río Paraná, la clasifican y comercializan con diferentes granulometrías. Esta arena se utilizó únicamente en la confección de las muestras de tapia.

Para la fabricación de las probetas de adobe, quincha y revoque grueso se empleó, como fibra vegetal, paja de trigo adquirida en las proximidades de la ciudad de Santa Fe (Arg.). A pesar de que la paja empleada en la confección de los diferentes tipos de probetas fue la misma, esta fue cortada en diferentes longitudes: 2 cm para revoques gruesos, 3 cm para adobes y entre 10 y 12 cm para el relleno de quincha. En la Figura 1 pueden apreciarse los materiales empleados en la confección de los diferentes tipos de probetas.

1 Determina el coeficiente λ y la conductividad K de un cerramiento en régimen estacionario y a escala real, siendo la probeta un muro que separa dos ambientes con diferentes temperaturas.

2 Determina el coeficiente λ en régimen no estacionario introduciendo dentro del material a evaluar una aguja metálica con calefactor y termocupla, midiendo su variación de temperatura a lo largo del tiempo.

3 Se determina el coeficiente λ en régimen estacionario sobre una probeta con forma de placa de entre 10 y 90 mm de espesor, que se coloca entre 2 placas a diferentes temperaturas. Las placas están confinadas dentro de una caja paralelepípedo de alto aislamiento térmico.



Figura 1. Materiales empleados en la confección de probetas: a) tierra, b) barro (mezcla de tierra y agua), c) arena fina y d) paja de trigo de 3 cm de longitud. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1. Dosificación empleada en la confección de las probetas. Fuente: Elaboración de los autores.

Material	Proporción en % del peso seco				Agua* (%)	Relación agua/tierra
	Tierra	Arena fina	Arena gruesa	Paja		
(a) BTC	70.0	30.0	-	-	11.7	0.17
(b) Adobe	96.5	-	-	3.5	32.6	0.34
(c) Relleno de quincha	93.8	-	-	6.2	60.1	0.64
(d) Tapia	60.0	20.0	20.0	-	11.0	0.18
(e) Revoque grueso	67.5	29.1	-	3.4	23.3	0.34
(f) Revoque fino	35.0	65.0	-	-	16.3	0.47

* % determinado en función del peso seco de la tierra.

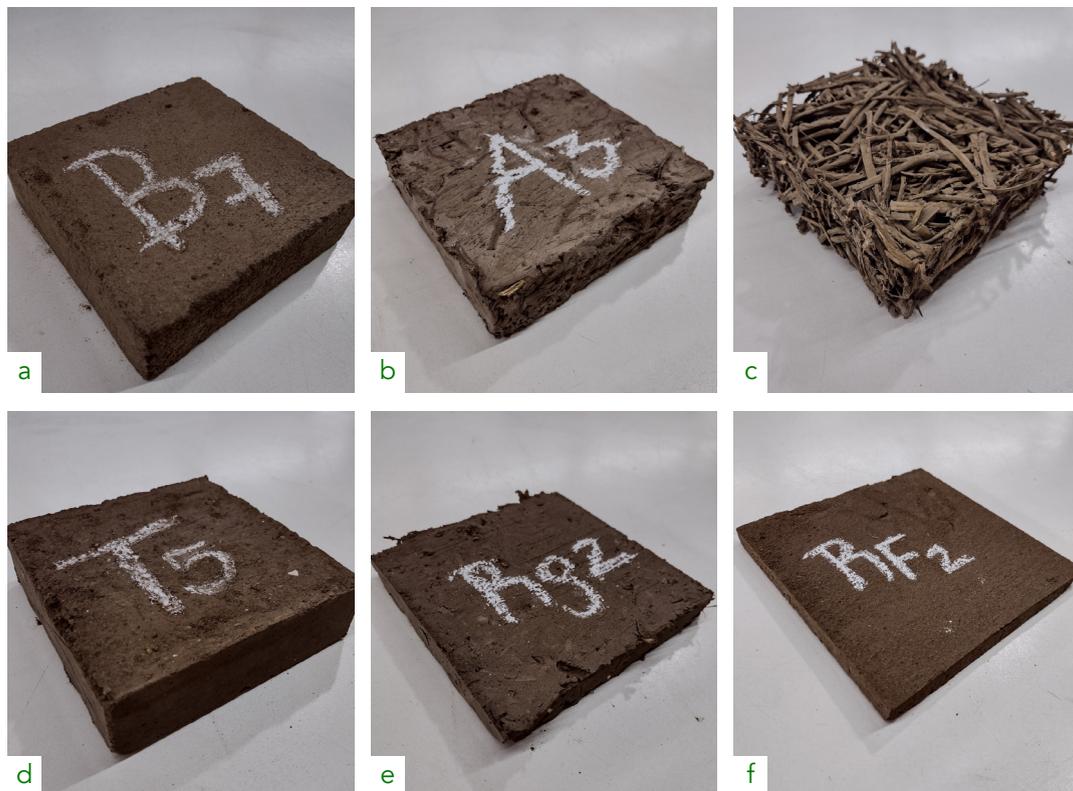


Figura 2. Probetas representativas de las diferentes técnicas constructivas de tierra: a) BTC, b) adobe, c) relleno de quincha, d) tapia, e) revoque grueso y f) revoque fino. Fuente: Elaboración de los autores.

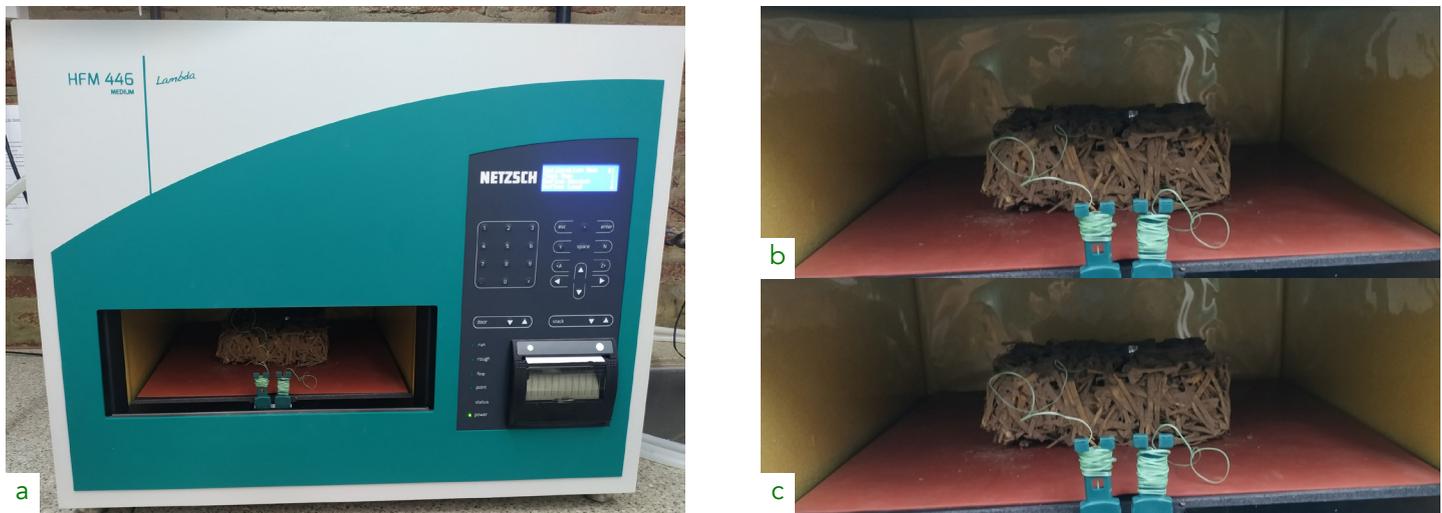


Figura 3. a) Equipo HFM 446, b) termocuplas adicionales y c) film de silicona empleados en la determinación del coeficiente de conductividad térmica. Fuente: Elaboración de los autores.

CONFECCIÓN DE PROBETAS

Por cada técnica constructiva fueron confeccionadas 3 probetas de 13 x 13 x 4 cm (con excepción de las de revoque fino, de 2 cm de espesor), generando así un total de 18 probetas, cuyas dosificaciones se exponen en la Tabla 1. Las probetas de BTC se confeccionaron cortando, con una sierra circular de banco, bloques enteros producidos en laboratorio con una prensa de accionamiento manual Altech Geo 50, los cuales, por no estar estabilizados con cemento Portland, no fueron curados, dejándose secar por 7 días resguardados de la intemperie.

Las probetas de adobe, revoque grueso y revoque fino se elaboraron vertiendo la mezcla húmeda dentro de cada molde, acomodándola de manera tal de no generar vacíos ni oquedades. Luego de 24 h se realizó el desmolde de las probetas, dejándolas secar por 7 días en condiciones de temperatura y humedad de laboratorio ($24\text{ °C} < t < 27\text{ °C}$ y $35\% < HR < 45\%$). El moldeo de las probetas de tapia se realizó en 3 capas, introduciendo terceras partes del material húmedo dentro del molde y compactando con 25 golpes de un pisón de madera de 550 g cada capa, alisando finalmente la superficie superior con un papel de lija. Estas probetas fueron desmoldadas de manera inmediata, dejándose secar, al igual que el resto, por 7 días dentro del laboratorio.

Para el moldeo de las probetas de relleno de quincha se sumergió la paja en barbotina (barro de consistencia líquida) y, luego de unos segundos se extrajo, se escurrió el líquido excedente y se introdujo la paja recubierta de barbotina dentro del molde, generándose así un entrelazado de fibras embebidas en barbotina (Figura 2.c). Luego, se dejaron secar por 7 días y se extrajeron del molde.

DETERMINACIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD Y TRANSMITANCIA TÉRMICA

Para cada una de las probetas confeccionadas se determinó en una primera instancia la densidad aparente seca y luego el coeficiente de conductividad térmica, empleando para ello un equipo medidor de flujo de calor modelo HFM 446 Lambda Medium de la firma alemana Netzsch (Figura 3.a), adoptando una temperatura media de ensayo de 17 °C y una variación de $\pm 10\text{ °C}$, siguiendo el procedimiento estipulado por la norma IRAM 1860:2002. Previo a los ensayos, todas las probetas fueron secadas en estufa a 100 °C hasta lograr la constancia de masa. Dada la irregularidad de la superficie de las probetas, estas fueron ensayadas utilizando un kit complementario, proporcionado por el proveedor del equipo, constituido por un film de silicona y termocuplas adicionales (Figura 3.b y Figura 3.c) cuyo fin es mejorar la interfase de contacto entre las placas térmicas y las superficies rugosas de las caras de las probetas.

Una vez determinado el coeficiente de conductividad térmica de cada tipo de muestra ensayada, se calculó el coeficiente de transmitancia térmica (K) de diferentes paquetes constructivos de tierra según lo que señala el procedimiento indicado por la norma IRAM 11601:2010; adoptando los valores de resistencias térmicas superficiales interior y exterior propuestos por esta norma. Las fórmulas empleadas para el cálculo de K fueron las indicadas en las Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3:

$$R_i = e_i / \lambda_i \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$R_t = R_{\text{ext}} + R_i + R_{\text{int}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$K = 1/R_t \quad (\text{Ecuación 3})$$

Siendo:

- R_i : resistencia térmica de cada capa constitutiva del muro, en m^2K/W
- λ_i : coeficiente de conductividad térmica de cada material, en W/mK
- e_i : espesor de cada material que compone el muro, en m
- R_t : resistencia térmica total del muro, en m^2K/W
- R_{ext} : resistencia térmica superficial exterior, adoptando como valor $0.04 m^2K/W$
- R_{int} : resistencia térmica superficial interior, adoptando como valor $0.13 m^2K/W$
- K: transmitancia térmica total del muro, en W/m^2K

RESULTADOS

En la Tabla 2 se exponen los valores de densidad aparente (ρ) y coeficiente de conductividad térmica (λ) obtenidos para cada probeta ensayada, junto con el valor

promedio correspondiente, la desviación estándar (S_d) y el coeficiente de variación (C_v).

Por su parte, en la Tabla 3 se presentan los valores del coeficiente de transmitancia térmica (K) calculados para diferentes paquetes constructivos de muros que empleen los componentes de tierra analizados en este trabajo, propuestos en función de las prácticas constructivas locales. En dicha tabla, la columna denominada "elemento principal" hace referencia al espesor del adobe, BTC, tapia o quincha, según corresponda.

DISCUSIÓN

SOBRE LA DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Como puede apreciarse en la Tabla 2, existe una correlación entre la densidad de los elementos

Tabla 2. Densidad aparente y coeficiente de conductividad térmica de las probetas. Fuente: Elaboración de los autores.

Material	Densidad				Conductividad térmica			
	ρ_i (kg/m ³)	ρ_{prom} (kg/m ³)	S_d (kg/m ³)	C_v (%)	λ_i (W/mK)	λ_{prom} (W/mK)	S_d (W/mK)	C_v (%)
BTC	1587				0.59			
	1588	1595	13.4	0.8	0.61	0.60	0.01	1.7
	1611				0.59			
Adobe	1353				0.46			
	1364	1352	12.2	0.9	0.45	0.43	0.05	11.4
	1340				0.37			
Quincha	341				0.11			
	478	429	76.4	17.8	0.14	0.13	0.02	15.3
	468				0.15			
Tapia	1634				0.58			
	1697	1687	48.9	2.9	0.64	0.67	0.10	15.0
	1730				0.78			
Revoque grueso	1348				0.49			
	1303	1329	22.8	1.7	0.41	0.48	0.08	16.0
	1334				0.56			
Revoque fino*	1233				0.23			
	1286	1260	37.6	3.0	0.28	0.25	0.04	15.8

* Solo pudieron realizarse 2 mediciones sobre esta serie.

Tabla 3. Cálculo del coeficiente de transmitancia térmica de diferentes paquetes constructivos de tierra.. Fuente: Elaboración de los autores.

Paquete constructivo	Espesores de cada capa (m)					Total	K (W/m²K)
	R. fino exterior	R. grueso exterior	Elemento principal	R. grueso interior	R. fino interior		
BTC (12 cm)	-	-	0.12	-	0.01	0.13	2.443
BTC (25 cm)	0.01	0.02	0.25	0.02	0.01	0.31	1.337
BTC con cámara de aire (4 cm)	0.01	0.02	0.25 + 0.12	-	-	0.44	0.969
Adobe	0.01	0.02	0.30	0.02	0.01	0.36	0.972
Tapia (30 cm) con revoques	0.01	0.02	0.30	0.02	0.01	0.36	1.282
Tapia vista	-	-	0.55	-	0.01	0.56	0.969
Quincha	0.01	0.02	0.15	0.02	0.01	0.21	0.675

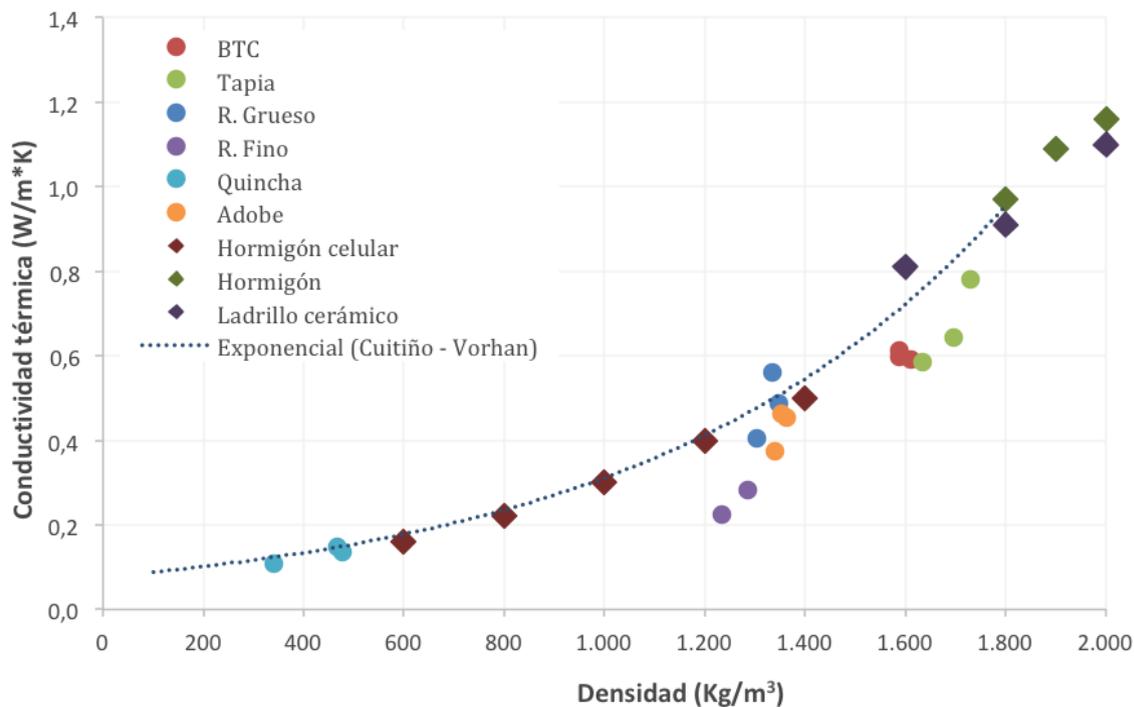


Figura 4. Correlación entre la densidad de elementos constructivos y su coeficiente de conductividad térmica. Fuente: Elaboración de los autores.

constructivos y su coeficiente de conductividad térmica, siendo el relleno de quincha, cuya densidad se encuentra en el orden de los 400 kg/m³, el que presenta el coeficiente de conductividad térmica más bajo, de aproximadamente 0.13 W/mK. Este coeficiente es comparable con el de los hormigones celulares de densidad similar (IRAM 11601:2010), pero significativamente mayor al de los materiales aislantes convencionales, tales como la lana de vidrio, el poliestireno expandido o la espuma de poliuretano (Navacerrada et al., 2021). Luego del relleno de quincha, el elemento constructivo con menor coeficiente de

conductividad térmica es el adobe con un λ_{prom} de 0.43 W/mK, seguido por el BTC con un λ_{prom} de 0.60 W/mK y finalmente la tapia con un λ_{prom} de 0.67 W/mK.

De acuerdo con los datos anteriores, se hace evidente la dispersión en los resultados de las muestras de relleno de quincha y de tapia, lo cual puede asociarse a la mayor variabilidad en las densidades de cada muestra, propias del proceso de confección de estas, correspondiente al relleno manual con gran volumen de quedades debido al entrelazamiento de las fibras

de paja en el relleno de quincha y a la compactación dinámica para la tapia.

En lo que respecta a las muestras de revoque grueso, tanto su densidad como λ son similares a los de las muestras de adobe. Esta similitud se atribuye a que, independientemente de los materiales empleados (paja para los adobes y arena + paja para el revoque grueso), la relación agua/tierra de ambos, principal causante de la porosidad y densidad aparente de los elementos constructivos de tierra (Laborel-Préneron et al., 2018), son iguales, de 0.34. Del mismo modo, las muestras de revoque fino con una relación agua/tierra de 0.47 -la mayor después de la del relleno de quincha- presentan luego la menor densidad y λ promedio.

En la Figura 4 pueden compararse los resultados experimentales obtenidos en esta investigación (puntos coloreados) con los recopilados y publicados por Volhard (2016) y Cuitiño et al. (2020) para diversos elementos constructivos de tierra (línea punteada). En ella puede apreciarse cómo, a pesar de la dispersión en los resultados alcanzados en este trabajo, la correlación exponencial entre la densidad de los elementos constructivos de tierra y su coeficiente de conductividad térmica es similar a la determinada por los autores citados. Esto permite pensar que, independientemente de las características

mineralógicas de la tierra empleada, la cantidad y tipo de arena, junto con las fibras vegetales utilizadas en la estabilización, el principal determinante del coeficiente de conductividad térmica de estos elementos constructivos es su densidad aparente final.

Además, en la Figura 4 se incluyen los valores de conductividad térmica para diferentes elementos constructivos de uso tradicional en la construcción, en correspondencia con sus densidades. Puede apreciarse como el hormigón celular, cuyas densidades se asemejan a la de los diferentes elementos constructivos de tierra, posee coeficientes de conductividad térmica muy similares a los determinados por Cuitiño et al. (2020) y Volhard (2016) (línea punteada), y que tanto el hormigón como el ladrillo cerámico macizo, a pesar de encontrarse en un rango de densidades mayores a los estudiados por los autores citados, siguen la misma tendencia.

SOBRE LA TRANSMITANCIA TÉRMICA

La normativa argentina IRAM 11605:2010 establece tres niveles de confort higrotérmicos en invierno y verano para las diferentes zonas bioclimáticas del país, en función de las temperaturas medias exteriores. De esta manera, para el centro este de la provincia de Santa Fe (zona bioclimática IIb) los valores de

Tabla 4. Cálculo del coeficiente de transmitancia térmica de diferentes paquetes constructivos. Fuente: Elaboración de los autores a partir de los datos de la norma IRAM11601:2010.

Material	Espesores (m)					Total	K (W/m ² K)
	R. fino exterior*	R. grueso exterior*	Elemento principal	R. grueso interior*	R. fino interior*		
Ladrillo común 25 cm	0.01	0.02	0.25	0.02	0.01	0.31	1,505
Ladrillo común con cámara de aire	0.01	0.02	0.25+0.25	0.02	0.01	0.56	0,924
Ladrillo hueco 18 cm	0.01	0.02	0.18	0.02	0.01	0.24	1.390
Ladrillo hueco con cámara de aire	0.01	0.02	18 + 12	0.02	0.01	0.36	0.927
Bloque de hormigón 20 cm	0.01	0.02	0.20	0.02	0.01	0.36	2.226
Bloque de hormigón con cámara de aire	0.01	0.02	0.20+0.20	0.02	0.01	0.36	1.540
Hormigón celular (600 kg/m ³)	0.01	0.02	0.15	0.02	0.01	0.21	0.843

* Revoques cementicios

transmitancia térmica para cada nivel de confort son los siguientes:

- Nivel A: 0.38 W/m²K
- Nivel B: 1.00 W/m²K
- Nivel C: 1.85 W/m²K

En función de los valores del coeficiente de transmitancia térmica determinados en la Tabla 3 para diferentes paquetes constructivos de tierra, a fin de cumplimentar con el nivel de confort higrotérmico B –nivel mínimo solicitado por la Secretaría de Vivienda (Arg.)–, la alternativa más adecuada es el muro de quincha revocado, el que, con un espesor total de 21 cm, presenta un K de 0.675 W/m²K.

En el caso de emplear muros de adobe de 30 cm, con revoques gruesos y finos sobre ambas caras, puede alcanzarse el nivel de confort B (0.972 W/m²K) con un espesor total de muro de 36 cm. Por su parte, para alcanzar este nivel de confort con un muro de BTC, la mejor alternativa es utilizar muros dobles (25 + 12 cm) con una cámara de aire interior de 4 cm y revoques únicamente en la cara exterior del muro, generándose un muro cuyo espesor final es de 44 cm, lo cual corresponde a una práctica habitual en la región (Dorado et al., 2022). Finalmente, empleando la técnica de tapia a la vista (solo con revoque fino interior), deben emplearse muros de 56 cm de espesor para alcanzar el nivel de confort B.

A pesar de los elevados espesores de los muros de adobe, BTC y tapia requeridos para alcanzar el nivel de confort B, debe considerarse que, tal como se muestra en la Tabla 4, con excepción de los muros construidos con ladrillos huecos y bloques de hormigón celular, ninguno de los paquetes constructivos denominados “tradicionales” alcanza este nivel de aislamiento sin la utilización de cámaras de aire y espesores totales de muro superiores a 50 cm.

CONCLUSIONES

La evaluación de los resultados obtenidos en esta investigación permite concluir lo siguiente:

- Existe una correlación directa entre el coeficiente de conductividad térmica y la densidad aparente de los elementos constructivos confeccionados con tierra, arena y fibra vegetal del centro-este de la provincia de Santa Fe. Esto coincide con lo informado por diferentes investigadores del contexto nacional e internacional.
- La técnica de construcción con tierra con mayor capacidad de aislamiento térmico es la quincha, cumpliendo los requerimientos estipulados por la normativa argentina vigente, con un paquete

de 21 cm de espesor.

- Para espesores de muros inferiores a 40 cm, entre los paquetes constructivos propuestos en la Tabla 3, los muros de adobe (36 cm) presentan, después de la quincha (21 cm), el mejor nivel de aislamiento térmico, seguidos por los muros de tapia (36 cm) y finalmente los de BTC (31 cm).
- Las técnicas de construcción con tierra presentan en todos los casos un mejor desempeño térmico que los tradicionales muros de ladrillo cerámico macizo o bloques de hormigón, requiriéndose menores espesores para lograr iguales niveles de aislamiento térmico.

Finalmente, puede indicarse que el principal aporte de esta investigación es el fortalecimiento de políticas públicas que buscan incentivar la eficiencia energética en las viviendas argentinas, como es el caso del Programa Nacional de Etiquetado de Viviendas, implementado en el año 2023, en cuya base de datos no se encuentra disponible la opción de emplear muros construidos con elementos de tierra en las envolventes. Esta situación es motivada principalmente por la escasez de datos técnicos confiables sobre las propiedades térmicas de los elementos constructivos de tierra producidos con materiales locales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Balter, J., Ganem, C., & Barea, G. (2020). Mejoras en el desempeño energético de edificios en verano mediante la integración de envolventes ventiladas en fachadas norte y cubiertas. El caso de Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 10(2), 94–105. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.02.07>
- Cabrera Córdoba, C. (2019). Transmitancia Térmica de Sistemas Constructivos en Tierra [Universidad de Azuay]. In *Proyecto Final de Arquitectura*. Recuperado de: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/9268>
- Cabrera, S., Elert, K., Guillarducci, A., & Margasin, A. (2022). The effect of local pozzolans and lime additions on the mineralogical, physical and mechanical properties of compressed earth blocks in Argentina. *Revista de La Construcción*, 21(2), 248–263. DOI: <https://doi.org/10.7764/RDLC.21.2.248>
- Cagnon, H., Aubert, J. E., Coutand, C., & Magniont, C. (2014). Hygrothermal properties of earth bricks. *Energy and Buildings*, 80, 208–217. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.05.024>
- Costantini Romero, B., & Francisca, F. (2022). Construcción con bloques de suelo cemento como alternativa sostenible para envoltorio edilicia. *Hábitat Sustentable*, 12, 114–125. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.08>

Costantini Romero, B., Francisca, F., & Giomi, I. (2021). Hygrothermal properties of soil-cement construction materials. *Construction and Building Materials*, 313(October), 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125518>

Cuitiño, M. G., Esteves, A., Maldonado, G., & Rotondaro, R. (2015). Análisis de la transmitancia térmica y resistencia al impacto de los muros de quincha. *Informes de La Construcción*, 67(537). DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.12.082>

Cuitiño, M. G., Rotondaro, R., & Esteves, A. (2020). Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. *Revista de Arquitectura*, 22(1), 138–151. Recuperado de: <https://editorial.ucatolica.edu.co/index.php/RevArq/article/view/2348>

Dorado, P., Cabrera, S., & Rolón, G. (2022). Contemporary difficulties and challenges for the implementation and development of compressed earth block building technology in Argentina. *Journal of Building Engineering*, 46, 103748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103748>

El Fgaier, F., Lafhaj, Z., Chapiseau, C., & Antczak, E. (2016). Effect of sorption capacity on thermo-mechanical properties of unfired clay bricks. *Journal of Building Engineering*, 6, 86–92. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.02.011>

Esteves, J. M. & Cuitiño, M. G. (2020). El sistema constructivo de la quincha en zonas rurales del Norte de Mendoza (Argentina). *Estoa*, 9(17), 93–102. DOI: <https://doi.org/10.18537/est.v009.n017.a08>

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*. RILEM. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-83297-1>

Fernandes, J., Peixoto, M., Mateus, R. & Gervásio, H. (2019). Life cycle analysis of environmental impacts of earthen materials in the Portuguese context: Rammed earth and compressed earth blocks. *Journal of Cleaner Production*, 241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118286>

IRAM (2002). Norma IRAM 1860: *Materiales aislantes térmicos. Método de ensayo de las propiedades de transmisión térmica en régimen estacionario, mediante el aparato de medición del flujo de calor*.

IRAM (2010). Norma IRAM 11601: *Aislamiento térmico de edificios. Métodos de cálculo. Propiedades térmicas de los componentes y elementos de construcción en régimen estacionario*.

IRAM (2010). Norma IRAM 11605: *Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos de transmitancia térmica en cerramientos opacos*.

IRAM (2012). Norma IRAM 11603: *Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina*.

IRAM (2017). Norma IRAM 11900: *Prestaciones energéticas en viviendas. Método de cálculo y etiquetado de eficiencia energética*.

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 and Buildings*, 178, 265–278. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>

Millard, P., & Aubert, J. E. (2014). Effects of the anisotropy of extruded earth bricks on their hygrothermal properties. *Construction and Building Materials*, 63, 56–61. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.001>

Minke, G. (2005). *Manual de construcción en tierra. La tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. Fin de siglo.

Mosquera Arancibia, P. (2013). *Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida*. [Tesis de doctorado inédita] Universidad Politécnica de Madrid.

Navacerrada, M. Á., De la Prida, D., Sesmero, A., Pedrero, A., Gómez, T., & Fernández-Morales, P. (2021). Comportamiento acústico y térmico de materiales basados en fibras naturales para la eficiencia energética en edificación. *Informes de La Construcción*, 73(561), e373. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic74558>

Ouedraogo, K. A. J., Aubert, J.-E. E., Tribout, C., Escadeillas, G. & Escadeillas, G. (2020). Is stabilization of earth bricks using low cement or lime contents relevant? *Construction and Building Materials*, 236, 117578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117578>

Pacheco-Torgal, F. & Jalali, S. (2012). Earth construction: Lessons from the past for future eco-efficient construction. *Construction and Building Materials*, 29, 512–519. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.054>

Rotondaro, R. (2018). Construir con tierra: Tecnología y arquitectura del siglo XX. *Notas CPAU*. Recuperado de: <https://www.revistanotas.org/revistas/41/2295-construir-con-tierra-tecnologia-y-arquitectura-del-siglo-xxi>

Saidi, M., Soukaina, C., Belkacem, Z., & Seidiki, E. (2018). Stabilization effects on the thermal conductivity and sorption behavior of earth bricks. *Construction and Building Materials*, 167, 566–577. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.063>

Tepale Gamboa, B. A. (2016). *La tierra vertida compactada como sistema tecnificado para la autoconstrucción de vivienda en zonas rurales* [Universidad Nacional Autónoma de México]. Recuperado de: <https://repositorio.unam.mx/contenidos/76043>

Volhard, F. (2016). *Construire en terre allegee*. Acte Sud - Craterre.

Wieser, M., Onnis, S., & Meli, G. (2018). Conductividad térmica de la tierra alivianada con fibras naturales en paneles de quincha. In R. PROTERRA (Ed.), *Actas del 18° Seminario Iberoamericano de Arquitectura y Construcción con Tierra* (pp. 1–10). Recuperado de: <https://files.pucp.edu.pe/facultad/arquitectura/2019/11/27173426/2018-SIACOT-Wieser-Onnis-Meli.pdf>

SUSTENTABILIDAD EN EL MERCADO VIRTUAL BRASILEÑO DE LAS VIVIENDAS DE MADERA PROCESADA

SUSTAINABILITY IN THE BRAZILIAN TIMBER HOUSING VIRTUAL MARKET

SUSTENTABILIDADE NO MERCADO VIRTUAL BRASILEIRO DE CASAS DE MADEIRA

Victor Almeida-De Araujo

Ingeniería Civil
Universidad Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-2747-4738>
engim.victor@yahoo.de

Juliano Souza-Vasconcelos

Ingeniería Civil
Universidad Estatal de São Paulo, Botucatu, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-3305-0384>
julianojsv@gmail.com

Sheyla Mara Baptista-Serra

Ingeniería Civil
Universidad Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-9508-976X>
sheylabs@ufscar.br

José Carlos Paliari

Ingeniería Civil
Universidad Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-2964-8551>
jpaliari@ufscar.br

André Luis Christoforo

Ingeniería Civil
Universidad Federal de São Carlos, São Carlos, Brasil
<https://orcid.org/0000-0002-4066-080X>
alchristoforo@ufscar.br



RESUMEN

Las viviendas de madera procesada son sustentables y basadas en biorecursos, siendo una alternativa a la construcción tradicional de albañilería y acero y estudios recientes han demostrado que este sector, en Brasil, cuenta con cientos de pequeñas y medianas empresas dedicadas a este tipo de vivienda. Este estudio exploratorio, a la vez que analizó esta población, evaluó los perfiles disponibles en Instagram®, observando sus estrategias de negocio y lo que revelan a sus clientes sobre los beneficios en cuanto a sustentabilidad y asuntos relacionados a esta. Todos los perfiles corporativos disponibles fueron estudiados y se compiló una muestra significativa de alrededor del 80% de un sector, desde un mercado actualmente compuesto por más de 400 empresas. Sin embargo, alrededor del 70% de estas empresas brasileñas aún no exploran adecuadamente los temas de sustentabilidad de sus productos y servicios de viviendas de madera, lo que evidencia un escenario incipiente. Además, existe una clara oportunidad para aprovecharse de los argumentos publicados en sus perfiles de Instagram® como una estrategia de concientización afirmativa. Aunque se sugirieron algunas justificaciones para convencer a los clientes nacionales para considerar las viviendas de madera, este mercado virtual puede mejorar sustantivamente.

Palabras clave

industria de la construcción, estructuras de madera, estudios de mercado, sustentabilidad

ABSTRACT

Timber housing is a sustainable bioresource-based alternative to traditional construction with masonry and steel, and recent studies have shown that this sector in Brazil has hundreds of timber housing SMEs. This exploratory study, while analyzing this population, evaluated the profiles available on Instagram®, observing their business strategies and what they have disclosed to clients on sustainability benefits and issues. All the available corporate profiles were surveyed, and a significant sample of about 80% of a sector was compiled, from a market currently formed by over 400 companies. However, about 70% of these Brazilian companies still do not adequately explore sustainability issues in their timber housing products and service, evidencing an incipient scenario. Moreover, there is a clear opportunity to leverage the arguments posted on their Instagram® profiles as an affirmative awareness strategy. Although some justifications were suggested to convince domestic customers to consider timber housing, this virtual market has a lot of room for improvement.

Keywords

construction industry, wood structures, market studies, sustainability

RESUMO

As casas de madeira são uma alternativa sustentável e baseada em biorrecursos à construção tradicional com alvenaria e aço. Estudos recentes mostram que esse setor no Brasil é representado por centenas de PMEs focadas em casas de madeira. Este estudo exploratório analisou essa população por meio de uma avaliação dos perfis disponíveis na rede social Instagram®, observando suas estratégias de negócios e o que divulgavam aos clientes sobre benefícios e questões relativas à sustentabilidade. Todos os perfis corporativos disponíveis foram pesquisados e uma amostra significativa de cerca de 80% do setor foi compilada, em um mercado atualmente formado por mais de 400 empresas. No entanto, cerca de 70% dessas empresas brasileiras ainda não exploram adequadamente as questões da sustentabilidade em seus produtos e serviços de habitação de madeira, evidenciando um cenário incipiente. Além disso, existe uma clara oportunidade para aproveitar os argumentos publicados em seus perfis do Instagram® como uma estratégia afirmativa de conscientização. Embora algumas justificativas tenham sido sugeridas para convencer os clientes domésticos a considerarem a habitação de madeira, ainda resta muito espaço para melhorias nesse mercado virtual.

Palavras-chave

setor da construção, estruturas de madeira, estudos de mercado, sustentabilidade

INTRODUCCIÓN

A medida que muchas personas alrededor del mundo se preguntan acerca de las pocas soluciones racionalizadas que hay en el mercado, y que buscan nuevas respuestas sustentables, existe una forma integral que ha favorecido el desarrollo de aportes para promover alternativas amigables con el medioambiente.

En este contexto, la madera se podría usar en productos más verdes, para proporcionar un estilo de vida sustentable. Por ejemplo, Maldonado et al. (2020) sugirieron que la madera podría impulsar el desarrollo laboral y los ingresos para pequeñas y medianas empresas. Las ventajas de la madera procesada que se usa en la construcción también han sido demostradas ampliamente en investigaciones, por ejemplo, en el caso del menor consumo energético y las menores emisiones de carbono que tienen las edificaciones de madera procesada en comparación con los de albañilería, como lo verificaron Gustavsson y Sathre (2006) y Oliver et al. (2014); el uso más eficiente de los recursos en el contexto de sustentabilidad de la madera procesada versus la albañilería, como lo estudiaron Svajlenka y Kozlovská (2018); la eficiencia en la calefacción que tienen las edificaciones de madera, según lo medido por Svajlenka y Kozlovská (2020a); las soluciones de madera como opciones con una menor emisión de carbono en su ciclo de vida, como lo mencionan Hart y Pomponi (2020); los múltiples usos de las especies forestales y la fijación eficiente del carbono en diferentes técnicas de construcción que usan madera, como lo identificó De Araujo et al. (2020b); además de otros aportes. Sin embargo, Heräjärvi (2019) sugiere que la comercialización de la construcción con madera procesada puede ser falaz específicamente cuando se describe como una herramienta efectiva para mitigar el cambio climático, ya que los efectos de reemplazar los recursos tradicionales multiplican los resultados para las reservas físicas de carbono. Heilmayr et al. (2020) advierten que el mal uso de los subsidios forestales menoscaba el mayor almacenamiento de carbono y los objetivos de biodiversidad. Así, las políticas deberían abordar la protección de los bosques nativos junto con las plantaciones, que se ven debilitados cuando las soluciones populares se siguen basando en recursos no renovables, como los minerales.

Por ende, la madera es el único material de construcción ampliamente utilizado que se puede considerar como una solución verdaderamente sustentable (Ramage et al., 2017) para los productos de madera procesada (De Araujo et al., 2022b). Como ya lo han comprobado los expertos, esta visión coincide con la evidencia de que este biorrecurso ofrece credenciales superiores ante otros materiales de construcción (Wang et al., 2014), donde las edificaciones de madera procesada aseguran un mejor futuro con menos peligros (Heräjärvi, 2019).

Con la excepción de algunos países del hemisferio norte, el modelo de viviendas de madera procesada está en una etapa incipiente. Sin embargo, esta solución está latente en el resto del mundo, específicamente cuando se le compara con la albañilería. Aún así, muchos países están buscando agregar las viviendas de madera procesada como una solución de construcción moderna. En estos territorios, que están más conectados con un movimiento espontáneo hacia la transición del consumo, la industria maderera podría convertirse en un

protagonista real debido a su procesamiento con niveles más altos de prefabricación, el uso de recursos renovables y la racionalidad de los insumos de producción, así como una menor contaminación ambiental. Las ventajas de las bajas emisiones de carbono derivadas del sector forestal, identificadas por Fujii y Managi (2013), y de la construcción sustentable con madera procesada hecha en las plantas industriales analizadas por Svajlenka y Kozlovská (2020b) suman a esta perspectiva. Fujii y Managi (2013) confirmaron que la industria forestal, especialmente la de productos y la construcción, es más ecológica que la de los sectores alimentario, del tabaco, la petroquímica, la minería, la metalurgia y el transporte.

Incluso sin un plan gubernamental para promover las viviendas de madera procesada y su industria de forma efectiva, Brasil se encuentra adelantado en comparación con muchos otros países. Por ejemplo, Brasil actualmente cuenta con múltiples recursos forestales disponibles (IBÁ, 2020; Rabelo et al., 2020), usa numerosas especies nativas y exóticas en la construcción con madera (De Araujo et al., 2021a), tiene decenas de grandes parques industriales para un sector doméstico formado por cientos de fabricantes de viviendas compactas de madera procesada (De Araujo et al., 2021b), cuenta con mercados domésticos y extranjeros para las viviendas de madera procesada (De Araujo et al., 2020a) y, entre estos últimos, hay mercados que reciben los bienes certificados derivados de prácticas sustentables (Lima, 2017; Meijueiro et al., 2020; Ribeiro, 2020). A pesar de los factores positivos, la deforestación ilegal sigue siendo un problema doméstico, como lo confirmaron Leite-Filho et al. (2021). También existe una falta aparente de incentivos para usar madera con certificación sustentable, como lo citan Romero et al. (2015) y De Araujo et al. (2021a). Sin embargo, hay pocos estudios estándar sobre el mercado de las viviendas de madera procesada y fueron hechos sólo en las últimas dos décadas, por ejemplo, Wahl (2008), Morgado y Pedro (2011), Wherry y Buehlmann (2014), Hurmekoski et al. (2015), Moore (2015), Egan Consulting (2017), Koppelhuber et al. (2017), Shigue (2018), De Araujo et al. (2020a), Ahmed (2021), MBIE (2021) y Garay-Moena et al. (2022). Lamentablemente, estos aportes no pudieron abordar temas contemporáneos, como los espacios y las plataformas virtuales, que se usan para divulgar aspectos socioeconómicos y medioambientales. A pesar de esto, en un estudio reciente de De Araujo et al. (2022a), que abordó el mercado electrónico de las viviendas de madera procesada, las empresas estudiadas compartían la misma información gráfica y textual básica. Sin embargo, el comercio electrónico no se pudo confirmar debido a una falta de fijación de precio del producto.

El propósito de este estudio sectorial priorizó la investigación sobre la estrategia de negocios y la divulgación de información a los clientes en relación con los enfoques de sustentabilidad, en el contexto de las viviendas de madera procesada producidas o comercializadas por empresas especializadas en la construcción con madera procesada en Brasil. Usando los perfiles de Instagram® de cada fabricante doméstico, se analizó un escenario sectorial para verificar falencias, a través de una falta de limitaciones de los contenidos sustentables de las viviendas de madera procesada en los perfiles corporativos de las empresas muestreadas. Se propusieron sugerencias afirmativas para incluir, mejorar y reforzar el contenido usando argumentos basados en la literatura y en las opiniones de los autores,

para respaldar y complementar las posibles estrategias para el sector brasileño de viviendas de madera procesada.

METODOLOGÍA

Debido a las restricciones impuestas por la pandemia del Covid-19 a nivel mundial, los estudios científicos tradicionales y las actividades comerciales sufrieron de contratiempos repetidos impuestos por esta crisis global. Como resultado, se han intensificado las actividades virtuales, convirtiéndose en un excelente recurso para la innovación en la investigación. En el contexto de las viviendas de madera procesada, los métodos virtuales han sido utilizados eficientemente por De Araujo et al. (2019), De Araujo et al. (2021a) y De Araujo et al. (2021b). Con este escenario, se investigó la sustentabilidad en los perfiles corporativos de los productores y vendedores de viviendas de madera procesada en Brasil, disponibles de forma virtual en Instagram®. Debido a que Instagram® se usó para comercializar bienes, el objetivo fue evaluar los perfiles activos.

Este estudio exploratorio comenzó con la identificación de las empresas usando los términos de búsqueda que aparecen en la Tabla 1 (con sus respectivos plurales). La búsqueda se realizó usando términos en portugués brasileño en el motor de búsqueda de la plataforma de Instagram®. El conocimiento del investigador principal sobre el sector de la construcción con madera procesada en Brasil, derivado de estudios científicos previos sobre el tema, fue vital para este proceso. La búsqueda concluyó cuando ya no se encontraron

perfiles inéditos en los resultados del motor de búsqueda para las consultas individualizadas. En este proceso, se omitieron los perfiles repetidos. Además, después de una investigación detallada del contenido y las publicaciones de cada perfil, se descartaron aquellas empresas fuera del tema estudiado al tener objetivos que quedaban fuera del alcance de este estudio. Estas empresas incluyeron el arriendo de viviendas de madera procesada para vacaciones, los hoteles construidos con madera procesada y los entusiastas y fanáticos de los productos de madera, así como los especialistas en construcción que usaron materiales no derivados de la madera.

El método se basó en una replicación y actualización de la investigación del comercio electrónico y de las ventas virtuales, hecha por De Araujo et al. (2022a). El investigador principal confirmó la ausencia de algunas empresas en el nuevo listado de perfiles. Estos perfiles faltantes se buscaron individualmente usando sus nombres corporativos, ya que una lista anterior liderada por De Araujo et al. (2021b) no reveló información ni identificó los perfiles de Instagram®. Algunos perfiles no investigados anteriormente se encontraron en base a nuevas búsquedas usando sus nombres, lo que permitió poner sus nuevos perfiles en la lista. Varias empresas de la lista anterior no se encontraron en Instagram®, lo que sugirió que no cuentan con un perfil en esta red social.

En la práctica, las búsquedas basadas en términos dieron resultados aleatorios. Después de tres meses, la lista de perfiles se volvió a revisar usando señales de actividades y de contenido publicado, para confirmar que todas las

Tabla 1: Términos de búsqueda usados en la identificación de la empresa y el término respectivo en español. Fuente: Preparado y traducido por los autores.

Término de búsqueda en portugués brasileño	Término de búsqueda traducido al español
Habitacão em madeira	Habitación de madera procesada
Casa de madeira	Vivienda de madera procesada
Construção em madeira	Construcción con madera procesada
Casa pré-fabricada em madeira	Casa prefabricada de madera procesada
Construção sustentável em madeira	Construcción sustentable con madera procesada
Construção verde em madeira	Construcción ecológica en madera procesada
Madeira pré-fabricada	Madera procesada prefabricada
Kit pré-fabricado	Kit prefabricado
Construção seca em madeira	Construcción en madera procesada seca
Construção modular	Construcción modular
Casa modular	Casa modular
Madeira lamelada colada cruzada	Madera procesada laminada cruzada
Casa de toras	Casa de troncos
Enxaimel	Marco de entramado de madera procesada
Tábua e mata-junta	Tablas de madera y revestimientos
Casa náutica	Casa náutica
Chalé	Chalet (casa en A)

Tabla 2: Asuntos y aspectos evaluados en este estudio sectorial exploratorio. Fuente: Preparado por los autores.

Asunto	Justificación	Alternativa
Asunto 1: investigar la existencia de publicaciones sobre la sustentabilidad	Entender si es que las empresas usan los temas de la sustentabilidad para los productos y servicios	Sí No
Asunto 2: investigar los tipos de temas contenidos en las publicaciones con relación directa con la sustentabilidad y sus argumentos principales	Entender todos los argumentos usados en los contenidos publicados sobre la sustentabilidad relacionados con sus bienes y servicios	Producto sustentable; Certificaciones y sellos; Conciencia medioambiental; Mayor limpieza y menor generación de residuos; Mayor fijación de carbono en materiales de madera; Menos emisiones de carbono derivadas de la producción; Mayor producción y eficiencia de tiempo; Materiales ecológicos y renovables

Tabla 3: Población sectorial y de muestreo obtenida en este estudio sectorial exploratorio. Fuente: De Araujo et al. (2022a).

Población de empresas	Volumen unitario (Empresas)	Porcentaje del sector (%)	Margen de error (%)
Sector en general	402	100	-
Sin perfiles	87	22	-
Con perfiles	315	78	-
Muestreo	315	78	2,57%

empresas estaban funcionando. Después de esta validación, los perfiles y la información se incluyeron en una base de datos construida en Microsoft Excel 2010.

La segunda etapa involucró la recopilación de perfiles para formar la lista regular, permitiendo el muestreo efectivo. Todos los perfiles se evaluaron para obtener un muestreo significativo. Luego, se calculó el margen de error considerando la población total del sector, que incluyó a las empresas con perfiles corporativos en Instagram® y a las que no tienen ningún perfil en esta red social. Se usó el software estadístico desarrollado por Raosoft (2004), así como sus prescripciones de 50% de distribución de respuestas y de 95% de nivel de confianza. Junto con este método, se ingresaron tanto la población total como la población muestreada, para verificar el margen de error de este estudio.

La tercera etapa estuvo marcada por la definición, justificación y evaluación de los asuntos presentados en la Tabla 2, tanto para identificar la presencia de la sustentabilidad como para definir asuntos sobre este tema en las publicaciones disponibles en cada perfil corporativo. Fue posible analizar el panorama en este contexto bajo evaluación. Mientras que el primer asunto fue dicotómico y se basó en la ausencia o presencia de publicaciones sobre la sustentabilidad, el segundo consideró múltiples respuestas con uno o más contenidos diferentes abordados en estas publicaciones (Tabla 2). Como resultado de los diferentes contenidos, para el asunto 1 la cuantificación de las alternativas fue binaria, con la presencia o ausencia de cada alternativa estudiada por asunto. Mientras tanto, para el asunto 2, se contó la cantidad de argumentos sobre la sustentabilidad publicados por cada perfil corporativo, para identificar la frecuencia de los contenidos usados para

enfatar los vocativos sustentables de los productos y servicios divulgados. En cuanto a los enfoques relacionados con el segundo asunto, se hicieron análisis para revelar rutas afirmativas para explorar cada alternativa estudiada. La parte final propuso estrategias afirmativas para el comercio electrónico a través de Instagram® y aclaró temas a los clientes sobre el potencial de las casas de madera procesada en el contexto de la sustentabilidad.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A mediados de 2020, De Araujo et al. (2021b) reportaron un sector brasileño compuesto por 378 empresas dedicadas explícitamente a la producción de viviendas de madera procesada y su mercado. A finales de 2020, esta lista sectorial necesitó de una actualización ya que la grave pandemia había devastado a todas las economías mundiales y porque, por ejemplo, Bartik et al. (2020), Chen et al. (2021), Egger et al. (2021), Iqbal et al. (2021), Verschuur et al. (2021) y otros habían confirmado muchos escenarios negativos. Debido a lo difícil del momento, se esperaba que las empresas que estaban funcionando cayeran para fines de 2021. Sin embargo, esta actualización confirmó un aumento de 6,35% en el volumen del sector (Tabla 3).

A través de búsquedas sistematizadas usando el motor de búsqueda de Instagram®, se encontraron 301 perfiles de empresas de viviendas de madera procesada, usando los términos de la Tabla 1. Estos perfiles incluyeron a 14 nuevas empresas, además de las 378 empresas enumeradas anteriormente. Hubo una recuperación potencial de diez nuevas empresas durante

el análisis, aunque ninguno de estos nombres ni ubicaciones contaba con un hipervínculo a un perfil activo de Instagram®. Así, con estas 24 empresas adicionales, la población del sector aumentó de 378 a 402 en 2022. Ya que solo 301 empresas se identificaron de entre esas 378 empresas del listado anterior, los nombres de las otras 77 empresas que no se encontraron mediante las búsquedas de términos también se ingresaron al motor de búsqueda de Instagram®. Al usar esta búsqueda alternativa, se identificaron otros 14 perfiles que no aparecieron anteriormente, expandiendo la lista actual a 315 empresas con perfiles.

Después de hecho esto, se creó un ranking con todas las empresas de acuerdo a la disponibilidad, o no, de sus perfiles en Instagram®. El ranking descartó a las empresas que no tienen perfiles oficiales activos, ya que es imposible analizar algo que no existe. El estudio sectorial apuntó a los perfiles disponibles, obteniendo un margen de error para el sector nacional que incluyó, también, a empresas del sector que no tenían perfiles disponibles (Tabla 3).

Desde el estudio sectorial (Tabla 3), el muestreo consideró una fracción significativa de cerca de 4/5 del sector brasileño de viviendas de madera procesada. Esto representó al 100% de los productores y vendedores de viviendas de madera procesada que tenían perfiles corporativos en Instagram®.

Este muestreo dio cuenta de una alta representación de este sector estudiado (Tabla 3). Con el uso de la prescripción estándar de $\pm 2,5\%$ para un nivel ideal, siguiendo lo expuesto por Pinheiro et al. (2011), la muestra coincide con su recomendación estadística ya que el margen de error obtenido en este estudio fue de cerca de $\pm 1,28\%$ (o $2,57\%$) como se confirma en la Tabla 3, lo que entrega un análisis altamente confiable tanto para la población con perfiles corporativos como para el sector completo, incluyendo a aquellas empresas que no tenían perfiles en esta plataforma virtual.

Se realizó la consulta inicial sobre la presencia de temas sobre sustentabilidad en publicaciones de Instagram® en aquellos perfiles del sector brasileño de viviendas de madera procesada (Tabla 2). Desde la muestra representativa (Tabla 3), los resultados más altos prueban la baja exploración en temas de sustentabilidad en el espacio virtual de parte de las empresas dedicadas a la producción y la comercialización de viviendas de madera procesada en Brasil (Figura 1).

La presencia de publicaciones sobre los niveles de sustentabilidad de los productos y servicios en las empresas muestreadas refleja un comportamiento ya producido por parte de un grupo de corporaciones que buscan aclarar y hacer que los potenciales clientes tomen consciencia sobre las ventajas y las características de las viviendas de madera procesada, como una opción de construcción más ecológica. Sin embargo, una cantidad importante de los perfiles aún no han realizado publicaciones sobre los aspectos sustentables de los productos y servicios relacionados con las viviendas de madera procesada (Figura 1). Los resultados resaltan los potenciales temas de sustentabilidad que se estudiarán. Además de la conservación y la protección medioambiental, Rattner (1999) mencionó que la sustentabilidad requiere eficiencia económica, democracia política, igualdad social y diversidad cultural. Esta visión forma los preceptos de la gobernanza medioambiental-social-corporativa. En este sentido, las empresas brasileñas aún necesitan valorar el potencial de sus soluciones y, si fuera necesario, adaptar

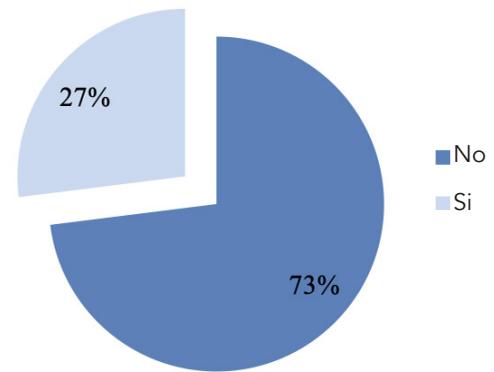


Figura 1: Presencia de publicaciones sobre la sustentabilidad en los perfiles corporativos (n=315). Fuente: Preparación por los autores.

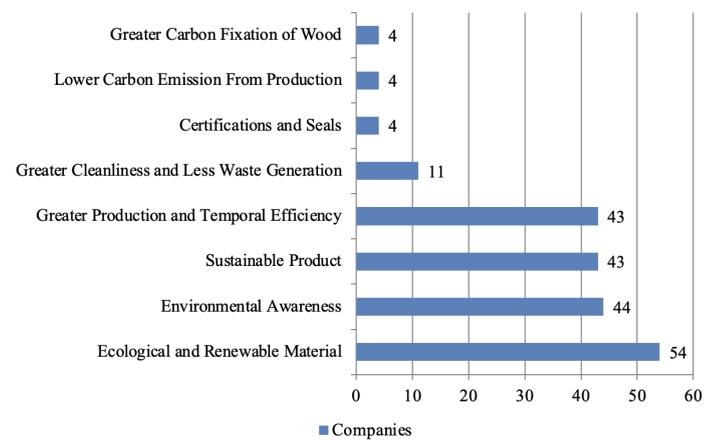


Figura 2: Tipos de temas abordados en los contenidos publicados sobre la sustentabilidad (n = 315). Fuente: Preparación por los autores.

sus actividades para garantizar más viviendas sustentables de madera procesada.

Desde los perfiles corporativos clasificados positivamente en el primer asunto sobre sustentabilidad (Tabla 2), el segundo asunto identificó todos los temas encontrados en las publicaciones disponibles. Según lo evidenciado en la Figura 2, se identificaron ocho problemas de sustentabilidad por parte de las empresas muestreadas, aunque otros problemas correlacionados no se confirmaron.

El "material ecológico y renovable" fue el argumento más utilizado por más del 17% de la población muestreada, para enfatizar los propósitos sustentables de los productos y servicios relacionados con las viviendas de madera procesada (Figura 2). Se espera que este sector use más este argumento en el futuro, ya que los materiales basados en la silvicultura están dentro de los recursos más requeridos tanto por las industrias forestales brasileñas, como lo menciona IBÁ (2020), y por más de tres cuartos del sector de viviendas de madera procesada, según el escenario comprobado por De Araujo et al. (2021a). Además, Ramage et al. (2017) sugirieron que la madera de coníferas representa una opción atractiva para edificaciones eficientemente sustentables. Prácticamente un 14% de los perfiles tuvieron publicaciones en busca de desarrollar la "consciencia medioambiental" entre sus clientes (Figura 2).

Tabla 4: Análisis corporativo por cantidad de argumentos sustentables (n = 315). Fuente: Preparación por los autores.

Cantidad	Argumentos							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Empresas	25	24	22	7	4	1	2	0

Incluyeron una aclaración sobre el consumo de madera de origen legal, de madera nativa de bosques con planes de manejo, de madera proveniente de la silvicultura legal, de silvicultura lejana a áreas nativas protegidas, la preservación de la biomasa y los ecosistemas, los peligros de los incendios forestales y la producción de productos forestales diferentes a la madera procesada que vienen de bosques producidos o manejados por las empresas.

Para enfatizar un aspecto esencial de la producción para los clientes, “una mayor producción y eficiencia temporal” se confirmó en más del 13% de las muestras (Figura 3). Los argumentos que se explorarán en este tema son considerables, porque la producción rápida es un atributo productivo positivo de la construcción de madera procesada, como lo menciona De Araujo et al. (2016) ya que el tiempo de conclusión en la construcción civil está estrictamente relacionado con mayores costos y retrasos en la conclusión, según lo evaluado por Singh (2010), Larsen et al. (2016), Senouci et al. (2016), Bauer et al. (2017), Chandragiri et al. (2021) y otros.

Se notó una participación equitativa para las empresas que mencionaron que vendían un “producto sustentable” (Figura 2). A pesar de esto, sigue habiendo una demanda por una mayor consciencia, de parte de los desarrolladores, de los beneficios medioambientales de sus productos. La aclaración podría considerar los argumentos hechos por De Araujo et al. (2016), Ramage et al. (2017), Heräjärvi (2019), Svajlenka y Kozlovská (2020b) y otros estudios.

Más del 3% del público muestreado ya usa una “mayor limpieza y menor generación de residuos” en sus productos y servicios, a modo de justificación sustentable. Este ítem está de acuerdo con los estudios de Yazdi et al. (2014), que sugieren que los fabricantes de material están cambiando sus preocupaciones para producir materiales de recursos renovables, considerando el uso de flujos de agua residual y, consecuentemente, una menor generación de residuos. Así, los gobiernos, en conjunto con las industrias, pueden desarrollar mercados para bienes manufacturados con menos madera y subproductos lignocelulósicos, mientras se eliminan incentivos para sectores alimentados por la quema de madera (Pomponi et al., 2020).

Individualmente, alrededor del 1% de la muestra destaca una “mayor fijación de carbono de la madera”, una “menor emisión de carbono desde la producción y las “certificaciones y sellos” para otros argumentos oportunos para una mayor sustentabilidad de sus productos y servicios en Brasil. Estos argumentos se podrían explicar mejor debido a las numerosas ventajas de los recursos madereros. Por ejemplo, Burnard et al. (2017) mencionaron que los recursos derivados de la madera sólida con menos niveles de procesamiento (por ej., madera cortada y madera maquinada) son más naturales que otras soluciones contemporáneas con

mayores niveles de manufactura (por ej., vigas laminadas y tableros compuestos); mientras que el uso de resinas y aditivos químicos en la producción de productos de madera elaborada hace que estas soluciones encoladas sean menos sustentables si se comparan con productos basados en la madera sólida. En el mismo sentido, Yazdi et al. (2014) mencionó que un edificio saludable debe tener cero energía incorporada para minimizar los impactos medioambientales de las emisiones de carbono y, por ende, para cumplir satisfactoriamente los principios de sustentabilidad.

Considerando el análisis de los tipos de argumentos utilizados por las empresas en sus publicaciones en perfiles corporativos (Figura 2), hubo una cuantificación de la cantidad de empresas muestreadas según la cantidad de argumentos compartidos en sus publicaciones. 85 empresas declararon uno o más argumentos sobre la sustentabilidad de sus productos y servicios (Figura 1). Gran parte de esta población usó pocos argumentos ante los clientes (Tabla 4), por ejemplo, 29% con un argumento, 28% con dos argumentos y 26% con tres. Secuencialmente, 8% de las empresas mostró cuatro argumentos, 5% tenía cinco argumentos, 1% tenía seis argumentos y 2% tenía siete argumentos.

Existe una buena oportunidad que este sector puede explorar, usando más argumentos para darle a los clientes una aclaración en relación con el potencial y la ventaja de sus productos y servicios (Tabla 4), tanto de aquellos temas enumerados en la Figura 2 como de otros argumentos ausentes. Esta estrategia debería ser clara y asertiva, ya que Wang et al. (2014) verificó que los usuarios finales, usualmente no familiarizados con productos de madera, han mostrado tener prejuicios visibles relacionados con la madera que se usa para la construcción.

Estratégicamente, Viholainen et al. (2021) sugirió que la necesidad de tener un enfoque más fino del ecosistema del negocio para ofrecer una reversión de la mentalidad, para desarrollar una lógica orientada a la sustentabilidad, en línea con los negocios rentables y la creación de valor para clientes en la construcción. Las empresas podrían considerar los indicadores de sustentabilidad propuesta por Garay et al. (2021), como la estrategia correcta para enfatizar las viviendas de madera procesada bajo descripciones sustentables.

Los autores de este estudio sugieren argumentos adicionales para apoyar una promoción y especificación efectivas de las características sustentables de las viviendas de madera procesada:

- Menos energía incorporada y carbono de los productos basados en madera procesada, comparados con los productos minerales, como lo ejemplifica Hammond y Jones (2008) y Oliver et al. (2014);

- El consumo eficiente de energía desde la producción al procesamiento de la madera, especialmente desde el uso de máquinas de baja potencia, como lo verificó Wargula et al. (2022);
- Múltiples productos basados en madera y especies diversificadas de madera aptas como insumos de construcción, como los de las listas hechas por De Araujo et al. (2020b) y De Araujo et al. (2021a);
- Virtualmente ningún consumo de agua en los edificios basados en madera procesada, como lo menciona De Araujo et al. (2016);
- Menos calefacción interior para mantener el confort térmico de los usuarios, como lo determinaron Svajlenka y Kozlovská (2020a);
- Obras de construcción limpias con montaje eficiente, como lo mencionó De Araujo et al. (2016);
- Una revitalización más fácil, según los argumentos de Ivanov (2005) y Domljan y Jankovic (2022);
- Combinación con otros materiales, logrando con buen desempeño y representando una acción moderna, según lo verificado por Harris y Socratous (2013) y Høibø et al. (2015);
- Menor generación de residuos desde los procedimientos de mantenimiento periódico y de modernización, ya que la madera requiere un mantenimiento periódico para tener una vida útil más extensa, según lo destacado por Highley y Scheffer (1989) y Pearson et al. (2012);
- Y como sugerencias para un desecho más adecuado de los materiales de construcción al final de la vida útil de los edificios de madera procesada, los autores también proponer los siguientes posibles nuevos usos:
 - Madera procesada tratada químicamente para durmientes, terrazas y rejas;
 - Madera procesada no tratada para artesanía, muebles y elementos de jardinería.

CONCLUSIÓN

La evaluación de los productores y vendedores de viviendas de madera procesada, con perfiles corporativos en Instagram®, confirmó una participación importante en esta plataforma social en Brasil. Por otro lado, se garantizó un bajo margen de error mediante una recolección integral de datos.

Esta muestra significativa reveló un hecho inesperado, ya que hay una percepción muy marcada de que numerosas empresas siguen subvalorando los argumentos de sustentabilidad de sus productos y servicios. Esta afirmación está apoyada por la cantidad limitada de publicaciones sobre los beneficios y las características de la construcción con madera procesada, usando pocos argumentos en sus publicaciones. Existe un ambiente altamente favorable y, al destacar estos argumentos plena e intensivamente, se puede atraer a nuevos consumidores y conscientizarlos sobre los beneficios de las soluciones de madera procesada en comparación con la albañilería tradicional y las edificaciones de acero.

Para fortalecer la lista de justificaciones identificada, se podrían considerar argumentos adicionales para convencer y atraer nuevos clientes para las viviendas de madera procesada. Se espera que la visibilidad y el comercio de las soluciones de construcción con madera procesada se vean impulsados en los mercados virtuales brasileños, cuando se implemente una mayor aclaración y se promuevan más las viviendas sustentables.

La réplica de esta metodología virtual a otros territorios permitiría realizar observaciones representativas a través de demandas de bajo costo, ya que este estudio permite analizar sectores, tanto nacional como regionalmente, a través de una estrategia proactiva para entender y promover los mercados virtuales para productos orientados a la sustentabilidad.

REFERENCES

- Ahmed, S. (2021). *Evaluating the feasibility of mass timber as a mainstream building material in the US construction market: industry perception, cost competitiveness, and environmental performance analysis*. [Doctoral thesis in Civil Engineering, Oregon State University]. Corvallis: OSU, 1-187.
- Bartik, A., Bertrand, M., Cullen, Z., Glaeser, E. L., Luca, M. & Stanton, M. (2020). The impact of COVID-19 on small business outcomes and expectations. *PNAS*, 117(30), 17656-17666. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.200699111>
- Bauer, B., Koppelhuber, J., Wall, J. & Heck, D. (2017). Impact factors on the cost calculation for building services within the built environment. *Procedia Engineering*, 171, 294-301. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.337>
- Burnard, M., Nyrud, A., Bysheim, K., Kutnar, A., Vahtikari, K. & Hughes, M. (2017). Building material naturalness: perceptions from Finland, Norway and Slovenia. *Indoor and Built Environment*, 26(1), 92-107. DOI: <https://doi.org/10.1177/1420326X15605162>
- Chandragiri, A., Jeelani, S., Akthar, S. & Lingeswaran, N. (2021). A study and identification of the time and cost overrun in the construction project. *Materials Today: Proceedings*, 47(15), 5426-5431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.268>
- Chen, J., Vullikanti, A., Santos, J., Venkatramanan, S., Hoops, S., Mortveit, H., Lewis, B., You, W., Eubank, S., Marathe, M., Barrett, C. & Marathe, A. (2021). Epidemiological and economic impact of COVID-19 in the US. *Scientific Reports*, 11, 20451. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-99712-z>
- De Araujo, V., Gutiérrez-Aguilar, C., Cortez-Barbosa, J., Gava, M. & Garcia, J. (2019). Disponibilidad de las técnicas constructivas de habitación en madera, en Brasil. *Revista de Arquitectura*, 21(1), 68-75. DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2019.21.1.2014>
- De Araujo, V., Švajlenka, J., Vasconcelos, J., Santos, H., Serra, S., Almeida Filho, F., Paliari, J., Lahr, F. & Christoforo, A. (2022a). Is the timber construction sector prepared for e-commerce via Instagram®? A perspective from Brazil. *Sustainability*, 14(14), 8683. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14148683>
- De Araujo, V., Vasconcelos, J., Gava, M., Christoforo, A., Lahr, F. & Garcia, J. (2021a). What does Brazil know about the origin and uses of tree species employed in the housing sector? Perspectives on available species, origin and current challenges. *International Forestry Review*, 23(3), 392-404. DOI: <https://doi.org/10.1505/146554821833992794>
- De Araujo, V., Vasconcelos, J., Lahr, F. & Christoforo, A. (2022b). Timber forest products: a way to intensify global bioeconomy from bio-materials. *Acta Facultatis Xylogiae Zvolen*, 64(1), 99-111. DOI: <http://dx.doi.org/10.17423/afx.2022.64.1.09>
- De Araujo, V., Vasconcelos, J., Biazzon, J., Morales, E., Cortez, J., Gava, M. & Garcia, J. (2020a). Production and market of timber housing in Brazil. *Pro Ligno*, 16(1), 17-27. Retrieved from: <https://www.proligno.ro/en/articles/2020/1/DE%20ARAUJO.pdf>

De Araujo, V., Vasconcelos, J., Cortez-Barbosa, J., Morales, E., Christoforo, A., Gava, M., Lahr, F. & Garcia, J. (2020b). Wood consumption and fixations of carbon dioxide and carbon from timber housing techniques: A Brazilian panorama. *Energy and Buildings*, 216, 109960. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109960>

De Araujo, V., Vasconcelos, J., Cortez-Barbosa, J., Morales, E., Gava, M., Savi, A. & Garcia, J. (2016). Wooden residential buildings – a sustainable approach. *Bulletin of the Transilvania University of Brasov - Series II*, 9(58), 53-62. Retrieved from: https://webbut.unibv.ro/index.php/Series_II/article/view/816/748

De Araujo, V., Vasconcelos, J., Morales, E., Lahr, F. & Christoforo, A. (2021b). Characterization of business poles of timber houses in Brazil. *Mercator*, 20(2), 1-15. Retrieved from: <http://www.mercator.ufc.br/mercator/article/view/e20026>

Domljan, D. & Jankovic, L. (2022). Design of sustainable modular wooden booths inspired by revitalization of Croatian traditional construction and new user needs due to COVID-19 pandemic. *Sustainability*, 14(2), 720-742. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14020720>

Egan Consulting. (2017). *Annual survey of UK structural timber markets: market report 2016*. Alcoa: Structural Timber Association.

Egger, D., Miguel, E., Warren, S., Shenoy, A., Collins, E., Karlan, D., Parkerson, D., Mobarak, A., Fink, G., Udry, C., Walker, M., Haushofer, J., Larreboure, M., Athey, S., Lopez-Pena, P., Benhachmi, S., Humphreys, M., Lowe, L., Meriggi, N., Wabwire, A., Davis, C., Pape, U., Graff, T., Voors, M., Nekesa, C. & Vernot, C. (2021). Falling living standards during the COVID-19 crisis: quantitative evidence from nine developing countries. *Science Advances*, 7(6), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.1126/sciadv.abe0997>

Fujii, H. & Managi, S. (2013). Which industry is greener? An empirical study of nine industries in OECD countries. *Energy Policy*, 57, 381-388. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.02.011>

Garay, R., Pfenniger, F., Castillo, M. & Fritz, C. (2021). Quality and sustainability indicators of the prefabricated wood housing industry - a Chilean case study. *Sustainability*, 13(15), 8523. <https://doi.org/10.3390/su13158523>

Garay-Moena, R., Castillo-Soto, M., Fritz-Fuentes, C. & Ortega, C. (2022). Desarrollo de un indicador integrado de sustentabilidad y seguridad estructural para el mercado de viviendas de madera aplicado a Chile central. *Hábitat Sustentable*, 12(1), 8-23. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.01>

Gustavsson, L., Sathre, R. (2006). Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. *Building and Environment*, 41, 940-951. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.04.008>

Hammond, G. & Jones, C. (2008). Embodied energy and carbon in construction materials. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, 161(2), 87-98. DOI: <https://doi.org/10.1680/ener.2008.161.2.87>

Harris, R. & Socratous, M. (2013). Preface. Schober, K. (Ed.). *Innovative timber composites - improving wood with other materials*. COST Action FP1004. Bath: University of Bath.

Hart, J. & Pomponi, F. (2020). More timber in construction: unanswered questions and future challenges. *Sustainability*, 12(8), 3473. DOI: <https://doi.org/10.3390/su12083473>

Heilmayr, R., Echeverría, C. & Lambin, E. (2020). Impacts of Chilean forest subsidies on forest cover, carbon and biodiversity. *Nature Sustainability*, 3, 701-709. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41893-020-0547-0>

Heräjärvi, H. (2019). Wooden buildings as carbon storages – Mitigation or oration? *Wood Material Science & Engineering*, 14(5), 291-297. DOI: <https://doi.org/10.1080/17480272.2019.1635205>

Highley, T. L. & Scheffer, T. (1989). *Controlling decay in waterfront structures: evaluation, prevention, and remedial treatments*. FPL-RP-494. Madison: FPL.

Høibø, O., Hansen, E. & Nybakk, E. (2015). Building material preferences with a focus on wood in urban housing: durability and environmental impacts. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(11), 1617-1627. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0123>

Hurmekoski, E., Jonsson, R. & Nord, T. (2015). Context, drivers, and future potential for wood-frame multi-story construction in Europe. *Technological Forecasting and Social Change*, 99, 181-196. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.07.002>

IBÁ (2020). *Relatório anual 2020*. São Paulo: IBÁ.

Iqbal, M., Ahmad, N., Waqas, M., Abrar, M. (2021). COVID-19 pandemic and construction industry: Impacts, emerging construction safety practices, and proposed crisis management. *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 18(2), 1-17. DOI: <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2021.034>

Ivanov, A. (2005). Revitalization of historic wooden housing using local entrepreneurs' capacity (cases of towns of Gorodets, Russia and Eksjö, Sweden). [Master's dissertation in Urban Management and Development, Lund University]. Lund: Lund University, 1-89.

Koppelhuber, J., Bauer, B., Wall, J. & Heck, D. (2017). Industrialized timber building systems for an increased market share – a holistic approach targeting construction management and building economics. *Procedia Engineering*, 171, 333-340. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.01.341>

Larsen, J., Shen, G., Lindhard, S. & Brunoe, T. (2016). Factors affecting schedule delay, cost overrun, and quality level in public construction projects. *Journal of Management in Engineering*, 32, 1-10. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000391](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000391)

Leite-Filho, A., Soares-Filho, B., Davis, J., Abrahão, G. & Börner, J. (2021). Deforestation reduces rainfall and agricultural revenues in the Brazilian Amazon. *Nature Communications*, 12, 2591. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-22840-7>

Lima, M. (2017). *Brasileiros são os que mais procuram por produtos com certificado florestal*. Retrieved from: https://www.correiobraziliense.com.br/app/noticia/economia/2017/11/03/internas_economia,638392/brasileiros-sao-os-que-mais-procuram-produtos-certificado-florestal.shtml.

Maldonado, M., Esquivel, A. & Chan, A. (2020). Calidad en el servicio en micronegocios del sector artesanal de madera en una comisaría de Mérida, México. *Ingeniare*, 28, 120-132. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052020000100120>

MBIE. (2021). *Building and construction sector trends annual report 2021*. Wellington: MBIE, 1-39.

- Meijueiro, D., Lopes, C., Alves, R., Silveira, B., Gracioli, C. & Rosso, S. (2020). Certificação em manejo florestal e em cadeia de custódia no Brasil. *Brazilian Journal of Development*, 6(8), 57324-57340. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-223>
- Moore, N. (2015). *Timber utilisation statistics 2015*. Alicante: Timbertrends.
- Morgado, L. & Pedro, J. (2011). *Caracterização da oferta de casas de madeira em Portugal: inquérito às empresas de projecto, fabrico, construção e comercialização*. Relatório 118/2011 – NAU. Lisboa: LNEC., 1-173.
- Oliver, C., Nassar, N., Lippke, B. & McCarter, J. (2014). Carbon, fossil fuel, and biodiversity mitigation with wood and forests. *Journal of Sustainable Forestry*, 33, 248-275. DOI: <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.839386>
- Pearson, T., Swails, E. & Brown, S. (2012). *Wood product accounting and climate change mitigation projects involving tropical timber: Winrock international report to the international tropical timber organization*. Report. Little Rock: Winrock International.
- Pinheiro, R., Castro, G., Silva, H. & Nunes, J. (2011). *Pesquisa de mercado*. Rio de Janeiro: Editora FGV.
- Pomponi, F., Hart, J., Arehart, J. & D'Amico, B. (2020). Buildings as a global carbon sink? A reality check on feasibility limits. *One Earth*, 3(2), 157-161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.018>
- Rabelo, L., Maestri, M., Aquino, M., Baumann, S. & Brígida, C. (2020). Cenário das árvores plantadas no Brasil. *Biodiversidade*, 19(3), 170-179. Retrieved from: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/biodiversidade/article/view/10825>
- Ramage, M., Burridge, H., Busse-Wicher, M., Fereday, G., Reynolds, T., Shah, D., Wu, G., Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D., Allwood, J., Dupree, P., Linden, P. & Scherman, O. (2017). The wood from the trees: the use of timber in construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68(1), 333-359. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.107>
- Raosoft (2004). *Raosoft Sample Size Calculator*. Seattle: Raosoft. Retrieved from: <http://www.raosoft.com/samplesize.html>.
- Rattner, H. (1999). Sustentabilidade - uma visão humanista. *Ambiente & Sociedade*, 5, 233-240. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1414-753X1999000200020>
- Ribeiro, M. (2020). A Brazilian forest community shows certified timber really does work. Retrieved from: <https://news.mongabay.com/2020/07/a-brazilian-forest-community-shows-certified-timber-really-does-work/>.
- Romero, C., Guariguata, M., Putz, F., Sills, E., Lima, G., Papp, L., Voigtlaender, M. & Vidal, E. (2015). The context of natural forest management and FSC certification in Brazil. Bogor, Indonesia: CIFOR.
- Senouci, A., Ismail, A. & Eldin, N. (2016). Time delay and cost overrun in Qatari public construction projects. *Procedia Engineering*, 164, 368-375. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.632>
- Shigue, E. (2018). Difusão da construção em madeira no Brasil: agentes, ações e produtos. [Doctoral thesis in Architecture, University of São Paulo]. São Carlos: USP, 1-237.
- Singh, R. (2010). Delays and cost overruns in infrastructure projects: extent, causes and remedies. *Economic & Political Weekly*, 45(21), 43-54. Retrieved from: <https://www.jstor.org/stable/27807050>
- Svajlenka, J. & Kozlovská, M. (2020a). Analysis of the energy balance of constructions based on wood during their use in connection with CO₂ emissions. *Energies*, 13(18), 4843. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13184843>
- Svajlenka, J. & Kozlovská, M. (2020b). Evaluation of the efficiency and sustainability of timber-based construction. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120835. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120835>
- Svajlenka, J. & Kozlovská, M. (2018). Houses based on wood as an ecological and sustainable housing alternative - case study. *Sustainability*, 10(5), 1502. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10051502>
- Verschuur, J., Koks, E. & Hall, J. (2021). Global economic impacts of COVID-19 lockdown measures stand out in high-frequency shipping data. *PLoS ONE*, 16, 1-16. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0248818>
- Viholainen, N., Kylkilahti, E., Autio, M., Pöyhönen, J. & Toppinen, A. (2021). Bringing ecosystem thinking to sustainability-driven wooden construction business. *Journal of Cleaner Production*, 292, 126029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126029>
- Wahl, A. (Ed.). (2008). *Wood market trends in Europe*. SP-49. Trend 3. Vancouver: FPInnovations, 40.
- Wang, L., Toppinen, A. & Juslin, H. (2014). Use of wood in green building: a study of expert perspectives from the UK. *Journal of Cleaner Production*, 65, 350-361. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.08.023>
- Wargula, L., Kukla, M., Wieczorek, B. & Krawiec, P. (2022). Energy consumption of the wood size reduction processes with employment of a low-power machines with various cutting mechanisms. *Renewable Energy*, 181, 630-639. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.09.039>
- Wherry, G. & Buehlmann, U. (2014) Product life cycle of the manufactured home industry. *BioResources*, 9, 6652-6668. Retrieved from: https://bioresources.cnr.ncsu.edu/wp-content/uploads/2016/06/BioRes_09_4_6652_Wherry_Buehlmann_Product_Life_Cycle_Home_Industry_5443.pdf
- Yazdi, M., Zakaria, R., Mustaffa, M., Majid, M., Zin, R., Ismail, M. & Yahya, K. (2014). *Desalination and Water Treatment*, 52(19-21), 3631-3636. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2013.854105>

EFFECTIVIDAD A FUTURO DE LAS ESTRATEGIAS DE DISEÑO PASIVAS EN VIVIENDAS

FUTURE EFFECTIVENESS OF PASSIVE HOUSE DESIGN STRATEGIES

EFICÁCIA FUTURA DE ESTRATÉGIAS DE PROJETO PASSIVO EM HABITAÇÃO

Gustavo Javier Barea Paci

Instituto de Ambiente Hábitat y Energía
Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-5643-3206>
gbarea@mendoza-conicet.gob.ar

Carolina Ganem Karlen

Instituto de Ambiente Hábitat y Energía
Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-1431-1219>
cganem@mendoza-conicet.gob.ar

Maria Cecilia Molina

Instituto de Ambiente Hábitat y Energía
Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0009-0005-8847-5995>
arqmolina.maria@gmail.com

Pia Mateo

Centro Científico Tecnológico (CCT), Instituto de Ambiente, Hábitat y Energía (INAHE)
Centro Científico Tecnológico CONICET, Mendoza, Argentina
<https://orcid.org/0009-0002-9069-1150>
mateo.pia@gmail.com



RESUMEN

Las estrategias de diseño arquitectónico pasivo han sido una respuesta efectiva a la crisis energética del siglo XX. En climas templados, su integración resulta en comportamientos térmicos en los que se combinan el confort interior y la eficiencia energética. Sin embargo, los escenarios de cambio climático proyectados a futuro no ofrecerán los mismos rendimientos, resultando dichas estrategias menos efectivas. El objetivo de este trabajo es la cuantificación del cambio relativo en la efectividad de las estrategias de diseño pasivas en viviendas para clima árido templado-frío (Bwk), tomando como ejemplo la ciudad de Mendoza (Argentina). Respecto de las proyecciones de clima futuro para clima árido cálido (Bwh), utilizando el escenario RCP8.5 del CMIP5, equivalente al escenario SSP85 del CMIP6 del IPCC, los resultados muestran una disminución del 20% en la cantidad de horas en confort anual, con un incremento del 24% en la necesidad de estrategias pasivas de verano.

Palabras clave

cambio climático, arquitectura sustentable, viviendas unifamiliares

ABSTRACT

Passive architectural design strategies have been an effective response to the energy crisis of the 20th century. In temperate climates, their integration results in thermal behaviors that combine indoor comfort and energy efficiency. However, projected future climate change scenarios will not offer the same performances, resulting in such strategies being less effective. The objective of this work is to quantify the relative change in the effectiveness of passive design strategies in dwellings for arid temperate-cold climates (Bwk), taking the city of Mendoza (Argentina) as an example. Regarding future climate projections for warm arid climates (Bwh), using the CMIP5's RCP8.5 scenario, equivalent to the IPCC's CMIP6 SSP85 scenario, the results show a 20% decrease in the number of hours in annual comfort, with a 24% increase in the need for passive summer strategies.

Keywords

climate change, sustainable architecture, single-family houses.

RESUMO

As estratégias de projeto arquitetônico passivo têm sido uma resposta eficaz à crise energética do século XX. Em climas temperados, sua integração resulta em comportamentos térmicos que combinam conforto interno e eficiência energética. No entanto, os cenários de mudanças climáticas projetados para o futuro não oferecerão os mesmos desempenhos, tornando essas estratégias menos eficazes. O objetivo deste trabalho é quantificar a mudança relativa na eficácia das estratégias de projeto passivo em habitações para clima árido temperado-frío (Bwk), tomando como exemplo a cidade de Mendoza (Argentina). Com relação às projeções climáticas futuras para o clima árido quente (Bwh), usando o cenário CMIP5 RCP8.5, equivalente ao cenário CMIP6 SSP85 do IPCC, os resultados mostram uma redução de 20% no número de horas de conforto anual, com um aumento de 24% na necessidade de estratégias passivas de verão.

Palavras-chave

mudanças climáticas, arquitetura sustentável, habitações unifamiliares.

INTRODUCCIÓN

En Argentina se han observado cambios desfavorables en el clima desde la segunda mitad del siglo pasado, los cuales, según las proyecciones de los modelos climáticos, se intensificarían en este siglo (Agosta et al., 2015) (Flores-Larsen et al., 2019). Producto de estos cambios, las olas de calor aumentaron su frecuencia en toda la región.

A mitad de diciembre de 2013 comenzó una intensa ola de calor, la más larga e intensa registrada hasta el 2021, que perduró hasta casi mitad de enero, y que geográficamente abarcó el centro de Argentina, incluyendo Buenos Aires, Córdoba y Mendoza; con temperaturas máximas por encima de 40 °C y mínimas mayores a 24 °C.

La distribución de energía eléctrica colapsó en muchos sectores del área metropolitana de Buenos Aires debido al récord de consumo por el intenso uso de los equipos de aire acondicionado. Más recientemente, entre diciembre de 2022 y febrero de 2023, se registraron 10 olas de calor en el territorio argentino, de las cuales 3 fueron particularmente intensas y prolongadas en el tiempo. La Figura 1 presenta los registros de dichas anomalías de temperatura.

El cambio climático está teniendo y tendrá grandes impactos en el consumo de energía de los edificios y el diseño de futuros edificios debería considerar esta situación. El sector edilicio, incluyendo los sectores residenciales y comerciales, es responsable de entre el 30% y el 40% de la demanda total de energía mundial y emite un tercio de las emisiones mundiales de GEI

(Bhamare et al., 2019). Asimismo, se espera que el uso de energía y las emisiones relacionadas se dupliquen, o incluso se tripliquen, para mediados del presente siglo debido a varias tendencias claves, sobre todo al aumentar los estándares de niveles de vida de la población. En este contexto, los edificios representan una pieza crítica para un futuro con bajo nivel de emisiones y, al mismo tiempo, un desafío global para la integración con el desarrollo sostenible (Barea, 2022; Flores-Larsen et al., 2019; Flores-Larsen et al., 2021; Ganem et al., 2021; Rubio et al., 2015; Ruiz et al., 2022; Sánchez et al., 2017).

Es importante destacar que la severidad del clima tiene una gran influencia en el diseño de los edificios. Por lo tanto, se requiere una revisión exhaustiva de los diseños arquitectónicos actuales y la adopción de nuevas estrategias adaptadas al Cambio Climático. El potencial de ahorro energético tanto en edificios nuevos como en los ya existentes oscila entre un 50% y un 90% (Chalmers, 2015).

Según Lacaze et al. (2021), dicho potencial de ahorro depende de la estrategia implementada en el edificio. Estos autores elaboraron una estimación del consumo energético e identificaron las alternativas más favorables al ahorro de consumo, emisiones de GEI y sus costos asociados. En la figura 2 se observan las estimaciones de ahorro implementando materiales eficientes, equipamientos certificados y dispositivos inteligentes, para Argentina.

Elias (2017) y Brager y de Dear (1998) han sugerido que, para diseñar los edificios y optimizar su confort térmico

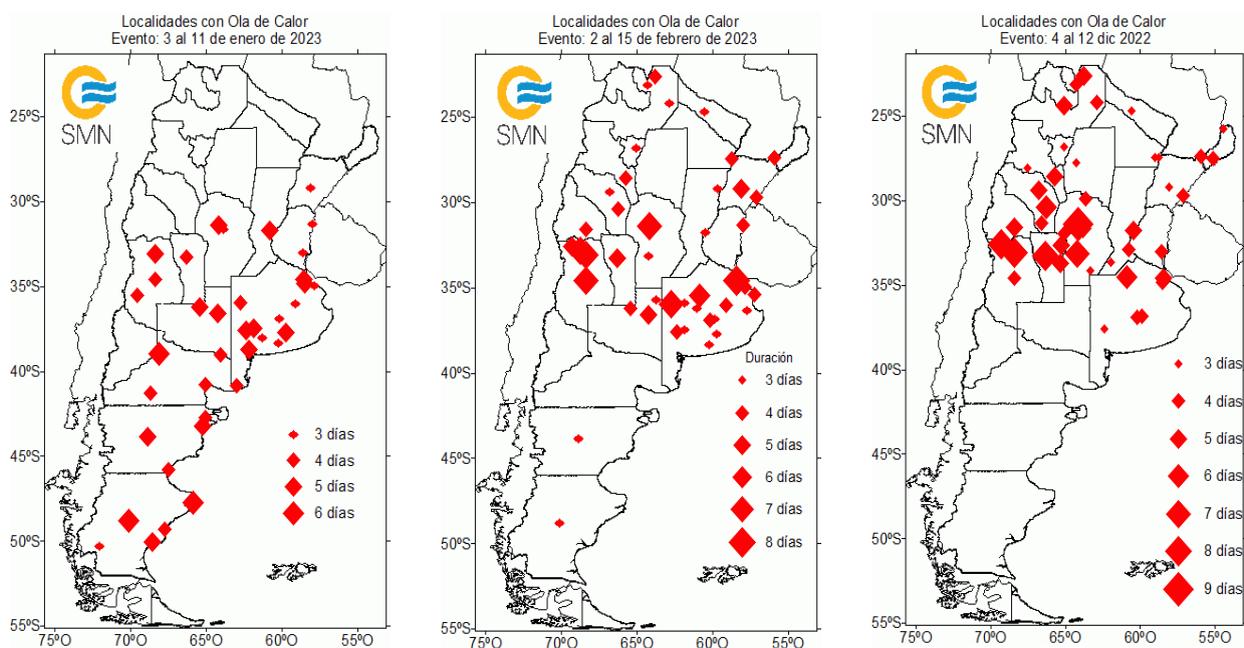
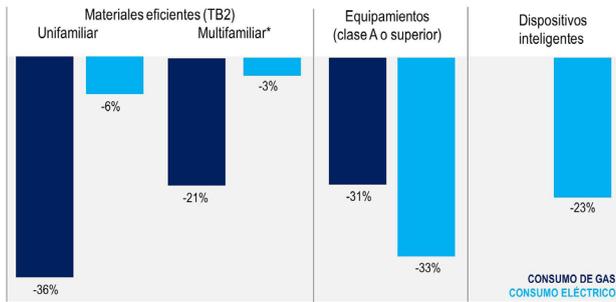


Figura 1. Olas de calor registradas en el territorio argentino durante el período estival 2022-2023. De izquierda a derecha: a) del 4 al 12 de diciembre del 2022; b) del 3 al 11 de enero del 2023 y c) del 2 al 15 de febrero del 2023. Fuente: Servicio Meteorológico Nacional Argentino. (2022, 2023a y 2023b)



(*) Comprende nuevos proyectos y también ejecución de reformas en unidades existentes.
 Fuente: elaboración propia con base en Tejani et al. (2011) y Darhanpé et al. (2021)

Figura 2. Estimación de porcentaje de ahorro según modelo y estrategia de intervención. Fuente: Lacaze et al., 2022

en los próximos años, sin cargar el ecosistema con una mayor degradación ambiental, se deben conocer las predicciones sobre las condiciones climáticas futuras en diferentes ciudades. De este modo, se puede anticipar cualquier cambio y contrarrestar sus efectos mediante la eficiencia energética, un mejor diseño y, en última instancia, el ahorro de energía (Li et al., 2012).

En Argentina, el Centro de Investigaciones Marinas y Atmosféricas (CIMA) elaboró un informe sobre las tendencias climáticas (segunda mitad del siglo XX) y una proyección del clima futuro (siglo XXI) como parte de los estudios de referencia para la tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (3CN Cima, 2022). El estudio se centra en las tendencias observadas y proyectadas

de la temperatura y las precipitaciones en superficie y en algunos de los índices extremos que pueden causar impactos relevantes.

En función de lo expresado, el objetivo principal de este trabajo es cuantificar el cambio relativo en la efectividad de las estrategias pasivas de diseño en viviendas, en un clima árido templado-frío (Bwk), tomando como caso a la ciudad de Mendoza (Argentina).

Esto permitirá identificar qué medidas de diseño ganarán o perderán importancia debido al calentamiento climático y la correlación entre la eficacia de los sistemas pasivos analizados. Los resultados del análisis serán directamente aplicables a los diseñadores de edificios. Así también, este trabajo intenta aportar al desarrollo de metodologías para la elaboración de archivos de cambio climático para la simulación dinámica de edificios.

METODOLOGÍA

En una primera instancia, se analizó el potencial bioclimático de un clima templado continental de Argentina (Mendoza, -33° 9' LS, 69° 15' LO) mediante la herramienta BcChart (Košir, 2018).

El análisis del potencial bioclimático correlaciona las características climáticas esenciales, como la temperatura del aire, la humedad relativa y la radiación solar, con la capacidad de lograr el confort de los ocupantes del edificio a través de los sistemas solares pasivos de

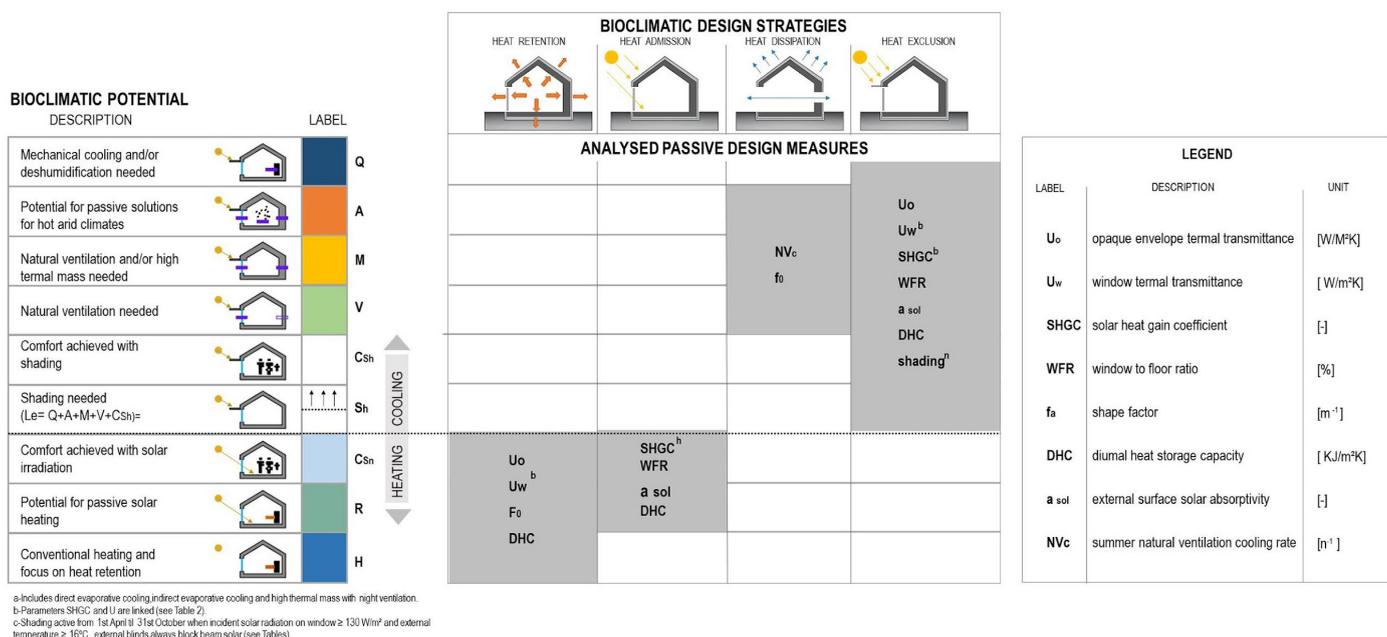


Figura 3. Medidas de potencial bioclimático calculadas por BcChart y medidas de diseño pasivo analizadas. Fuente: Košir et al., 2017; Košir, 2019

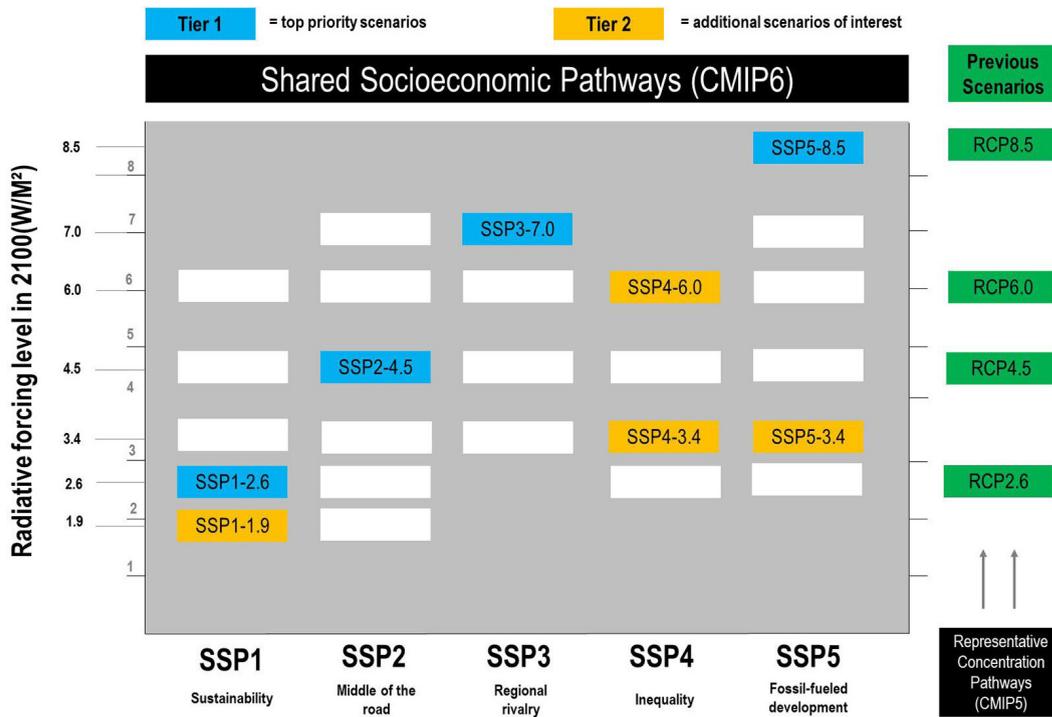


Figura 4. Vías socioeconómicas compartidas y combinaciones de forzamiento radiativo del año 2100 utilizadas en Scenarío MIP.
 Fuente: O'Neill et al., 2016

edificios. Este estudio permite representar, a través del potencial pasivo, la adaptación climática de los edificios para el clima estudiado. Los cálculos se basan en la teoría de gráficos bioclimáticos de Olgyay (1963), utilizando la temperatura del aire, la humedad relativa (RH) y la radiación solar global. La zona de confort se define entre 21 y 27 °C y entre 20 y 80 % RH.

Las combinaciones de las variables climáticas determinarán si se pueden usar ciertas soluciones pasivas para lograr el confort térmico, o si se necesitarán sistemas activos (refrigeración mecánica, calefacción convencional)

En la Figura 3 se presentan las definiciones de cada potencial bioclimático determinado por BcChart. La relación entre el potencial bioclimático y las medidas de diseño pasivo analizadas está indicado siempre que se pueda utilizar una determinada medida de diseño para facilitar una mejor respuesta térmica pasiva de un edificio y, en consecuencia, una mayor eficiencia energética.

Posteriormente, se analiza cómo el potencial bioclimático del clima estudiado se modificaría a hacia el año 2100. La elección de ese año específico responde a las siguientes hipótesis: En primer lugar, es importante aclarar que, aunque el ciclo de vida promedio de un edificio es de aproximadamente 50 años, algunos edificios están diseñados y construidos para durar más tiempo. Por otro lado, se espera que, para ese momento, los efectos del cambio climático sean más evidentes y puedan tener un impacto significativo en el comportamiento y la eficiencia energética de los edificios.

Para ello, se utilizaron datos de escenario climáticos futuros del IPCC. El Quinto Informe de Evaluación del IPCC ha definido cuatro nuevos escenarios de emisiones, las denominadas Vías de Concentración Representativas (RCP), que tienen en cuenta los efectos de las políticas del siglo XX en la mitigación del cambio climático.

El forzamiento radiativo (FR) total previsto para el año 2100 oscila entre 2,6 y 8,5 W/m². Los cuatro RCP comprenden un escenario en el que los esfuerzos de mitigación conducen a un nivel muy bajo de forzamiento (RCP 2,6), dos escenarios de estabilización (RCP 4,5 y RCP 6,0) y un escenario (RCP 8,5) con un nivel muy alto de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero).

Es importante señalar que, hasta mediados del siglo XXI, las diferencias en los resultados entre los RCP son muy pequeñas, debido a que el sistema climático responde con relativa lentitud a los cambios en la concentración de GEI. Por ello, se ha tomado el escenario RCP 8.5 para los análisis posteriores, ya que proporciona un calentamiento mucho más rápido y cambios más pronunciados en indicadores importantes como el caudal de los ríos, la temperatura y las precipitaciones.

El sexto informe de evaluación del IPCC (AR6), se ha alimentado con el desarrollo de un nuevo conjunto de escenarios, denominado SSP, el cual se conforma a través del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados 6 (CMIP6) del Programa Mundial de Investigación del Clima (WCRP), el cual actualiza los RCP

del CMIP5. Los nuevos escenarios representan diferentes desarrollos socioeconómicos, así como diferentes vías de concentración de gases de efecto invernadero en la atmósfera (Falco et al., 2019; López-Franca et al., 2016).

La Figura 4 muestra una matriz que representa todas las combinaciones posibles de SSP y forzamiento radiativo (RCP), las cuales se encuentran codificadas por colores para mostrar la prioridad de cada escenario. Los escenarios de nivel 1, o prioridad máxima, son SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5 (color azul). Tres de los cuatro escenarios de Nivel 1 son versiones actualizadas de escenarios RCP de CMIP5 anteriores (RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5) para facilitar la comparación entre las proyecciones de CMIP5 y CMIP6. Los escenarios de nivel 2 son SSP1-1.9, SSP4-6.0, SSP4-3.4 y SSP5-3.4 (color naranja). Todas las demás combinaciones de forzamiento radiativo y SSP no son viables o no están designadas como una prioridad por ScenarioMIP (O'Neill et al., 2016). Como se observa en la figura 4, el escenario RCP8.5 del CMIP5, que es el que se ha utilizado en este trabajo, equivale a un escenario SSP85 del CMIP6, con una prioridad 1.

La metodología utilizada para generar los datos horarios futuros se conoce como *morphing* (Jentsch et al., 2008), que es un método que utiliza tanto un archivo meteorológico en tiempo real como predicciones de datos medios mensuales futuros de la variable de interés. Mediante transformaciones matemáticas de "desplazamiento" y "estiramiento" basadas en las medias mensuales presentes y futuras de las variables, un archivo meteorológico en tiempo presente se transforma en un archivo meteorológico futuro. La naturaleza de las transformaciones garantiza que la relación entre las variables meteorológicas se mantenga en el archivo meteorológico futuro. De este artículo, los datos horarios de tiempo presente fueron los del Año Meteorológico Típico (TMYx) basados en las medias del periodo 2007-2020.

Para las predicciones futuras, se ajustó el modelo ACCESS 1-3¹ RCP8.5, *rli1pl* (con una grilla de 1.875 por 1.25 grados; o 68.7km por 111.1 km), con datos observacionales de reanálisis CRU TS4.05, para corroborar la bondad de predicción en el área de estudio. Se tomaron datos desde 1901 hasta 2021.

Es importante señalar que el modelo ACCESS 1-3 ha sido utilizado en otros estudios para simular el clima en regiones de climas templados continentales similares al caso de estudio tomado (Bi et al., 2020; Lorenz et al., 2014; Stone et al., 2016; Ziehn et al., 2020).

Para la cuantificación de la concordancia entre los datos de reanálisis y el modelo futuro (datos medios anuales), se utilizaron los siguientes indicadores estadísticos calculados ampliamente utilizados: *d* (Ecuación 1), MAE (Ecuación 2), RMSE (Ecuación 3) y BIAS (Ecuación 4):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (obs_i - sim_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|sim_i - obs| + |obs_i - obs|)^2} \quad (\text{Ecuación 1})$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |sim_i - obs_i| \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i)^2} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (sim_i - obs_i) \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

d = Concordancia o índice de Willmott

MAE = Error medio absoluto

RMSE = Error cuadrático medio.

BIAS = Error medio

simi = Datos del modelo futuro

obsi = Datos de reanálisis medidos

obs = Datos medios de reanálisis medidos

n = Tamaño de la muestra

Luego, se analizaron anomalías por períodos de 50 años hasta el 2100 y se armaron los EPW futuros. Los datos se descargaron del sitio Climate Explorer del KNMI (Koninklijk Nederlands Meteorologisch Instituut), para Mendoza, Argentina.

Cabe destacar que, como limitante de estudio y también para este trabajo, se tomó la variable temperatura terrestre cada 3hs (del modelo ACCESS 1-3 RCP8.5, o *rli1pl*). Posteriormente, se interpolaron para obtener datos horarios. Las demás variables climáticas fueron extraídas del TMYx original. Se utilizó el software Weather converter de Energy Plus para armar el EPW futuro.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del estudio se presentan en dos secciones. La primera parte presenta el análisis bioclimático de la localidad estudiada (Mendoza) con el clima actual, TMY. A continuación, se muestra la influencia del cambio climático en las estrategias bioclimáticas.

¹ ACCESS 1-3 es un modelo climático global desarrollado por el Centro de Investigación de CSIRO en Australia y el Centro de Investigación Conjunta de la Comisión Europea. Es utilizado en estudios de cambio climático y proyecciones climáticas para el futuro ya que puede simular cambios en las temperaturas superficiales, la precipitación, el viento, la nubosidad, el nivel del mar y otros factores climáticos.

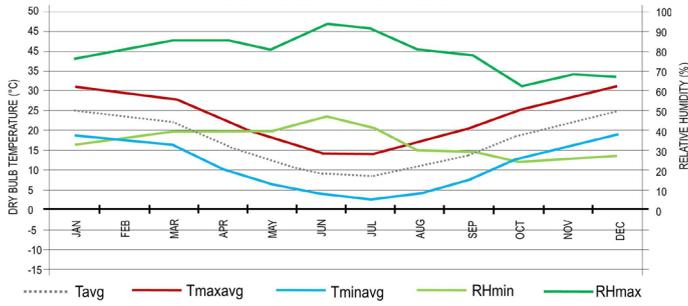


Figura 5. Temperaturas y Humedad relativas de Mendoza.
 Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

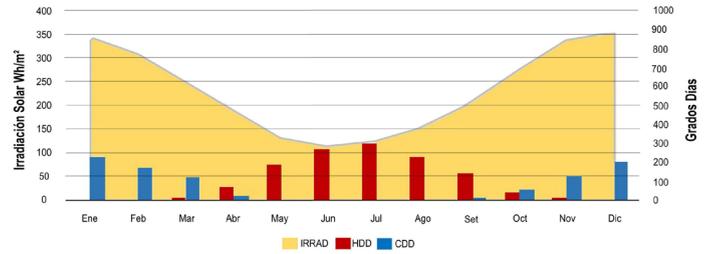


Figura 6. HDD y CDD función de la irradiancia solar.
 Fuente: Elaboración de los autores.

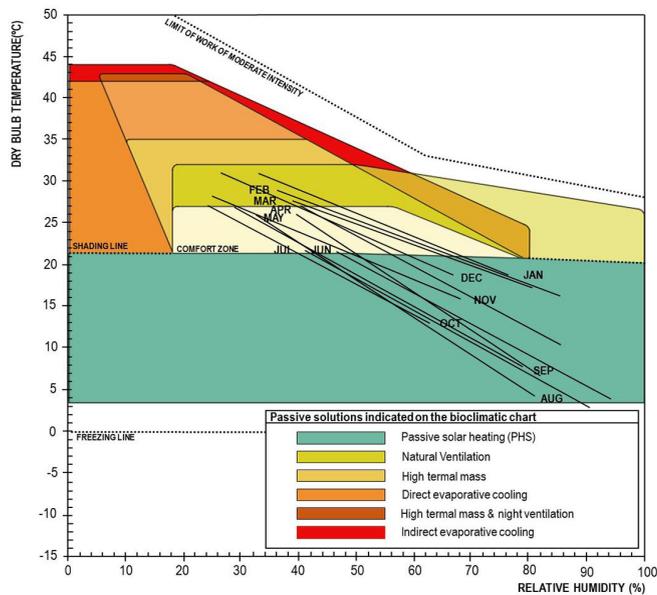


Figura 7. Gráfica de Givoni modificada por Košir et al. (2017), con datos actuales para Mendoza, Argentina. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

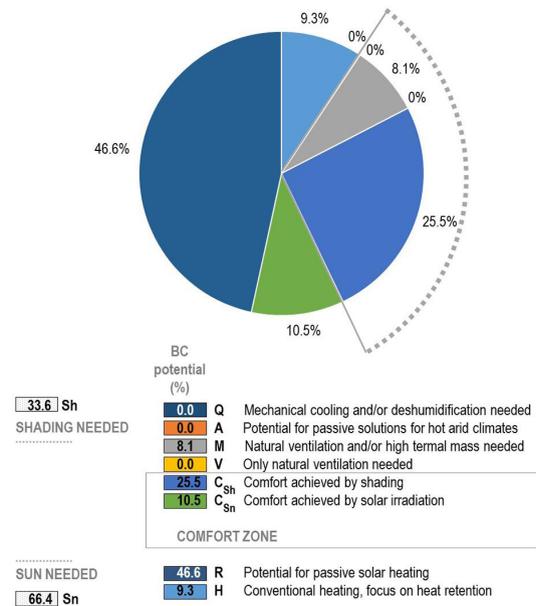


Figura 8. Potencial bioclimático con clima actual. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

POTENCIAL BIOCLIMÁTICO CON CLIMA ACTUAL

Mendoza tiene un clima desértico frío templado continental con importantes variaciones diarias y anuales. Según la clasificación de Koeppen (Kottek et al., 2006), corresponde a la nomenclatura climática Bwk. La letra "B" define un clima seco, la letra "w" hace referencia precipitaciones por debajo de los 250 mm anuales, y la letra "k" está relacionada con temperaturas medias anuales por debajo de los 18°C. Por lo tanto, la nomenclatura Bwk hace referencia a un clima árido-templado-frío. La figura 5 muestra las temperaturas máxima, mínima y media mensual, junto con la humedad relativa mínima y máxima mensual. La temperatura media anual es de 17.2 °C, siendo para enero (verano) la temperatura media mensual de 24.8 °C. y para julio (invierno) la temperatura media mensual de 8.2 °C.

Los HDD anuales (Heating Degree-Days, base 18.3) son de 1231 HDD, mientras que los CDD (Cooling degree-days, base 18.3), son de 911 CDD (Figura 6). Esto nos indica la necesidad mensual de calefacción y refrigeración.

El potencial bioclimático puede ser un punto de partida práctico para la definición de estrategias de diseño edilicias apropiadas al clima. En la figura 7 y figura 8 se muestran las posibles soluciones bioclimáticas con los datos climáticos actuales. En la figura 7, que corresponde a la gráfica de Olgyay (1963), se muestran los datos mensuales sobre las estrategias pasivas. Los autores de la herramienta agregan la influencia de la irradiancia solar diaria media y máxima recibida, lo que modifica la gráfica original (Košir & Pajek, 2017).

La mayor parte de los datos se encuentran sobre la estrategia de calefacción solar pasiva y, en un porcentaje

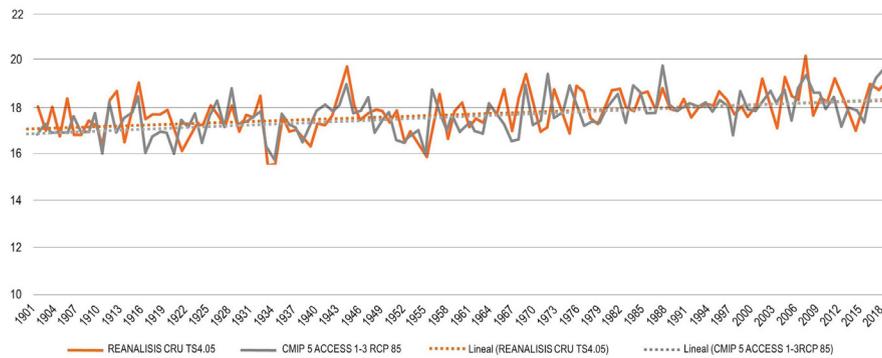


Figura 9. Comparación de temperaturas medias anuales desde 1901 hasta 2020 de: CRU TS4.05 y el modelo de simulación climática ACCESS 1-3. Fuente: Elaboración de los autores.

menor en los meses intermedios y de verano, ventilación natural combinado con masa térmica interior.

En la figura 8 se puede apreciar que los requerimientos de estrategias pasivas se dividen en dos grupos: Necesidades de Sombra – Nh, y Necesidades de Sol – Sn. Las estrategias para disipar el calor (SH) tiene un potencial de 33.6% (8.1% de ventilación natural con masa térmica, y un 25.5% por el uso de sombras). Nótese que las estrategias para climas cálidos áridos están en 0%, debido a que Mendoza es un clima árido-templado-frío, en el que la combinación de ventilación y sombras son suficientes para el logro del confort mediante estrategias pasivas de acondicionamiento natural. Por otro lado, las estrategias para la recolección de radiación solar (Sn) tienen un potencial del 66.4% (46.6% por calefacción solar pasiva, 9.3% por calefacción auxiliar y un 10.5% en confort por el uso de radiación solar directa).

INFLUENCIA DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS ESTRATEGIAS PASIVAS DE VIVIENDAS

Como se anticipó en el apartado de metodología, para el armado de los archivos EPW futuros se eligió un modelo del CMIP5 (ACCESS 1-3) y se ajustó con datos medidos de reanálisis (CRU TS4.05). El período analizado fue desde 1901 hasta 2020. En la figura 9 se muestra el ajuste de las temperaturas medias anuales de ambos modelos.

Los resultados de los indicadores estadísticos, de acuerdo con lo que se aprecia en la tabla 1, muestran errores aceptables de acuerdo con ASHRAE Guidline 14 (Clarke et al., 1993). El BIAS o el sesgo entre los datos resulta de 0.099 °C. El error medio absoluto MAE, descartando los valores atípicos, resulta de 0.68°C en promedio. Cuando se analiza el coeficiente de concordancia *d*, resulta del 72%. Finalmente, la desviación estándar de los valores residuales RMSE es de 0.88°C.

Tabla 1. Indicadores estadísticos del ajuste entre los datos de reanálisis CRU TS4.05 y el modelo ACCESS 1-3 para el escenario RCP8.5. Fuente: Elaboración de los autores.

INDICADORES	CRU TS4.05 vs ACCESS 1-3 RCP8.5
<i>d</i>	0.72
MAE (°C)	0.68
RMSE (°C)	0.88
BIAS (°C)	0.099

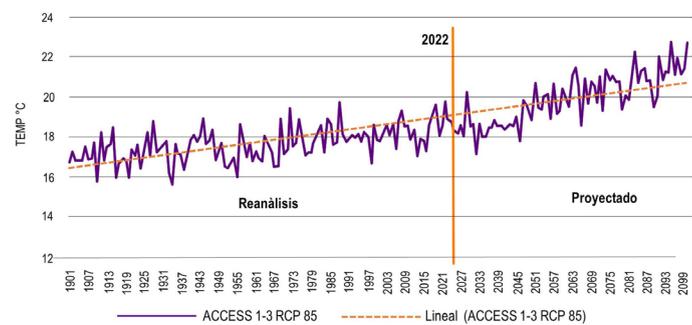


Figura 10. Temperaturas medias anuales, RCP8.5. Fuente: Elaboración de los autores.

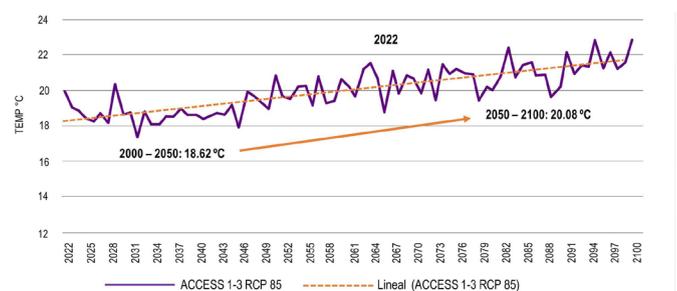


Figura 11. Temperaturas medias anuales para el escenario RCP8.5, período futuro, 2022-2100. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 2. Comparación de los cambios observados en períodos de 50 años. Fuente: Elaboración de los autores.

	ACCESS 1-3	Diferencia al período base 1900-1950
1900-1950	17.37	
1950-2000	17.77	0.40
2000-2050	18.62	0.85
2050-2100	20.80	2.18

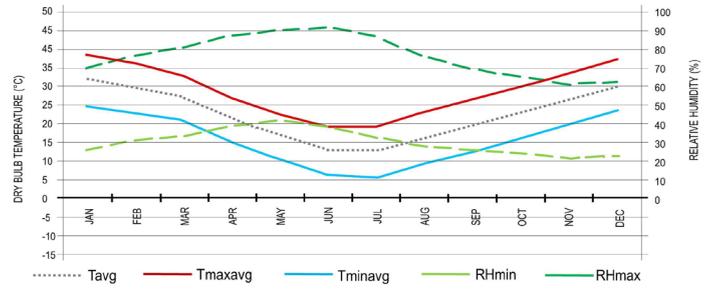


Figura 12. Temperaturas y Humedad relativas, año 2100 para Mendoza. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

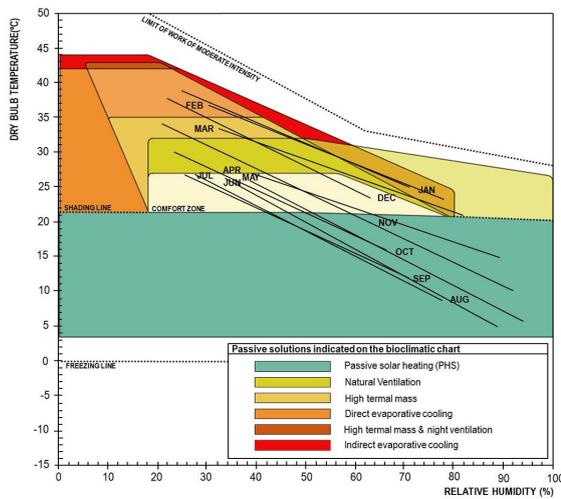


Figura 13. Temperaturas y Humedad relativas, año 2100. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

En la figura 10 se muestran las temperaturas medias anuales del modelo calibrado, desde 1901 hasta el 2100, para el escenario RCP 8.5.

En la figura 11 se recortan los datos predichos a futuro en el rango que va entre 2022-2100. Aquí se puede observar la tendencia del aumento de temperatura hacia el 2100. Si comparamos las anomalías en períodos de 50 años desde 1900, la temperatura hacia el año 2100 podría aumentar en el orden de los 2.18°C en relación con el período pre-industrial para el clima estudiado, como se aprecia en la tabla 2.

Con el modelo ACCESS1-3 ajustado, se utilizaron los datos para armar el EPW y simular en BcChart el efecto proyectado del cambio climático en el potencial bioclimático para Mendoza (Figura 12). La temperatura media anual para el 2100 se espera que sea de 22.50°C (5°C más que el TMY actual), mientras que para enero de ese año la temperatura media mensual sea de 31.88°C (7°C mayor que el actual), se espera que en julio la

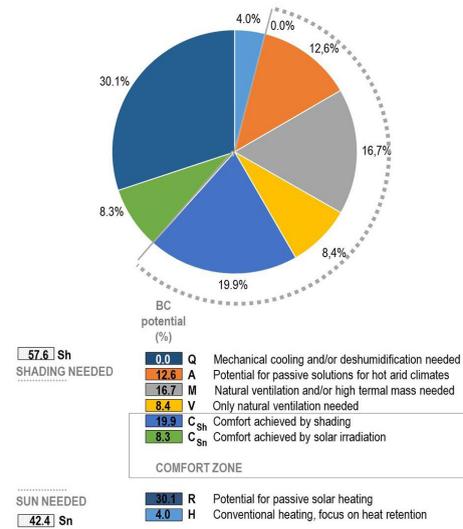


Figura 14. Potencial bioclimático futuro, año 2100. Fuente: Elaboración de los autores en software BcChart.

temperatura media mensual supere a la actual en 4.4°C (12.7°C).

Los resultados de la figura 13 y figura 14 muestran claramente que se espera que el potencial bioclimático se desplace hacia las estrategias de disipación de calor.

Si observamos la figura 14, las necesidades de Sombra *Sh* se calculan en un 57.6%, o sea, un 24% más que el clima actual. Dentro de este porcentaje hubo un aumento considerable (de 0% a 12.6%) en la estrategia A, que se refiere a un conjunto de soluciones pasivas para climas áridos y cálidos, que incluye Refrigeración evaporativa directa e indirecta y uso de masa térmica con ventilación natural. La necesidad de integrar, en el diseño, estrategias pasivas que corresponden a climas áridos cálidos, refiere a que la temperatura media anual se estima para el año 2100 por sobre los 18°C. El clima que hoy se clasifica como *Bwk* pasará a ser *Bwh*, es decir, clima árido cálido, con precipitaciones por debajo de los 250 mm, por lo que es posible el uso de refrigeración evaporativa. La

zona de confort, por el uso de sombras, se estima que descienda de 25.5% a 19.9%.

Para las estrategias de invierno S_n se prevé una disminución de su potencial de 66.4% a 42.4%, lo cual conlleva a que disminuyan todas las estrategias inherentes a la recolección de radiación solar y calor térmico. El potencial de calefacción pasiva pasará de un 46.6% a 30.1% y la calefacción auxiliar de un 10.5% a un 4%.

CONCLUSIÓN

Este trabajo aborda el impacto del cambio climático sobre la efectividad de las estrategias pasivas y las oportunidades de adaptación de los edificios en diferentes condiciones futuras extremas según el escenario RCP8.5 del CMIP5, equivalente al escenario SSP85 del CMIP6 del IPCC, en un clima hoy árido-templado-frío (Bwk) y en el futuro árido-cálido (Bwh), con importantes variaciones diarias y anuales.

Se trata de una contribución a una cuestión relevante en la arquitectura pasiva y de bajo consumo energético: ¿Seguiría estando el diseño actual optimizado energéticamente en los futuros escenarios de emisiones?

El diseño arquitectónico se enfrenta a un doble reto: por un lado, los edificios deben funcionar bien hoy logrando el confort térmico con consumos cercanos a cero. Por otro lado, deberán ser capaces de adaptarse a futuros escenarios climáticos, por lo que es muy importante reconocer las principales tendencias y tener en cuenta el panorama general.

El trabajo realiza un aporte al desarrollo metodológico en la elaboración de archivos de clima futuro de acuerdo con proyecciones de cambio climático (IPCC) para la simulación dinámica de edificios con alcance específico a la temperatura terrestre. Para el armado de los archivos EPW futuros, se elige un modelo del CMIP5 (en este caso ACCESS 1-3 RCP8.5) y se ajusta con datos medidos de reanálisis (CRU TS4.05). La elección de este modelo está fundamentada en su alto grado de ajuste y en la disponibilidad de datos para la región. Por lo tanto, este trabajo limita sus resultados, discusiones y conclusiones a los escenarios calculados con dicho modelo.

La simulación dinámica de edificios con archivos climáticos de elaboración propia, ajustados y validados tanto para la situación actual como futura, se consolida como una herramienta indispensable para valorar decisiones de diseño desde una mirada holística, lo cual garantiza el buen funcionamiento de nuestros edificios a lo largo de su vida útil. La transferencia de los resultados obtenidos a los diseñadores de edificios hace posible conocer qué estrategias pasivas ganarán o perderán importancia debido al calentamiento climático y la magnitud relativa a este cambio.

Para el caso de aplicación que se presenta en Mendoza (Argentina), las temperaturas medias anuales podrían incrementarse en 5°C para el 2100, con aumentos de 7°C en las medias mensuales de verano y de 4.4°C en las medias mensuales de invierno. Los resultados muestran una disminución del 20% en la cantidad de horas en confort con un incremento del 24% en la necesidad de estrategias pasivas de verano.

Respecto de estas últimas, actualmente las principales estrategias pasivas recomendadas son la sombra o protección a la radiación y la ventilación natural en conjunto con la incorporación de masa térmica en la envolvente. Para poder hacer frente a los escenarios de cambio climático futuro, a estas estrategias será necesario incorporar la refrigeración evaporativa directa e indirecta. Esto responde a que el actual clima templado pasará a ser clima cálido con temperaturas medias anuales por sobre los 18°C y que, debido a la baja humedad relativa, las mismas presentarán un alto grado de efectividad. Si a esta situación se adiciona el territorio árido en el que la escasez de agua es una constante, la investigación relacionada con el correcto diseño de estrategias pasivas en viviendas adquiere una importancia creciente.

AGRADECIMIENTOS

El trabajo ha sido financiado por el FONCYT PICT 2019-2752 y CONICET PIP 2021-2023 11220200101711CO.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Agosta, E., Araneo, D., Camilloni, I., Carril, A., Doyle, M., Frumento, O., Nuñez, M., Ortiz de Zárate, M., Penalba, O., Rusticucci, M., Saulo C., & Solman, S. (2015). Tendencias y Proyecciones: Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera (CIMA). En *Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático*. Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.

Barea, G., Mercado, M. V., Filippín, C., Monteoliva, J. M., & Villalba, A. (2022). New paradigms in bioclimatic design toward climatic change in arid environments. *Energy and Buildings*, 266, 112100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112100>

Base de Datos Climáticos. (2022). *3ra Comunicación Nacional de la República Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (3CN CIMA)*. Recuperado de: <http://3cn.cima.fcen.uba.ar/>

Bhamare, D. K., Rathod, M. K., & Banerjee, J. (2019). Passive cooling techniques for building and their applicability in different climatic zones—The state of art. *Energy and Buildings*, 198, 467–490. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.06.023>

- Bi, D., Dix, M., Marsland, S., O'Farrell, S., Sullivan, A., Bodman, R., Law, R., Harman, I., Srbinovsky, J., Rashid, H. A., Dobrohotoff, P., Mackallah, C., Yan, H., Hirst, A., Savita, A., Dias, F. B., Woodhouse, M., Fiedler, R., & Heerdegen, A. (2020). Configuration and spin-up of ACCESS-CM2, the new generation Australian Community Climate and Earth System Simulator Coupled Model. *Journal of Southern Hemisphere Earth System Science*, 70(1), 225–251. DOI: <https://doi.org/10.1071/es19040>
- Brager, G. S., & de Dear, R. J. (1998). Thermal adaptation in the built environment: a literature review. *Energy and Buildings*, 27(1), 83–96. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0378-7788\(97\)00053-4](https://doi.org/10.1016/s0378-7788(97)00053-4)
- Chalmers, P. (2015). Cambio climático: Implicaciones para los Edificios. Hallazgos claves del Quinto informe de evaluación del IPCC [Revisión del Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático]. *University of Cambridge*.
- Clarke, J., Strachan, P., & Pernot, C. E. E. (1993). Approach to the calibration of building energy simulation models. En: ASHRAE Transactions 99, 13.
- Coronato, T., Carril, A. F., Zaninelli, P. G., Giles, J., Ruscica, R., Falco, M., Sörensson, A. A., Fita, L., Li, L. Z. X., & Menéndez, C. G. (2020). The impact of soil moisture–atmosphere coupling on daily maximum surface temperatures in Southeastern South America. *Climate Dynamics*, 55, 2543–2556. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05399-9>
- Elias, S. A. (2017). Editor's Note. En: *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of the Anthropocene*, 1, 227–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809665-9.05958-9>
- Falco, M., Carril, A. F., Menéndez, C. G., Zaninelli, P. G., & Li, L. Z. X. (2019). Assessment of CORDEX simulations over South America: added value on seasonal climatology and resolution considerations. *Climate Dynamics*, 52, 4771–4786. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-018-4412-z>
- Flores-Larsen, S., Filippín, C., & Barea, G. (2019). Impact of climate change on energy use and bioclimatic design of residential buildings in the 21st century in Argentina. *Energy and Buildings*, 184, 216–229. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.12.015>
- Flores-Larsen, S., & Filippín, C. (2021). Energy efficiency, thermal resilience, and health during extreme heat events in low-income housing in Argentina. *Energy and Buildings*, 231, 110576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110576>
- Ganem, C., & Barea, G. (2021). A methodology for assessing the impact of climate change on building energy consumption. En: *Urban Microclimate Modelling for Comfort and Energy Studies*. Editorial Springer. ISBN 978-3-030-65420-7
- Jentsch, M. F., Bahaj, A. S., & James, P. A. B. (2008). Climate change future proofing of buildings—Generation and assessment of building simulation weather files. *Energy and Buildings*, 40(12), 2148–2168. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2008.06.005>
- Košir, M., & Pajek, L. (2017). BcChart v2.0 – A Tool for Bioclimatic Potential Evaluation. *Proceedings of SWC2017/SHC2017*.
- Košir, M. (2018). BcChart v2.1. *University of Ljubljana, Faculty of Civil and Geodetic Engineering*.
- Košir, M. (2019). Climate Change and Its Implications for Bioclimatic Design. En: *Climate Adaptability of Buildings*, 197–236. Springer International Publishing.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., & Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(3), 259–263. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2006/0130>
- Lacaze, Zampelli, Estayno, y Braude (2021). Tecnologías para la eficiencia energética residencial y la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. Criterios de política pública para su priorización y marco de propuestas para su desarrollo y adopción en el contexto argentino. *Documentos de Trabajo del CCE N° 14*. Consejo para el Cambio Estructural - Ministerio de Desarrollo Productivo de la Nación.
- Li, D. H. W., Yang, L., & Lam, J. C. (2012). Impact of climate change on energy use in the built environment in different climate zones – A review. *Energy*, 42(1), 103–112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.03.044>
- López-Franca, N., Zaninelli, P. G., Carril, A. F., Menéndez, C. G., & Sánchez, E. (2016). Changes in temperature extremes for 21st century scenarios over South America derived from a multi-model ensemble of regional climate models. *Climate Research*, 68(2–3), 151–167. DOI: <https://doi.org/10.3354/cr01393>
- Lorenz, R., Pitman, A. J., Donat, M. G., Hirsch, A. L., Kala, J., Kowalczyk, E. A., Law, R. M., & Srbinovsky, J. (2014). Representation of climate extreme indices in the ACCESS1.3b coupled atmosphere–land surface model. *Geoscientific Model Development*, 7(2), 545–567. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-7-545-2014>
- Naciones Unidas (ONU), *Acuerdo de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático* (UNFCCC), 12 Diciembre 2015.
- O'Neill, B. C., Tebaldi, C., van Vuuren, D. P., Eyring, V., Friedlingstein, P., Hurtt, G., Knutti, R., Kriegler, E., Lamarque, J.-F., Lowe, J., Meehl, G. A., Moss, R., Riahi, K., & Sanderson, B. M. (2016). The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6. *Geoscientific Model Development*, 9(9), 3461–3482. DOI: <https://doi.org/10.5194/gmd-9-3461-2016>
- Olgay, V. (1963). *Design with Climate: Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. Princeton University Press.
- Rubio-Bellido, C., Pulido-Arcas, J. A., & Ureta-Gragera, M. (2015). Aplicabilidad de estrategias genéricas de diseño pasivo en edificaciones bajo la influencia del cambio climático en Concepción y Santiago, Chile. *Revista Hábitat Sustentable*, 5(2), 33–41. Recuperado de: <https://revistas.ubiobio.cl/index.php/RHS/article/view/2106>
- Ruiz-González, M. A., & Mack-Vergara, Y. L. (2022). Indicadores de resiliencia y sostenibilidad para la vivienda urbana panameña frente al cambio climático. *Revista Hábitat Sustentable*, 12(2), 08–25. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2022.12.02.01>

Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Marrero Meléndez, M., Guevara-García, F. J., & Canivell, J. (2017). El control adaptativo en instalaciones existentes y su potencial en el contexto del cambio climático. *Revista Hábitat Sustentable*, 7(2), 06–17. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.01>

Servicio Meteorológico Nacional Argentino. (2022). *Informe especial n°3 por ola de calor / altas temperaturas temporada 2022-2023*.

Servicio Meteorológico Nacional Argentino. (2023a). *Informe especial n°5 por ola de calor / altas temperaturas temporada 2022-2023*.

Servicio Meteorológico Nacional Argentino. (2023b). *Informe especial n°8 por ola de calor / altas temperaturas temporada 2022-2023*.

Stone, K. A., Morgenstern, O., Karoly, D. J., Klekociuk, A. R., French, W. J., Abraham, N. L., & Schofield, R. (2016). Evaluation of the ACCESS – chemistry–climate model for the Southern Hemisphere. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(4), 2401–2415. DOI: <https://doi.org/10.5194/acp-16-2401-2016>

V., R. (2020). Una apuesta por la renovación urbana. *Ediciones EL PAÍS S.L.* [29 septiembre]. Recuperado de: <https://elpais.com/economia/2020-09-29/una-apuesta-por-la-renovacion-urbana.html>

Ziehn, T., Chamberlain, M. A., Law, R. M., Lenton, A., Bodman, R. W., Dix, M., Stevens, L., Wang, Y.-P., & Srbinovsky, J. (2020). The Australian Earth System Model: ACCESS-ESM1.5. *Journal of Southern Hemisphere Earth System Science*, 70(1), 193–214. DOI: <https://doi.org/10.1071/es19035>

ESTRATEGIAS DE SOSTENIBILIDAD ENFOCADAS AL CONFORT TÉRMICO Y LA ENERGIA INCORPORADA DE UNA VIVIENDA EMERGENTE EN LA REGIÓN ANDINA DEL ECUADOR

SUSTAINABILITY STRATEGIES FOCUSED ON THERMAL COMFORT AND EMBODIED ENERGY OF EMERGING HOUSING IN THE ANDEAN REGION OF ECUADOR

ESTRATÉGIAS DE SUSTENTABILIDADE FOCADAS NO CONFORTO TÉRMICO E NA ENERGIA INCORPORADA DE UMA HABITAÇÃO EMERGENTE NA REGIÃO ANDINA DO EQUADOR

Jefferson Torres-Quezada

Escuela de Arquitectura
Universidad Católica de Cuenca, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-1832-1369>
jefferson.torres@ucacue.edu.ec

Santiago Lituma-Saetama

Investigador independiente, Cuenca, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-8967-7645>
ssls_94@hotmail.es



RESUMEN

Ante los constantes desastres naturales de regiones andinas de Ecuador, se han planteado varias soluciones habitacionales, sin embargo, estas no consideran el confort térmico del usuario ni el impacto ambiental que generan. Esta investigación aborda esta problemática desde una perspectiva bioclimática a través de un modelo de vivienda emergente en un clima andino orientado a asegurar el confort térmico y reducir el impacto ambiental de la construcción. El análisis se enfoca en la temperatura interior y la Energía Incorporada Total (EI_T) del modelo de vivienda. La metodología se divide en la definición del modelo y las estrategias, por un lado y, por el otro, el análisis de estos parámetros a través de simulaciones y cálculos. Además, se realiza un análisis comparativo con otros estudios. Las estrategias definidas fueron la captación solar, masa térmica, compactidad, materiales locales-reciclados y la modulación. Los resultados muestran que el modelo planteado alcanza, de manera pasiva, las temperaturas de confort y la EI_T (2135.38 MJ/m²) es menor que la de otras viviendas de carácter social.

Palabras clave

masa térmica, habitabilidad, eco-arquitectura

ABSTRACT

Faced with the constant natural disasters in the Andean regions of Ecuador, several housing solutions have been proposed. However, these do not consider the user's thermal comfort or the environmental impact they generate. This research addresses this issue from a bioclimatic perspective through an emerging housing model in an Andean climate, oriented to ensuring thermal comfort and reducing the environmental impact of the construction. The analysis focuses on indoor temperature and the Total Embodied Energy (EE_T) of the housing model. The methodology is divided into the definition of the model and strategies, on one hand, and, on the other, the analysis of these parameters through simulations and calculations. In addition, a comparative analysis with other studies is carried out. The strategies defined were solar gain, thermal mass, compactness, local-recycled materials, and modulation. The results show that the proposed model passively reaches comfort temperatures, and that the EE_T (2135.38 MJ/m²) is lower than that of other social housing.

Keywords

thermal mass, habitability, eco-architecture

RESUMO

Diante dos constantes desastres naturais nas regiões andinas do Equador, várias soluções habitacionais foram propostas, mas elas não consideram o conforto térmico do usuário nem o impacto ambiental que geram. Esta pesquisa aborda esse problema a partir de uma perspectiva bioclimática por meio de um modelo de habitação emergente em um clima andino que visa garantir o conforto térmico e reduzir o impacto ambiental da construção. A análise se concentra na temperatura interna e na energia total incorporada (EI_T) do modelo de habitação. A metodologia é dividida, por um lado, na definição do modelo e das estratégias e, por outro, na análise desses parâmetros por meio de simulações e cálculos. Além disso, é realizada uma análise comparativa com outros estudos. As estratégias definidas foram ganho solar, massa térmica, compactidade, materiais reciclados localmente e modulação. Os resultados mostram que o modelo proposto atinge passivamente temperaturas de conforto e o EI_T (2135,38 MJ/m²) é menor do que o de outras habitações sociais.

Palavras-chave

massa térmica, habitabilidade, ecoarquitetura.

INTRODUCCIÓN

Los desastres naturales son una problemática incontrolable alrededor del mundo y han tenido un gran impacto en el ámbito social, económico y, por supuesto, en el medio construido. A partir de este contexto nace la Vivienda Emergente (VE), definida como una solución habitacional rápida y transitoria para solventar las necesidades de cobijo de personas damnificadas (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2018). Una de las zonas con el mayor índice de desastres naturales es la región interandina de Sudamérica, debido principalmente a aspectos geológicos y precipitaciones extremas (Marocco & Winter, 1997).

En la región Andina del Ecuador se han registrado numerosos desastres naturales en las últimas décadas. En 1993, el deslizamiento de la montaña Josefina-Azuay dejó 100 fallecidos, 5631 afectados y 1800 hectáreas de tierra agropecuaria destruida (Zevallos, 1994). En 1999, la erupción del volcán Pichincha provocó el desplazamiento de 2000 personas y contaminó el aire 200 km a la redonda (Álvarez & Avilés, 2012). La catástrofe más reciente fue el deslizamiento de tierra en Alausí-Chimborazo en marzo de 2023, el cual registró 32 personas fallecidas, 163 viviendas afectadas, 1034 personas damnificadas, 2.32 km de vías destruidas y 26ha de superficie agrícola afectadas (Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos, 2023).

Ante estas necesidades, distintas propuestas han sido planteadas principalmente a solventar requerimientos espaciales. No obstante, la situación post-desastre demanda mucho más que un enfoque espacial, siendo una de las insuficiencias más importantes la de la Vivienda Emergente (en adelante, VE), pues es la protección que tienen las personas ante las inclemencias climáticas (Espinosa & Cortés, 2015).

En el clima de esta región, cuyas temperaturas mínimas fluctúan por debajo de 9°Cel (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la República del Ecuador [INAMHI], 2017), dar solución a esta problemática térmica de la vivienda supone un gran desafío, puesto que se deben considerar también dificultades de bienestar físico-mental (Hughes et al., 2019), demanda energética (Andersen et al., 2017), y salud de sus ocupantes (Fonseca-Rodríguez et al., 2021). Esto hace que las soluciones habitacionales de VE deban tomar en consideración estrategias para solventar el desconfort térmico.

Varias instituciones han liderado proyectos de VE a través de prototipos que priorizan la facilidad de construcción (TECHO, 2020) por ser soluciones transitorias. Por esta razón, para su construcción optan por materiales livianos como tableros de aglomerados de madera y techos de zinc, los que no resuelven las carencias de confort interior en este clima. Además, estos prototipos se enfocan en

dar una solución habitacional transitoria, no obstante, en la mayor parte de los casos los damnificados lo han convertido en una vivienda permanente.

La recuperación de los damnificados después de un desastre natural es un proceso complejo que comienza desde la integración a un nuevo núcleo social hasta encontrar un terreno o edificación en donde construir o arrendar y, por supuesto, reestablecer su situación económica. Esto hace que, muchas veces, se vean obligados a convertir sus viviendas emergentes en permanentes (Lines et al., 2022).

Los prototipos de VE que consideran el aspecto térmico en su diseño y construcción se han implementado en varios países, sin embargo, estos no son completamente sostenibles, ya que muchos modelos se enfocan en el uso de calefacción y aislamiento para reducir las pérdidas en climas fríos y, en consecuencia, reducir la demanda operacional (Thonipara et al., 2019).

En relación con lo anterior, Hong (2016) plantea un prototipo de VE en Corea hecho de contenedores metálicos con aislamiento en paredes y techo y calefacción. Por su parte, Sinohara et al. (2014) analiza el confort térmico en tres tipos de VE en Japón con un factor-U bajo, los que, en invierno alcanzan una temperatura promedio entre 11-14°C. Esto responde a que no tienen un uso constante de calefacción por el alto costo que supone.

La reducción del factor-U de la envolvente es una estrategia y normativa globalizada para conseguir una vivienda sostenible (Gullbrekken et al., 2019). No obstante, otros estudios demuestran que la eficacia del aislamiento depende del contexto climático (Curado & Freitas, 2019) y puede ser reemplazado por la captación solar y la masa térmica (Santana Oliveira et al., 2022).

Aunque el uso de materiales aislantes en estos prototipos pueda asegurar el confort de los espacios, implica a su vez un alto impacto ambiental debido al elevado consumo de Energía Incorporada que estos suponen (Torres-Quezada et al., 2022). En cuanto al uso de materiales, el poliestireno expandido significa 127 MJ/kg (Azari & Abbasabadi, 2018), mientras que el ladrillo supone 2.52 MJ/kg (González Stumpf et al., 2014). En términos de vivienda, edificaciones con altos estándares de aislamiento, como el caso de Suecia, tienen una Energía Incorporada total (E_I) de 5530 MJ/m² (Thormark, 2002) y en Holanda, 6400 MJ/m² (Koezjakov et al., 2018). En Ecuador, por su parte, viviendas unifamiliares comunes tienen una E_I de 3600 MJ/m² (Torres-Quezada et al., 2022).

La preocupación por asegurar la habitabilidad de las VE en términos de confort térmico ha sido abordada en varios estudios alrededor del mundo, sin embargo, las investigaciones son escasas en climas andinos. Además, es necesario reflexionar que el tiempo de estancia que

tiene un damnificado en una VE varía de 0.5-5 años (Hong, 2016) y en muchos casos estas se convierten en viviendas permanentes (Lines et al., 2022).

Por tanto, este estudio aborda el déficit habitacional debido a desastres naturales desde una perspectiva sostenible, considerando las condiciones térmicas a través de estrategias pasivas y las repercusiones ambientales que supone su construcción. El objetivo se centra en evaluar el impacto de las estrategias pasivas aplicadas a un modelo de VE de tipo transitorio-permanente sobre la temperatura interior y la Energía Incorporada en una ciudad de la zona andina ecuatoriana.

METODOLOGÍA

La metodología aborda dos fases. En la primera, se definen las estrategias pasivas y el modelo a estudiarse. En la segunda, se realiza el análisis del desempeño térmico y del impacto ambiental de la propuesta a través del uso de simulaciones digitales y del Cálculo de la EI, respectivamente. Se ha tomado como caso de estudio la ciudad de Ambato, ubicada en la región Andina del Ecuador a una altitud de 2580 msnm (Figura 1).

La elección de esta ciudad se respalda, por un lado, porque su clima es característico de la región Andina del Ecuador, con bajas temperaturas, altas oscilaciones térmicas y una precipitación moderada (Figura 2). Por otro, su ubicación geográfica está en una zona bastante expuesta a desastres naturales (Secretaría de Gestión de Riesgos, 2018).

ESTRATEGIAS Y MODELO

En esta fase se han definido las estrategias pasivas en función del ábaco psicrométrico de Givoni (1969) (Figura 3), el cual ha sido utilizado en estudios previos para determinar estrategias bioclimáticas en otras regiones (Da Casa Martín et al., 2019). Para este análisis se ha utilizado el software Climate Consultant 6.0.15 (Climate Consultant, 2020) El archivo climático (EPW) utilizado en este software, y para las posteriores simulaciones térmicas, se obtuvo de climate.onebuilding.org (2020).

De acuerdo con esta información, Ambato permanece en disconfort térmico en la mayoría de las horas del año (8048), y solo el 8,1% de las horas anuales en confort. Los lineamientos más importantes que se definen son las ganancias internas, la calefacción y humidificación, ganancias directas solares y alta masa térmica.

En base a las estrategias, la bibliografía sobre la aplicación pasiva de las mismas demuestra que el uso del aislamiento para reducir las pérdidas de calor es la que tiene mayor promoción (Iwata et al., 2023). La estrategia que le sigue en importancia es el uso de la

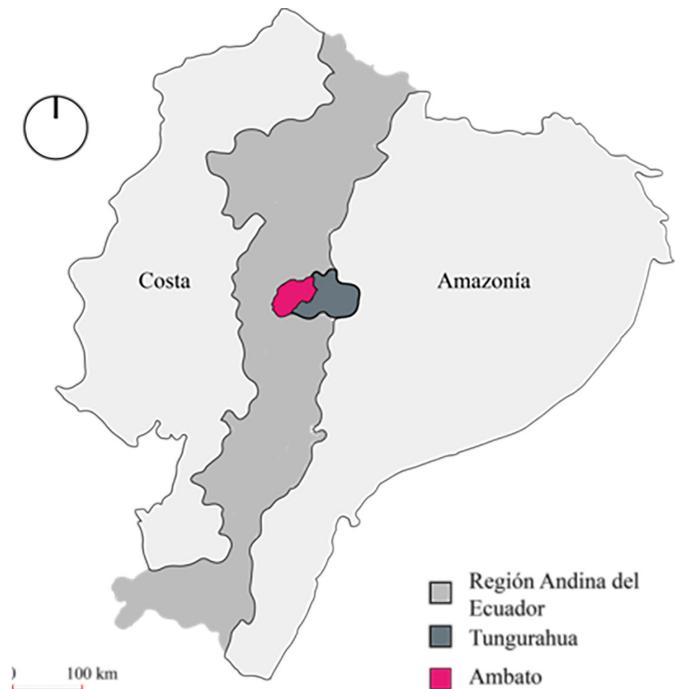


Figura 1: Ubicación de la ciudad de Ambato, zona andina de Ecuador. Fuente: Elaboración de los autores

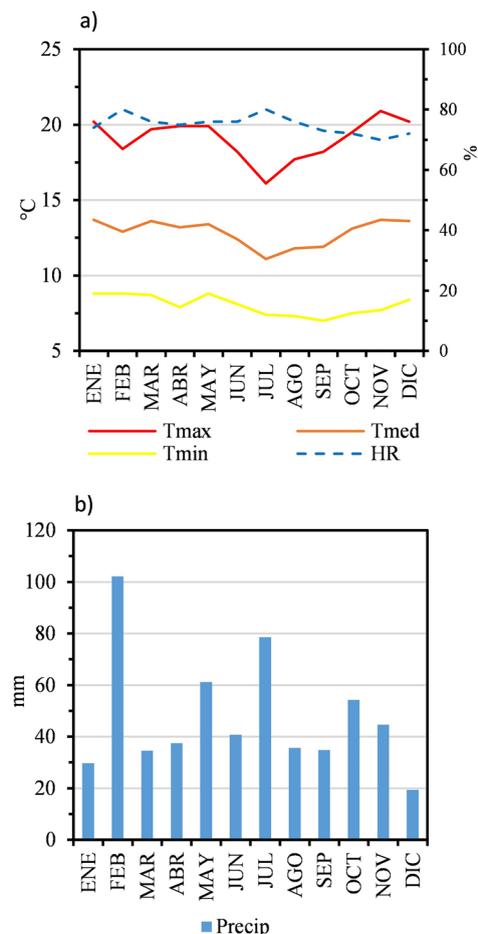


Figura 2: a) Humedad relativa (HR); Temperatura máxima (T_{max}), media (T_m) y mínima (T_{min}) promedio mensual y b) precipitación mensual de Ambato. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos obtenidos de INAMHI (2017)

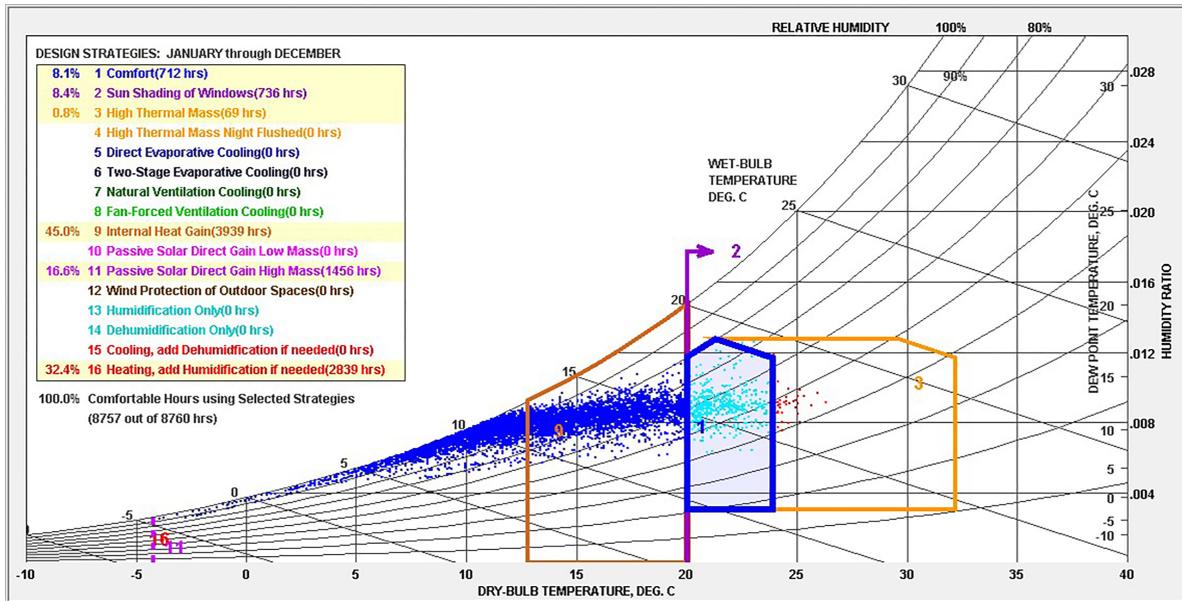


Figura 3: Ábaco psicrométrico de Givoni (1969) del clima de Ambato. Fuente: Elaboración de los autores en software Climate Consultant (2020)

Tabla 1: Estrategias del modelo de VE. Fuente: Elaboración de los autores

Estrategia	Descripción
Ganancias internas	La distribución interna prioriza espacios conjuntos para aprovechar el calor por cocción, usuarios e iluminación.
Aportes solares	Los vanos se orientan a este y oeste con porcentaje de apertura del 30%, lo que permite captar radiación solar en el día y controlar las pérdidas de calor en la noche.
Masa térmica	Muros este y oeste con alta masa térmica
Aislamiento	Cámara de aire en paredes norte y sur, en cubierta y piso.
Orientación	Fachadas más largas hacia este y oeste.
Compacidad	Las viviendas se agrupan en pares para reducir la superficie de contacto con el exterior.
Infiltraciones	Menor cantidad de vanos en la envolvente.

cámara de aire para reducir la transmitancia térmica de la envolvente (O’Hegarty et al., 2021). Cabe destacar que este estudio se enfoca en la minimizar el uso de materiales de aislamiento para disminuir el impacto ambiental.

En cuanto a las ganancias internas y a la calefacción, la bibliografía destaca los aportes hechos por personas y equipos (Zhou et al., 2019). Por último, Curado & Freitas (2019) plantean las ganancias solares como estrategia fundamental para aportes directos e indirectos. Adicional a las estrategias dadas por el ábaco de Givoni (1969), se destaca la aplicación de un intercambiador de calor aire-tierra, denominado el muro trombe o el muro verde (Dabaieh & Serageldin, 2020).

La única estrategia utilizada para este estudio fue la

compacidad (García Mitjans, 2022), dado que las otras suponen una inversión y mantenimiento muy alto. Todas estas estrategias se resumen en la Tabla 1.

A continuación, se investigó sobre los materiales de bajo impacto ambiental y los sistemas constructivos vernáculos más representativos en esta región. Torres-Quezada & Torres-Avilés (2023a) determinaron que el hormigón y el metal son los materiales de la región Andina con mayor impacto en la energía incorporada total de la vivienda en las últimas 4 décadas. Además, este estudio evidencia que los materiales de acabados como enlucido de cemento, porcelanato, madera laminada o acero inoxidable, también tienen un alto impacto ambiental. Otro punto importante es que el uso excesivo del vidrio puede llegar a incrementar drásticamente la EI de la vivienda, lo cual,

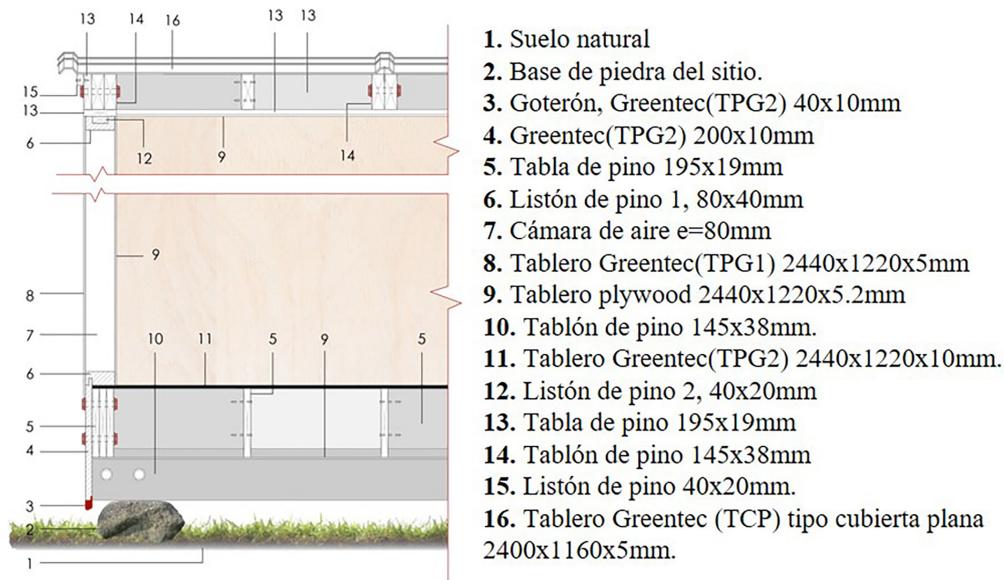


Figura 4: Sección constructiva del modelo. Fuente: Elaboración de los autores

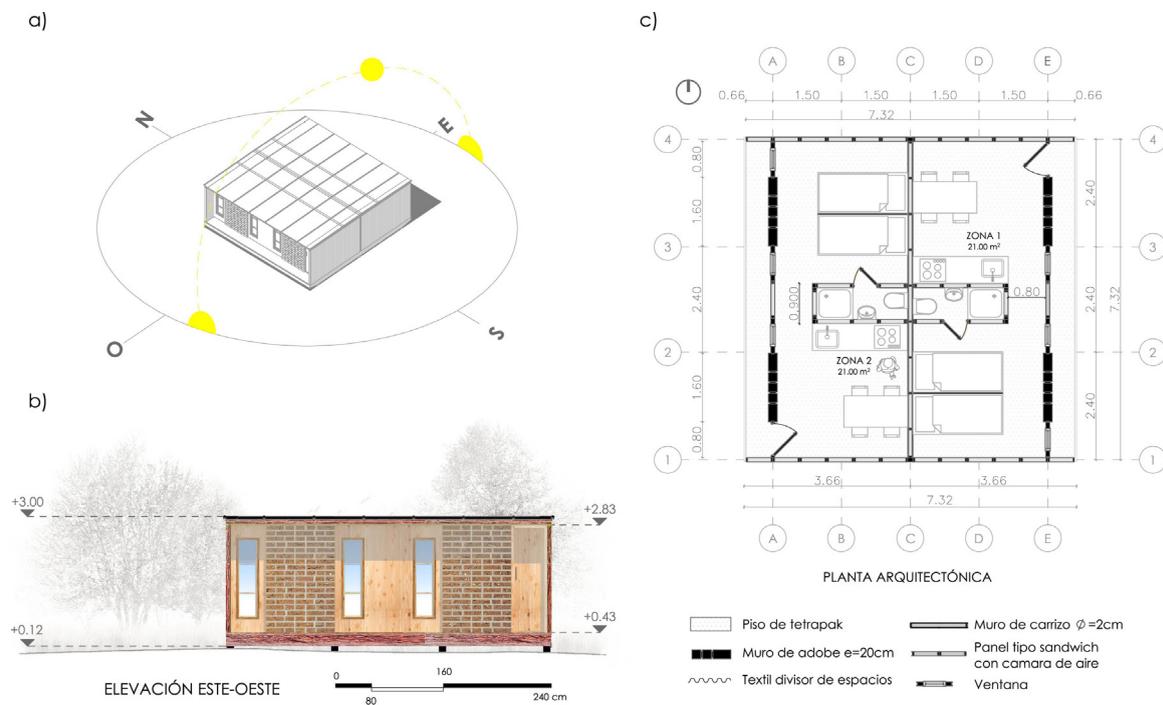


Figura 5: a) volumen, b) elevación este-oeste y c) planta arquitectónica del modelo. Fuente: Elaboración de los autores

a su vez, reduce su masa térmica provocando menores temperaturas y mayores oscilaciones térmicas (Torres-Quezada & Torres-Avilés, 2023b).

Por otra parte, otros estudios resaltan la importancia del uso de materiales reciclados para la construcción de VE (Arslan, 2007; Arslan & Cosgun, 2008). Las consideraciones más importantes de estos estudios son el uso de materiales de origen natural o reciclados como la tierra, la madera o poli-aluminio reciclado. Los materiales naturales son parte fundamental en la arquitectura vernácula del Ecuador (Yépez, 2012), los cuales reducen

el impacto ambiental de las viviendas (Rodríguez et al., 2021).

A partir de estos estudios se definieron las características específicas del sistema constructivo del prototipo planteado (Figura 4).

El modelo de VE andino se basa en lo siguiente: las paredes norte y sur están conformadas por un panel sandwich, la capa exterior es un tablero tipo Greentec de poli-aluminio (TPG1) y la interior es un tablero plywood, separadas por una cámara de aire. El piso contiene

Tabla 2: Parámetros de simulación. Fuente: Elaboración de los autores a partir de DesignBuilder (2016)

Elemento	Material	Espesor (mm)	λ (W/mK)	U(W/m2K)
Piso	Greentec_TPG2	10	0.50	
	Cámara de aire	200		2.15
	Plywood	5.2	0.15	
Pared norte/sur	Greentec_TPG1	5	0.50	
	Aire	80		2.20
	Plywood	5.2	0.15	
Pared este/oeste	Adobe	200	0.17	0.76
	Plywood	5.2	0.15	
Pared interior	Aire	80		2.08
	Plywood	5.2	0.15	
	Ventanas	Vidrio simple	4	0.90
Cubierta	Greentec tipo plano	5	0.50	
	Cámara de aire	100		2.20
	Plywood	5.2	0.15	
Características generales de simulación				
	Latitud/Longitud		-1.24908/-78.61675	
	Altitud		2597 msnm	
	Superficie		53.58m ²	
	Ocupación		0.15 personas/m ²	
	Infiltraciones		1.5 ren/h (constante)	
	Iluminación		2W/m ² (18-22h)	
	Cocina		3W/m ² (7-8h/12-13h/18-19h)	

un tablero TPG2 al interior y un tablero plywood en el interior, con una cámara de aire entre ellos. La superficie de la envolvente de mayor preocupación en el aspecto térmico fue la cubierta, dado que es por donde se dan las mayores pérdidas de calor (Torres-Quezada et al., 2018). Por lo tanto, la cubierta tiene un tablero tipo plano de poli-aluminio (TCP) en el exterior y plywood en el interior que funciona como cielo raso, separados por una cámara de aire. Respecto a las paredes este y oeste, se ha usado el adobe para incrementar la masa térmica del modelo. Por último, las ventanas son de vidrio simple de 4mm con marcos de madera.

En cuanto a las características morfológicas, la propuesta combina 2 espacios habitables que corresponden a la Zona 1 (Z1) y Zona 2 (Z2), cada uno destinado a una familia. La morfología se basa en módulos de 2.40x1.20m,

los cuales son las unidades modulares comerciales de los paneles. La modulación como base del diseño evitará los desperdicios de materiales y, por ende, reducirá el impacto ambiental.

Referente a la distribución interior, con el propósito de aprovechar las ganancias internas, todos los espacios se han vinculado alrededor de la cocina. Junto a este espacio se coloca el baño, el cual tiene su acceso desde el área de descanso (Figura 5).

De esta manera, el prototipo se concibe como un espacio habitable a corto y largo plazo que contempla un muro de adobe que no es un sistema constructivo de rápida construcción, pero que su inclusión solventa aspectos térmicos que deben ser considerados en VE. Según esto, y dado su diseño modular, el modelo permite

Tabla 3: Especificaciones y cantidades de los materiales utilizados. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos obtenidos de: [1]:Vázquez, (2001); [2]: Shukla et al., (2009); [3]: ECUAPLASTIC (2021); [4] Hammond & Jones (2008) [5]: EDIMCA (2021); [6]: González Stumpf et al., (2014); [7]: TECNICGLASS (2021)

* el *EI* del poli-aluminio se ha obtenido en función de los valores ponderados de polietileno (89.96 MJ/kg) y aluminio (108.6 MJ/kg) reciclado al 50%, los cuales tienen una proporción del 80% y 20% respectivamente.

Producto	P/u (kg)	Cantidad (u)	EI (MJ/kg)
Adobe	9.6 [1]	266	0.97[2]
TCP*	14.30 [3]	28	93.69[4]
TPG1*	15 [3]	12	93.69[4]
TPG2*	27.4 [3]	18	93.69[4]
Tablón	10.91 [5]	57	1.5[6]
Tabla 1[3]	7.34 [5]	118	1.5[6]
Tabla 2[3]	3.57 [5]	14	1.5[6]
Listón 1[3]	3.68 [5]	120	1.5[6]
Listón 2[3]	0.92 [5]	39	1.5[6]
Tablero plywood [3]	7.66 [5]	63	15[4]
Plancha de Vidrio[4]	10.8 [7]	6	16.81[4]

transformarse en unidades habitacionales con mayor superficie y con capacidad de albergar a más usuarios por tiempos prolongados.

CONFIGURACIÓN Y CÁLCULO DEL MODELO

SIMULACIONES TÉRMICAS

Para analizar el comportamiento térmico interior del modelo y evaluar la efectividad de las estrategias planteadas, se utiliza el software Design Builder con su motor de cálculo Energy Plus (DesignBuilder, 2016). Para esta evaluación se ha tomado la temperatura del aire interior (T_{ai}) como parámetro de referencia.

Como primer paso, se han configurado los inputs climáticos y las características del modelo. El archivo climático¹ de la ciudad de estudio fue obtenido de climate.onebuilding.org (2020).

Posterior a ello, se han definido las características térmicas de todos los materiales que componen los elementos de la envolvente. Además, se establecen las posibles infiltraciones exteriores, la ocupación y las fuentes de cargas internas. Las infiltraciones se han definido a partir de Torres-Quezada et al. (2019), donde se estipulan los valores aproximados de acuerdo con las características constructivas de las viviendas en Ecuador. Todos estos parámetros se detallan en la Tabla 2.

A continuación, se han escogido dos días de análisis con el propósito de representar de manera precisa las condiciones climáticas promedio (Día Promedio) y las condiciones de frío promedio (Día Extremo) en la ciudad

objeto de estudio. Estos días se han determinado a partir de los valores de temperatura exterior obtenidos de INAMHI (2017).

Para el Día Promedio, se ha considerado una temperatura media de 12.5°C, acompañada de valores máximos y mínimos de 17.9°C y 8.45°C, respectivamente. En el caso del Día Extremo, se ha seleccionado la temperatura promedio más baja registrada mensualmente durante el transcurso del año (11°C), junto con una temperatura máxima de 16.23°C y una temperatura mínima de 6.82°C.

Una vez obtenidos estos datos, se procedió a elegir dos días del archivo climático de simulación que se ajustaran a dichos valores. En consecuencia, se escogieron el 08/03 (Día Promedio) y el 09/08 (Día Extremo) como los días de simulación correspondientes.

Finalmente, los resultados térmicos serán analizados en comparación con el rango de confort (18-26°C) establecido por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (2011).

CÁLCULOS DE ENERGÍA INCORPORADA

Para evaluar el impacto ambiental de la propuesta, se toma como parámetro la Energía Incorporada de los materiales (EI), la cual corresponde a la energía que requiere cada material para producir una unidad de peso (Kumar et al., 2022). De manera específica, en este estudio se analiza el valor total de EI de cada material y el valor total del modelo (EI_t). Adicionalmente, para realizar comparaciones con otros estudios, EI_t se relaciona con el área total de construcción (MJ/m^2).

Para obtener el EI_T (MJ) de la vivienda se utiliza la ecuación 1, la cual implica la sumatoria de EI_T de cada uno de los materiales.

$$EI_T = \sum(EI \times P) \dots\dots\dots(\text{Ecuación 1})$$

Donde EI es la energía incorporada específica de cada material (MJ/kg) con un enfoque de cálculo de la Cuna a la puerta, con excepción de la madera que tiene un enfoque de la Cuna al sitio. P es el peso total de cada material (kg), que se obtiene de la multiplicación del peso por unidad de cada material por el número total de piezas utilizadas en el modelo. Las especificaciones y cantidades de cada uno de los materiales se muestran en la Tabla 3

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

SIMULACIONES TÉRMICAS

En la Figura 6 se muestran los resultados de la temperatura del aire interior (T_{ai}) de Z1 y Z2, y la temperatura del aire exterior (T_e) en el Día Promedio. Además, se ha graficado el rango de confort (18-26°C). Por una parte, en Z1, la T_{ai} promedio es de 22.2°C con una oscilación diaria de 6.1°C, con una T_{ai} mínima de 19.2°C (6h00) y una T_{ai} máxima de 25.3°C (19h00). Por otra parte, en Z2 se determina que la T_{ai} promedio es de 23.3 °C. La oscilación diaria es de 7.4°C con una T_{ai} mínima de 19.9 °C (6h00) y una T_{ai} máxima de 27.3°C (20h00).

Conforme a estos resultados, la T_{ai} de Z1 se mantiene dentro del rango de confort durante todo el día. Asimismo, en Z2 no se presentan temperaturas de disconfort térmico, salvo entre las 17-21h00. En este lapso, la T_{ai} de Z2 está 1.3°C sobre el rango de confort.

Para entender en detalle las estrategias planteadas y los resultados mostrados, la Figura 7 señala los flujos de calor en Z1 y Z2 analizados en el Día Promedio.

La T_{ai} máxima en las dos zonas evidencia un retraso aproximado de 6 horas con respecto a T_e . Este retraso está influenciado principalmente por la masa térmica de las paredes de adobe, junto con los aportes de iluminación y cocción y, en el caso de Z2, por la captación solar directa por ventanas.

La T_{ai} mínima en Z1 y Z2 se mantiene alrededor de los 20°C, lo cual refleja la eficacia de las estrategias planteadas en la envolvente vertical y horizontal. Las pérdidas por cubierta y pisos son mínimas durante el día. Las mayores pérdidas se dan por los muros, principalmente debido a las paredes norte y sur. Por el contrario, la influencia del muro este en Z1 y el muro oeste en Z2 hacen que las pérdidas se reduzcan a partir de las 16h.

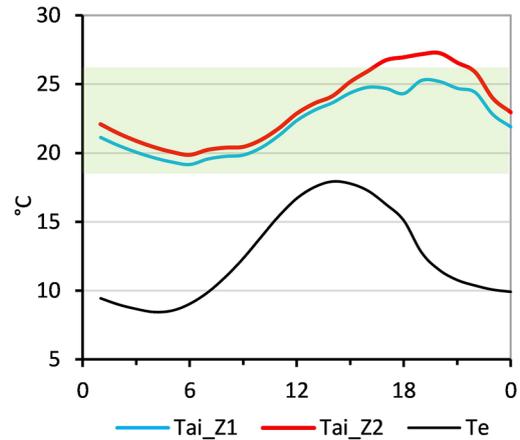


Figura 6: T_{ai} de Z1 y Z2, y T_e en el Día Promedio. Fuente: Elaboración de los autores

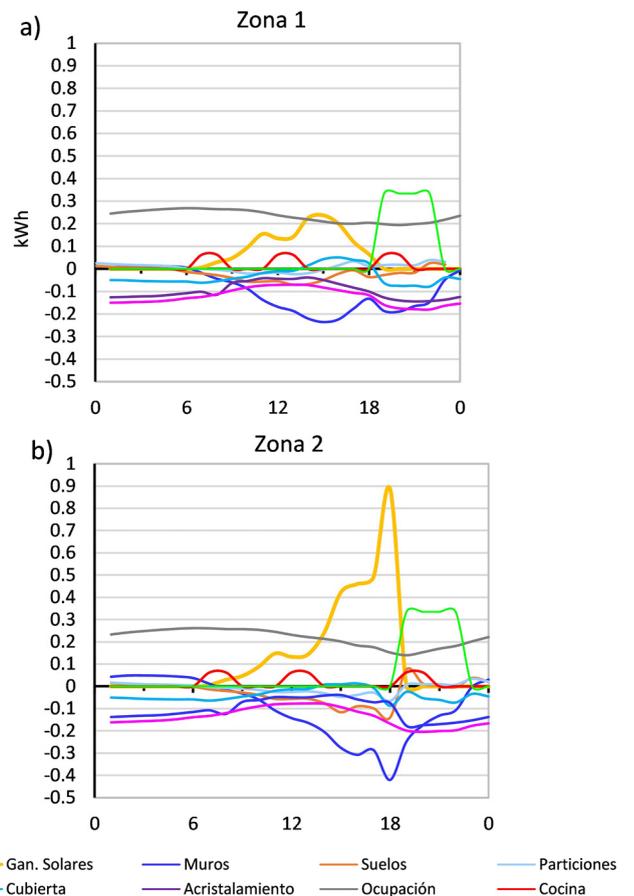


Figura 7: Flujos de calor de Z1 (a) y Z2 (b) en el Día Promedio. Fuente: Elaboración de los autores

Este flujo se reduce y se mantiene muy cercano a 0 hasta las 08h00, incluso en Z2 llega a ser positivo. Por último, el flujo de calor por particiones es muy cercano a 0 kWh durante todo el día, lo cual responde a que estas paredes intercambian calor con las zonas contiguas, y no con el exterior.

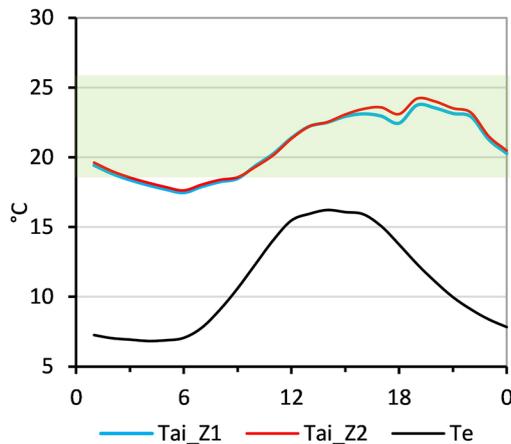


Figura 8: T_{ai} de la Z1 y Z2 y T_e en el Día Extremo. Fuente: Elaboración de los autores

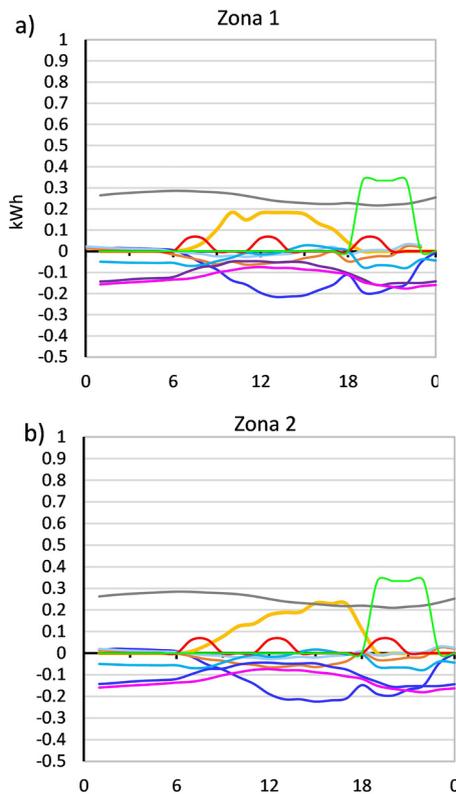


Figura 9: Flujos de calor de Z1 (a) y Z2 (b) en el Día Extremo. Fuente: Elaboración de los autores

Por otra parte, en el Día Extremo (Figura 8), la T_{ai} promedio de Z1 es de 20.7°C, con una T_{ai} mínima de 17.5°C y una T_{ai} máxima de 23.7°C. La T_{ai} de Z1 y Z2 se encuentran dentro del rango de confort, con excepción de pocas horas nocturnas, sin embargo, está solo 0.5°C por debajo del rango de confort.

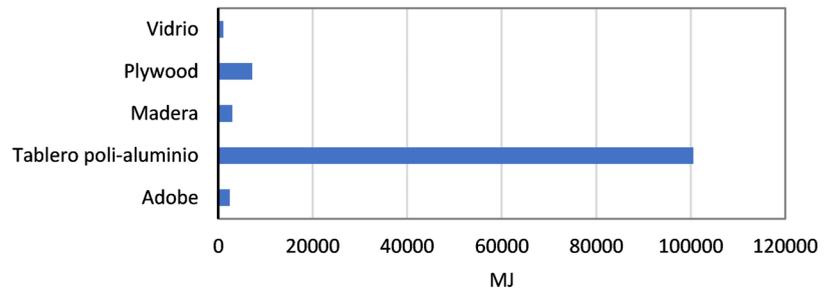


Figura 10: EI_t de los materiales empleados en el modelo andino. Fuente: Elaboración de los autores

Al contrario del Día Promedio, la T_{ai} máxima no sobrepasa el límite superior y la oscilación térmica es menor. Nuevamente, la T_{ai} máxima muestra un retraso aproximadamente de 6 horas, lo cual está influenciado principalmente por la masa térmica de las paredes este y oeste y por los aportes de iluminación, cocción y captación solar. Esta última es mucho menor que en el Día Promedio, dado que en el Día Extremo la mayor parte de radiación solar es difusa (Figura 9).

Finalmente, la T_{ai} mínima llega hasta los 17.5°C, la cual es menor a la del Día Promedio. No obstante, se mantiene dentro del rango de confort.

Si comparamos estos resultados con otros estudios de VE mencionados previamente, las viviendas emergentes en otras regiones tienden a utilizar, como en el caso de Corea, el aislamiento y la calefacción para alcanzar el confort térmico (Hong, 2016), o bien, si es que uno de estos no se utiliza, existirá desconfort térmico, como lo visto en Japón (Sinohara et al., 2014). En el caso de la región andina ecuatoriana, el presente estudio evidencia que existen otras estrategias para alcanzar una T_{ai} de 24°C, por lo que seguir modelos como los de Corea y Japón implicaría un gasto económico y ambiental innecesario.

CÁLCULOS ENERGÍA INCORPORADA

La Figura 10 muestra la EI_t de cada uno de los materiales utilizados en el modelo. La mayor cantidad de EI_t se encuentra en los tableros de poli-aluminio con 100586 MJ, seguido del plywood y la madera con 7239 MJ y 3023 MJ, respectivamente. En último lugar está el vidrio y el adobe. Cabe destacar que el vidrio, aun con el poco porcentaje utilizado, tiene casi el mismo valor que el adobe, el cual es mucho más representativo en el modelo. La EI_t de toda la vivienda es de 114414 MJ.

Con el propósito de realizar un análisis comparativo, la Figura 11 muestra el valor de EI_t relacionado con el área total de la vivienda (53.58m²), en conjunto con los valores de otras viviendas de carácter social en climas andinos

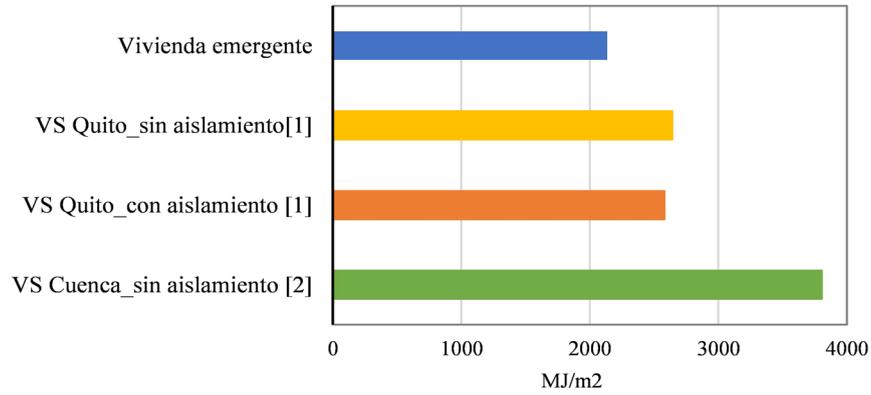


Figura 11: EI_T del modelo planteado, y EI_T de viviendas de carácter social en Ecuador. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos obtenidos de: [1]: Macias et al. (2017), [2]: Torres-Quezada & Torres-Avilés (2023a)

Tabla 4: Características de vivienda de carácter social en Ecuador. Fuente: Elaboración de los autores a partir de datos obtenidos de: [1]: Macias et al. (2017), [2]: Torres-Quezada & Torres-Avilés (2023b)

Vivienda	Paredes	Cubierta	Área (m²)
VS_Quito_sin aislamiento [1]	hormigón de 10 cm	Galvalume	55
VS_Quito_con aislamiento [1]	tipo sándwich, tableros de fibrocemento y 8 cm Poliestireno expandido	Galvalume	55
VS_Cuenca_sin aislamiento [2]	Bloque de hormigón enlucido	Fibrocemento	60

ecuatorianos. Se ha escogido esta tipología dada la carencia de datos locales de VE.

La Tabla 4 muestra las características de las viviendas utilizadas para el análisis comparativo.

Los resultados muestran que el modelo propuesto tiene una EI_T de 2135.38 MJ/m², la cual es menor a la energía gastada por las viviendas sociales de Quito y Cuenca. En el caso de la VS sin aislamiento de Quito, esta cuenta con 2640 MJ/m², mientras que la VS con aislamiento es de 2580 MJ/m². La vivienda construida en Cuenca cuenta con una EI_T de 3806 MJ/m².

Según lo expuesto, se observa que la diferencia más significativa se manifiesta en la vivienda construida en Cuenca (1671 MJ/m²), la cual cuenta con paredes de bloque de hormigón que incrementan en gran medida su EI_T . En contraste, con las viviendas de Quito se registra una diferencia de 505 MJ/m² con las desprovistas de aislamiento y de 445 MJ/m² con la que posee aislamiento.

Estos datos muestran que la vivienda sin aislamiento tiene una mayor EI_T que la vivienda con aislamiento, debido a que la primera tiene un sistema construido de paredes de hormigón, lo cual eleva significativamente su EI_T . Cabe mencionar que en estas viviendas no se han considerado las puertas, pisos o ventanas para el cálculo.

Este análisis comparativo muestra el alto impacto que

tiene el uso de materiales aislantes y los industrializados en el incremento de la EI_T . En el prototipo planteado, el poli-aluminio es el material con mayor impacto, aun cuando es reciclado. Esto implica que su uso excesivo es contraproducente, sin embargo, es escogido por su fácil mantenimiento y durabilidad ante las condiciones climáticas de la región.

CONCLUSIÓN

A partir de este estudio, se puede concluir que las estrategias pasivas planteadas, es decir, la captación solar directa, la masa térmica, la compacidad y el aprovechamiento de ganancias internas, son eficaces para que una VE alcance el confort en un Día Promedio (23.5°C) y Extremo (21.8°C) en el clima Andino. Tanto los resultados obtenidos, como la temperatura mínima (18°C aprox), destacan que el uso de aislamiento en este clima no es necesario, pues puede ser sustituido por una cámara de aire.

Por otra parte, se logra determinar que la EI_T del sistema de construcción planteado es menor que la registrada en otros prototipos de carácter social con estándares de eficiencia energética. Este modelo representa el 60% de una vivienda social en Ecuador.

Los tableros de poli-aluminio usados en el modelo, si bien son fabricados a partir de material reciclado,

estos tienen altos niveles de energía incorporada dado que el porcentaje que se recicla no es alto y, además, el polietileno y aluminio reutilizado requieren una gran cantidad de energía para su producción. Esto abre una rama de investigación sobre la eficacia del reciclaje de estos y otros materiales en los sistemas constructivos.

Finalmente, esta investigación resalta que el uso de estrategias pasivas en la región Andina del Ecuador puede ser suficiente para alcanzar la habitabilidad térmica, reducir el impacto ambiental y, más importante aún, reducir tanto el uso de materiales innecesarios como el valor económico del prototipo. Los resultados en este estudio pueden ponerse en práctica y promover la colaboración de mano de obra local para su construcción, ya que integra sistemas constructivos vernaculares y otros de fácil instalación.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por la Universidad Católica de Cuenca-PROYECTO DAMA-215543.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Álvarez, M. & Avilés, J. (2012). *Ceniza Volcánica: Un nuevo Agente de Contaminación Química*. Unidad de Preparación para desastres Químicos, Ministerio de Salud Pública, 5.

Andersen, M., Discoli, C. A., Viegas, G. M. & Martini, I. (2017). Monitoreo energético y estrategias de RETROFIT para viviendas sociales en clima frío. *Hábitat Sustentable*, 7(2), 50-63. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2017.07.02.05>

Arslan, H. (2007). Re-design, re-use and recycle of temporary houses. *Building and Environment*, 42(1), 400-406. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.07.032>

Arslan, H. & Cosgun, N. (2008). Reuse and recycle potentials of the temporary houses after occupancy: Example of Duzce, Turkey. *Building and Environment*, 43(5), 702-709. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.051>

Azari, R. & Abbasabadi, N. (2018). Embodied energy of buildings: A review of data, methods, challenges, and research trends. *Energy and Buildings*, 168, 225-235. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.03.003>

CLIMATE CONSULTANT. (2021). Climate consultant software (6.0.15). Windows. Informe technologies.

CLIMATE.ONEBUILDING.ORG (2020). *Repository of free climate data for building performance simulation*. Recuperado de: https://climate.onebuilding.org/WMO_Region_3_South_America/ECU_Ecuador/index.html

Curado, A. & De Freitas, V.P. (2019). Influence of thermal insulation of facades on the performance of retrofitted social housing buildings in Southern European countries. *Sustainable Cities and Society*, 48, 101534. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101534>

Dabaieh, M. & Serageldin, A. A. (2020). Earth air heat exchanger, Trombe wall and green wall for passive heating and cooling in premium passive refugee house in Sweden. *Energy Conversion and Management*, 209, 112555. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112555>

Da Casa Martín, F., Celis D'Amico, F. & Echeverría Valiente, E. (2019). Metodología para elaborar una cartografía regional y aplicar estrategias bioclimáticas según la Carta de Givoni. *Hábitat Sustentable*, 9(2), 52-63. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.05>

DESIGNBUILDER (2016). DesignBuilder+EnergyPlus software (4.5.0.148). UK: DesignBuilder.

Dirección de Monitoreo de Eventos Adversos (2023). SitRep No.18-Deslizamiento Casual-Alausí: Informe de situación Nacional. Recuperado de: <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/informes-de-situacion-actual-por-eventos-adversosecuador/>

ECUAPLASTIC.(2021). Ecopak. Cubiertas y tableros ecológicos_ Greentec. Recuperado de: <https://ecuaplastic.com/index.php/productos/ecopak/14-productos/ecopak/71-greentec>

EDIMCA. (2021). *Sección de productos Edimca*. Recuperado de: <https://edimca.com.ec/productos-y-herrajes-de-madera.html>

Espinosa, C. F. & Cortés, A. (2015). Confort higro-térmico en vivienda social y la percepción del habitante. *Revista INVI*, 30(85), 227-242. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-83582015000300008>

Fonseca-Rodríguez, O., Sheridan, S., Häggström, E. & Schumann, B. (2021). Effect of extreme hot and cold weather on cause-specific hospitalizations in Sweden: A time series analysis. *Environmental Research*, 193, 110535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110535>

García Mitjans, S. M. (2022). *Influencia de la tipología edificatoria y la morfología urbana en la demanda energética de la vivienda plurifamiliar en Barcelona* [Proyecto Final de Máster Oficial]. UPC, Escola Tècnica Superior d'Arquitectura de Barcelona. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2117/375334>

Givoni, B. (1969). *Climate and architecture*. Amsterdam; London; New York: Ed. Elsevier.

González Stumpf, M. A., Kulakowski, M. P., Breitenbach, L. G. & Kirch, F. (2014). A case study about embodied energy in concrete and structural masonry buildings. *Revista de la Construcción*, 13(2), 9-14. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-915x2014000200001>

Gullbrekken, L., Grynning, S. & Gaarder, J. E. (2019). Thermal Performance of Insulated Constructions—Experimental Studies. *Buildings*, 9(2), 49. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings9020049>

Hammond, G. & Jones, C. (2008). *Inventory of carbon & energy [ICE] Version 1.6a*. Recuperado de: <https://perigordvacance.typepad.com/files/inventoryofcarbonandenergy.pdf>

Hong, Y. (2016). A study on the condition of temporary housing following disasters: Focus on container houses. *Frontiers of Architectural Research*, 6(3), 374-383. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foar.2017.04.005>

Hughes, C., Natarajan, S., Liu, C., Chung, W. J. & Herrera, M. (2019). Winter thermal comfort and health in the elderly. *Energy Policy*, 134, 110954. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.110954>

Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología de la República del Ecuador [INAMHI]. (2017). *Anuario meteorológico N° 53-2013* (J. Olmedo, Ed.). Recuperado de: https://www.inamhi.gob.ec/docum_institucion/anuarios/meteorologicos/Am_2013.pdf

Iwata, T., Harada, E. & Maly, E. (2023). Towards improving provision of wooden temporary housing: Analysis of repairs of temporary housing built by local contractors after the Great East Japan Earthquake. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 86, 103537. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2023.103537>

Lines, R., Faure Walker, J.P. & Yore, R. (2022). Progression through emergency and temporary shelter, transitional housing and permanent housing: A longitudinal case study from the 2018 Lombok earthquake Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 75, 102959. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102959>

Koezjakov, A., Urge-Vorsatz, D., Crijns-Graus, W. & Van Den Broek, M. (2018). The relationship between operational energy demand and embodied energy in Dutch residential buildings. *Energy and Buildings*, 165, 233-245. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.01.036>

Kumar, P. P., Venkatraj, V. & Dixit, M. K. (2022). Evaluating the temporal representativeness of embodied energy data: A case study of higher education buildings. *Energy and Buildings*, 254, 111596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111596>

Macias, J., Iturburu, L., Rodriguez, C., Agdas, D., Boero, A. & Soriano, G. (2017). Embodied and operational energy assessment of different construction methods employed on social interest dwellings in Ecuador. *Energy and Buildings*, 151, 107-120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.016>

Marocco, R., & Winter, T. (1997). Bosquejo de la evolución geodinámica del Ecuador. En Alain Winckell (Ed.), *Geografía básica del Ecuador : 4. Geografía física : 1. Las condiciones del medio natural : los paisajes naturales del Ecuador*, 15-52. CEDIG. Recuperado de: https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers16-09/010022382.pdf

MINISTERIO DE DESARROLLO URBANO Y VIVIENDA (2011). Eficiencia energética en la construcción en Ecuador. *Norma Ecuatoriana de La Construcción NEC-11*.

O'Hegarly, R., Kinnane, O., Lennon, D. & Colclough, S. (2021). In-situ U-value monitoring of highly insulated building envelopes: Review and experimental investigation. *Energy*

and Buildings, 252, 111447. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111447>

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. *Revista RedCA*, 3(9), 158-181. DOI: <https://doi.org/10.36677/redca.v3i9.15866>

Santana Oliveira, B., Torres-Quezada, J., Coch, H. & Isalgue, A. (2022). Monitoring and Calculation Study in Mediterranean Residential Spaces: Thermal Performance Comparison for the Winter Season. *Buildings*, 12(3), 325. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings12030325>

Secretaría De Gestión De Riesgos. (2018). *Plan nacional de respuesta ante desastres*. Recuperado de <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2018/08/Plan-Nacional-de-Respuesta-SGR-RespondeEC.pdf>

Shukla, A., Tiwari, G. N. & Sodha, M. S. (2009). Embodied Energy analysis of adobe house. *Renewable Energy*, 34(3), 775-761. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.04.002>

Sinohara, N., Tokumara, M., Kazama, M., Yonemoto, Y., Yoshioka, M., Kagi, N., Hasegawa, K., Yoshino, H. & Yanagi, U. (2014). Indoor air quality and thermal comfort in temporary houses occupied after the Great East Japan Earthquake. *Indoor air*, 24(4), 425-437. DOI: <https://doi.org/10.1111/ina.12082>

TECHO. (2020). *Techo Memoria 2020*. Recuperado de: https://techo.org/wp-content/uploads/2021/11/TECHO-MEMORIA-2020-2_compressed.pdf

TECNICGLASS. (2021). Tecnicglass. Solutions for Glazing and Glass Industry: *Cuanto pesa un Vidrio - Formula para calcular el peso de un vidrio*. Recuperado de: <https://tecnicglass.com/consejos/cuanto-pesa-un-vidrio/>

Thonipara, A., Runst, P., Ochsner, C. & Bizer, K. (2019). Energy efficiency of residential buildings in the European Union—An exploratory analysis of cross-country consumption patterns. *Energy Policy*, 129, 1156-1167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.03.003>

Thormark, C. (2002). A low energy building in a life cycle—its embodied energy, energy need for operation and recycling potential. *Building and Environment*, 37(4), 429-435. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0360-1323\(01\)00033-6](https://doi.org/10.1016/s0360-1323(01)00033-6)

Torres-Quezada, J., Coch, H. & Isalgué, A. (2019). Assessment of the reflectivity and emissivity impact on light metal roofs thermal behaviour, in warm and humid climate. *Energy and Buildings*, 188-189, 200-208. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.022>

Torres-Quezada, J. Coch Roura, H., Isalgué Buxeda, A. & López Besora, J. (2018). The roof Impact on the heat balance of low height buildings at low latitudes. *PLEA 2018: Smart and Healthy Within the Two-Degree Limit: proceedings of the 34th International Conference on Passive and Low Energy Architecture*: Dec 10-12, 2018 Hong Kong, China (pp. 937-938). The Chinese University of Hong Kong. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2117/129130>

Torres-Quezada, J. & Torres-Avilés, A. (2023a). The Construction Evolution and Their Energetic Impact in Andean Region Buildings. En *Energetic Characterization of Building Evolution*, 1-48. Springer Science+Business Media. Recuperado de: https://doi.org/10.1007/978-3-031-21598-8_1

Torres-Quezada, J. & Torres-Avilés, A. (2023b). The Constructive Evolution of the Envelope. The Impact on Indoor Thermal Conditions in Andean Regions. En *Energetic Characterization of Building Evolution*, 49-77. Springer Science+Business Media. Recuperado de: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-21598-8_2

Torres-Quezada, J., Torres, A., Isalgué, A. & Pages-Ramon, A. (2022). The evolution of embodied energy in andean residential buildings. Methodology applied to Cuenca-Ecuador. *Energy and Buildings*, 259, 111858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.111858>

Vázquez Espí, M. (2001). Construcción e impacto sobre el ambiente: el caso de la tierra y otros materiales. *Informes de la Construcción*, 52(471), 29-43. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.2001.v52.i471.681>

Yépez Tambaco, D. A. (2012). *Análisis de la arquitectura vernácula del Ecuador: Propuestas de una arquitectura contemporánea sustentable*. [Tesis de máster]. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de: https://www.academia.edu/29898709/An%C3%A1lisis_de_la_arquitectura_vern%C3%A1cula_del_Ecuador_Propuestas_de_una_arquitectura_contempor%C3%A1nea_sustentable

Zevallos, O. (1994). Lecciones del deslizamiento "La Josefina"-Ecuador. En Conferencia Interamericana sobre reducción de los desastres naturales. Cattedena de Indias, Colombia. Recuperado de: <https://www.eird.org/deslizamientos/pdf/spa/doc5089/doc5089.htm>

Zhou, B., Wei, P., Tan, M., Xu, Y., Ding, L., Mao, X., Zhao, Y. & Kosonen, R. (2019). Capture efficiency and thermal comfort in Chinese residential kitchen with push-pull ventilation system in winter-a field study. *Building and Environment*, 149, 182-195. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.12.017>

MEJORA DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE COLEGIOS EN LA REGIÓN ALTOANDINA DEL PERÚ. EL CASO DEL "MÓDULO PREFABRICADO AULA TIPO HELADAS - PRONIED"

IMPROVING THE THERMAL
PERFORMANCE OF SCHOOLS IN THE HIGH
ANDEAN REGION OF PERU. THE CASE OF
"PRONIED'S PREFABRICATED FROST-TYPE
MODULAR CLASSROOMS"

MELHORIA DO DESEMPENHO TÉRMICO
DE ESCOLAS NA REGIÃO ALTO-ANDINA
DO PERU. O CASO DAS "SALAS DE AULA
MODULARES PRÉ-FABRICADAS DO TIPO
HELADA DO PRONIED"

Martin Wieser

Departamento de Arquitectura, Investigador del Centro de Investigación de la Arquitectura y la Ciudad (CIAC)
Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-4556-3507>
mwieser@pucp.edu.pe

Antonio Garaycochea

Centro de Investigación de la Arquitectura y la Ciudad (CIAC)
Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0003-2854-2875>
a20111801@pucp.edu.pe

Varinia Prada

Centro de Investigación de la Arquitectura y la Ciudad (CIAC)
Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), Lima, Perú
<https://orcid.org/0000-0002-5847-7552>
v.prada@pucp.pe



RESUMEN

Frente al déficit cualitativo y cuantitativo de infraestructura educativa en las zonas rurales altoandinas del Perú, el estado peruano ha venido invirtiendo y apostando en los últimos años en soluciones modulares, buscando la eficiencia en los procesos constructivos. La propuesta específica, con énfasis en el diseño bioclimático, es el "Módulo Prefabricado Aula tipo Heladas"; sin embargo, los usuarios han venido manifestando una falta de confort en estos nuevos ambientes. El presente estudio muestra el desarrollo de mediciones realizadas en un módulo construido, que permitieron la calibración y validación del modelo en un software de simulación, con el fin de proponer mejoras en el diseño que aporten a las futuras construcciones. Tomando como referencia el modelo de confort térmico adaptativo, se comprobó que las temperaturas interiores estaban por debajo de la zona de confort en las primeras horas de la mañana y muy por encima cerca del mediodía, alrededor de 6 °C y 7 °C respectivamente. Con la aplicación de estrategias bioclimáticas complementarias se logró mejorar considerablemente las condiciones térmicas interiores, aunque no lo suficiente para alcanzar la zona de confort en las primeras horas de la mañana; ello debido a que las temperaturas exteriores nocturnas son muy bajas, a que el edificio está deshabitado toda la noche, a la ausencia de masa térmica en la envolvente y a que no cuenta con sistemas solares activos ni de climatización artificial.

Palabras clave

diseño bioclimático, estrategias pasivas, desempeño térmico, simulación energética.

ABSTRACT

Faced with the qualitative and quantitative deficit of educational infrastructure in Peru's rural high Andean areas, in recent years the Peruvian State has been investing in and supporting modular solutions, seeking efficiency in the construction processes. The specific proposal, with special emphasis on bioclimatic design, is the "Prefabricated Frost-type Modular Classroom". However, users have been expressing discomfort with these new facilities. This study shows the measurement process carried out on a built module, which allowed calibrating and validating the model using simulation software, to propose improvements in the design that may contribute to future constructions. Taking the adaptive thermal comfort model as a reference, it was confirmed that indoor temperatures were below thermal comfort limits in the early hours of the morning and well above them close to noon, by around 6 °C and 7 °C respectively. With the application of complementary bioclimatic strategies, it was possible to considerably improve indoor thermal conditions, although not enough to reach comfort early in the morning. This is because the night-time outdoor temperatures are very low, the building is uninhabited all night long, there is no thermal mass in the envelope, and there are no active solar systems or mechanical air conditioning.

Keywords

bioclimatic design, passive strategies, thermal performance, energy simulation.

RESUMO

Diante do déficit qualitativo e quantitativo de infraestrutura educacional nas áreas rurais alto-andinas do Peru, o Estado peruano vem, nos últimos anos, investindo e apoiando soluções modulares, buscando eficiência nos processos de construção. A proposta específica, com ênfase especial no design bioclimático, é a "Sala de aula modular pré-fabricada do tipo Helada". No entanto, os usuários têm expressado desconforto com essas novas instalações. Este estudo mostra o processo de medição realizado em um módulo construído, que permitiu calibrar e validar o modelo usando um software de simulação, para propor melhorias no projeto que possam contribuir para futuras construções. Tomando o modelo adaptativo de conforto térmico como referência, confirmou-se que as temperaturas internas estavam abaixo dos limites de conforto térmico nas primeiras horas da manhã e bem acima deles perto do meio-dia, em torno de 6 °C e 7 °C, respectivamente. Com a aplicação de estratégias bioclimáticas complementares, foi possível melhorar consideravelmente as condições térmicas internas, embora não o suficiente para alcançar o conforto no início da manhã. Isso se deve ao fato de as temperaturas externas noturnas serem muito baixas, de o edifício ficar desabitado durante toda a noite, de não haver massa térmica no envelope e de não haver sistemas solares ativos ou ar-condicionado mecânico.

Palavras-chave

projeto bioclimático, estratégias passivas, desempenho térmico, simulação de energia.

INTRODUCCIÓN

La necesidad de entregar confort térmico en las salas de clases es indiscutible y es una prioridad en el diseño de los establecimientos educacionales. Los estudiantes y los docentes pasan una gran cantidad de tiempo dentro de estos ambientes, y contar con condiciones térmicas del aire adecuadas tiene efectos positivos no solo sobre el confort y la salud de los ocupantes, sino que también sobre su desempeño en general (Zomorodian et al., 2016; Geng et al., 2017; Wargocki et al., 2019; Kükrer y Eskin, 2021). Habiendo reconocido el bajo desempeño general de los estudiantes peruanos en las pruebas internacionales, y que las condiciones térmicas de las escuelas en el Perú afectan negativamente su rendimiento académico (Torres, 2021), es esencial priorizar la calidad de la infraestructura en estos términos específicos. Las condiciones asociadas con la pobreza y la ruralidad son dos aspectos adicionales que influyen en el mal rendimiento (Bos et al., 2012), problemas que se acentúan a medida que las condiciones climáticas se agudizan.

Frente al desafío de un déficit cuantitativo y cualitativo en la infraestructura escolar en las áreas altoandinas, por sobre los 3.500 m.s.n.m, el Programa Nacional de Infraestructura Educativa (PRONIED), del Ministerio de Educación del Perú, ha desarrollado un "Módulo Prefabricado de Aula Tipo Helada". Las especificaciones del módulo se aprobaron en 2021 y ya se han construido cientos de ellas¹. Este artículo presenta un estudio para mejorar el desempeño térmico de estos módulos, ya que los usuarios han expresado sentir falta de confort en estos nuevos ambientes escolares. Este estudio se basa en el monitoreo de la infraestructura existente en dos ubicaciones dentro de las regiones de Cusco y Puno, usando herramientas computacionales para el modelamiento y la simulación energética. El alcance geográfico y climático particular de la región altoandina se describe a continuación, mientras que se detallan las características arquitectónicas de los módulos prefabricados.

GEOGRAFÍA, CLIMA Y ARQUITECTURA DEL ÁREA ALTOANDINA

Aproximadamente 20% del territorio peruano se encuentra en la región altoandina, específicamente por sobre los 3.500 m.s.n.m., y aproximadamente cuatro millones de habitantes, cerca del 13% de la población del país, habita el lugar. Esta situación es extremadamente inusual cuando se considera lo que ocurre en el resto del mundo, donde cerca de 14,5 millones de personas, solo el 0.19% de la población mundial, vive sobre los 3.500 m.s.n.m. De esta población, casi la totalidad (13 millones) se distribuyen, en cantidades similares, en tres países: China, Perú y Bolivia (Tremblay y Ainslie, 2021). Sin embargo, Perú y Bolivia tienen una característica distintiva. Están ubicados

en una zona tropical, lo que condiciona un clima de gran altitud con una radiación solar muy intensa, poca variación entre estaciones, temperaturas moderadas durante el día y muy bajas durante la noche (Vidal, 2014). Con la excepción de áreas con un relieve pronunciado (asociado con montañas, cumbres nevadas y quebradas) que están prácticamente deshabitadas, una parte considerable de la topografía andina, donde se ubican los centros habitados o donde ocurren las actividades agrícolas y ganaderas, está formada por suaves valles y mesetas.

En esta región altoandina, las estaciones se diferencian principalmente por el régimen de aguas lluvia y las temperaturas nocturnas. En el verano, desde diciembre a marzo, lo que coincide con las vacaciones escolares, hay una lluvia recurrente. Las temperaturas son generalmente un poco superiores a los 0°C en la noche y superiores a 15°C durante el día. En los meses más fríos, entre junio y agosto, hay poca lluvia, el cielo está usualmente despejado y las noches son más frías, con heladas regulares que implican temperaturas nocturnas inferiores a 0°C. En general, las temperaturas diurnas son estables a lo largo del año y la humedad relativa del aire es baja.

En este clima único y hostil, las técnicas tradicionales de construcción han optado por materiales macizos para los muros, como la piedra o la tierra, mientras que las telas de fibra natural se usan generalmente para los techos (Burga, 2010; Betancur et al., 2022). La gran inercia térmica de los muros y el alto nivel de aislación de los techos, además de lo compacto de la forma y las aperturas extremadamente pequeñas, garantizan una cierta estabilidad térmica interior. Aun así, la ausencia de material translúcido y la dificultad de lograr un nivel mínimo de hermeticidad siempre condicionaron la presencia de temperaturas significativamente bajas en el interior. Las tradiciones de construcción de esta área altoandina, tanto en las áreas urbanas como rurales, así como en el resto del país, han cambiado abruptamente en las últimas décadas debido a múltiples factores. Las razones van desde la asociación de ciertas técnicas de construcción con el progreso a una mayor durabilidad y practicidad del proceso de construcción. Esta asimilación de técnicas modernas sin procesos adaptativos adicionales, generalmente con estructuras más ligeras y sin aislación térmica (como muros de ladrillo y láminas de metal corrugado en los techos) no solo chocan con el paisaje y con las tradiciones locales (Sáez y Canziani, 2020), sino que también empeoran significativamente su desempeño térmico (Wieser et al., 2021; Molina et al., 2021). Las estrategias bioclimáticas para los climas fríos están bien identificadas, estando varios autores de acuerdo en que se basan principalmente en la capacidad de aislación y en la inercia térmica de la envolvente, en la hermeticidad y en el uso de radiación solar (Givoni, 1992; Szokolay, 2012; Manzano-Agugliaro et al., 2015).

1 Las especificaciones técnicas del módulo se pueden ver en la siguiente página web: <https://www.gob.pe/institucion/minedu/campa%C3%B1as/2209-proyecto-de-ficha-de-homologacion-modulo-prefabricado-aula-tipo-heladas>



Figura 1. Plano, sección y fotografías del módulo "Plan Heladas" (segunda versión, 2020). Fuente: Informe de especificaciones, Programa Nacional de Infraestructura Educativa (PRONIED). Fotografías por los autores.

LOS MÓDULOS FABRICADOS TIPO HELADAS (PLAN HELADAS)

Los módulos propuestos son parte del Catálogo Escolar Modular propuesto por el Programa Nacional de Infraestructura Educativa (PRONIED, 2021), para desarrollar un sistema donde los diseños del módulo satisfagan los siguientes criterios:

- Relevancia: adaptación a las condiciones climáticas de cada localidad, para tener espacios educativos con un confort térmico y requerimientos de iluminación adecuados.
- Calidad: mejorar las condiciones de los espacios pedagógicos, operacionales y de apoyo en los establecimientos educacionales, ofreciendo un repertorio modular para diferentes zonas bioclimáticas, como lo consideran los códigos peruanos de construcción: por sobre los 3.500 m.s.n.m.
- Eficiencia: diseño estandarizado de los módulos y sus especificaciones técnicas, para hacer que la adquisición, el transporte y los procesos de instalación del módulo sean más eficientes.

El diseño de la primera versión del módulo se realizó durante el 2017 y el 2018. Se implementó definitivamente entre el 2019 y el 2020, con la construcción de un total de 342 módulos.

Este estudio considera una segunda versión de los módulos tipo helada, diseñados en 2020 e implementados desde el 2021 en adelante. Actualmente, 274 módulos de esta segunda versión ya se han construido (ver Figura 1) y se están construyendo 233 más. La diferencia más importante entre la primera y la segunda versión se encuentra en la antecámara. Mientras su cerramiento es completamente translúcido (policarbonato) en la primera versión, este es opaco en la segunda (termopanel). Como parte del proceso, se está diseñando una tercera versión que propone agrupar dos aulas por módulo, con un invernadero entre estas. Es en este cruce que este estudio se considera como apropiado; busca contribuir a mejorar el diseño de la tercera versión a través de monitoreo y la validación térmica de la segunda versión del módulo.

En términos generales, los muros y los cielos rasos se construyen con paneles de poliuretano termoacústico tipo "sándwich" y con superficies translúcidas hechas de paneles de policarbonato celular, mientras que el piso está hecho de concreto reforzado con aislación de lana mineral (para más detalles, vea la Tabla 1, Modelo base calibrado). Las horas de uso de las aulas son desde las 8:30 hasta las 13:30.

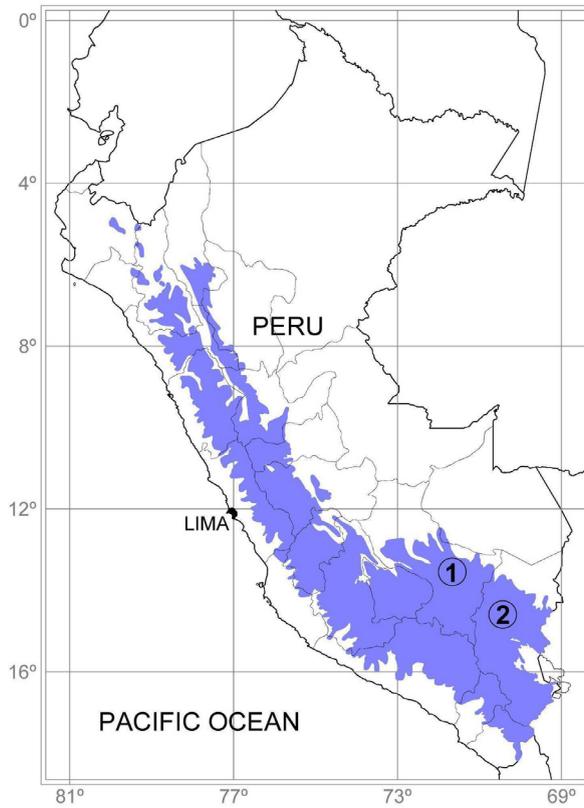


Figura 2. Región altoandina del Perú; altitud igual o superior a los 3.500 m.s.n.m y la ubicación de las escuelas monitoreadas para este estudio: (1) EE 50425, Cusco, latitud -13,42°, longitud -71,65°, altitud 3.737 m.s.n.m; y (2) EE 72073, Puno, latitud -14,68°, longitud -70,35°, altitud 3.913 m.s.n.m. Fuente: Preparación por los autores.

METODOLOGÍA

MONITOREO TÉRMICO DE LAS ESCUELAS

El primer paso antes de modelar el módulo y de validar la simulación, fue la elección de las dos escuelas que se monitorearían. Este proceso se realizó en coordinación con PRONIED y se basó en los criterios de accesibilidad, representatividad y capacidad de tomas mediciones en las escuelas. Finalmente, las escuelas seleccionadas fueron "Establecimiento educacional 50425" y "Establecimiento educacional 72073", ubicadas en Cusco y en Puno, respectivamente (Figura 2).

En cada uno de ellos se instaló una estación climática exterior (modelo DAVIS Vantage Pro 2 Plus), para medir la temperatura del aire y la humedad relativa, así como la radiación solar horaria. El equipo se ubicó en un espacio abierto, lejos de elementos que pudieran dar sombra sobre él. Ocho registradores de datos (modelo ONSET Hobo H08-003-02) se ubicaron en cada escuela (dos aulas con cuatro registradores de datos cada una), para registrar las variaciones de temperatura y de humedad relativa cada 60 minutos dentro del módulo por un mes, en la estación del año más fría. En la primera escuela (EE 50425, Cusco), se realizaron mediciones

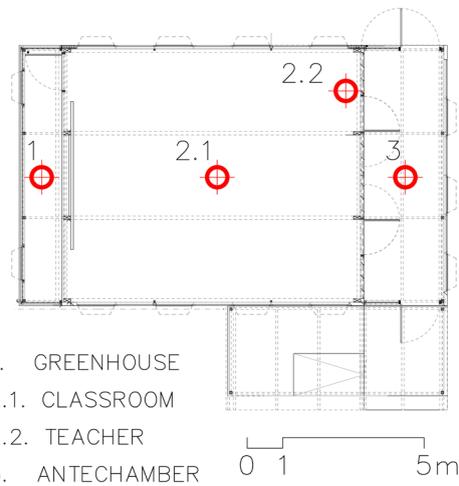


Figura 3. Montaje de la estación meteorológica (izquierda), vista del registrador de datos interior ubicado en el aula (centro) y la ubicación de todos los registradores de datos dentro del módulo (derecha). Fuente: Preparación por los autores.

entre el 05/04/2022 y el 13/05/2022, mientras que en la segunda escuela (EE 72073, Puno), el período fue entre el 13/05/2022 y el 14/06/2022. Los registradores de datos se distribuyeron de la siguiente forma (ver Figura 3):

- Uno en la antecámara, ubicado aproximadamente a 30 cm por debajo de la estructura de apoyo del techo.
- Uno en el aula, ubicado en el centro y aproximadamente a 30 cm por debajo del cielo falso de madera contrachapada.
- Uno en el invernadero, ubicado en el centro del espacio y aproximadamente a 30 cm por debajo de la estructura que soporta el techo de policarbonato. Este se ubicó dentro de una caja de cartón blanco con perforaciones, para protegerlo de la radiación solar directa.
- Uno dentro del aula, en el marco superior del pizarrón.

CALIBRACIÓN DEL MODELO

Para calibrar el modelo y para simulaciones futuras, se decidió finalmente solo trabajar con los datos obtenidos



Figura 4. Ubicación (izquierda) y vista de los módulos (derecha) en el establecimiento educacional 72073, Puno. Fuente: Preparación por los autores.

en uno de los módulos de la segunda escuela. La selección del aula, la escuela y la semana representativa consideró que las condiciones climáticas y el uso de interiores en este período fue más consistente, con un período típico en cuanto a las temperaturas esperadas para la estación y los horarios regulares de clase. La voluntad de los estudiantes y de los maestros para permitir la entrada a aula, así como para registrar las actividades que se realizaron ahí, también se agradece.

Los datos obtenidos desde los registradores se usaron para calibrar una simulación térmica dentro de software *DesignBuilder*², que reflejó el estado actual de los módulos. Las capacidades y la confiabilidad de este y de otro software de simulación térmica dinámica, en base al motor de cálculo Energy Plus, han sido ampliamente demostradas en las últimas dos décadas (Mazzeo et al., 2020; Haves et al., 2019). Considerando las coordenadas geográficas de la escuela, el software "Meteonorm"³ se usó para generar un archivo con una extensión EPW (formato EnergyPlus Weather), que contiene información sobre lo que se conoce como "año meteorológico típico". Este archivo se integró al modelo en *DesignBuilder* y permitió elegir un período en el que las condiciones de temperatura fueron equivalente a aquellas medidas in situ durante cinco días hábiles, de lunes a viernes.

Una vez seleccionada la semana, se ejecutaron simulaciones con las temperaturas de los ambientes registrados (antecámara, aula e invernadero). En la medida en que la geometría, los materiales y el uso

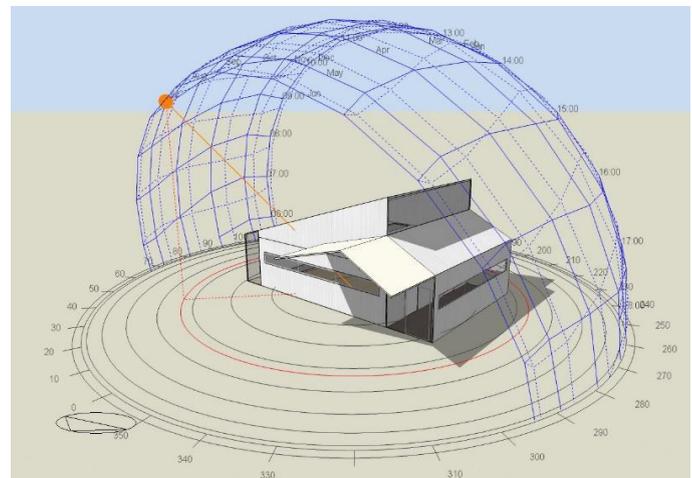


Figura 5. Captura de pantalla del modelo en el software DesignBuilder. Fuente: Preparación por los autores.

del módulo fueron variables suficientemente confiables, se asignaron diferentes valores de hermeticidad del aire (cambios de aire por hora) a las salas hasta que la coincidencia entre lo medido y lo simulado fue lo más cercana posible. El uso de espacios y de aberturas se identificó a través de observaciones en terreno, entrevistas y de un registro hecho durante dos visitas. Estos calendarios se incorporaron en el modelo. A continuación, se ve una captura de pantalla del módulo en el software (Figura 5)

2 DesignBuilder es una de las herramientas computacionales más conocidas en el área para realizar simulaciones térmicas dinámicas. Usa un motor de cálculo entregado por EnergyPlus. <https://designbuilder.co.uk>

3 Meteonorm es un programa computacional desarrollado por Meteotest, que entrega y genera datos climáticos desde cualquier parte del mundo usando información satelital y la interpolación de datos desde estaciones cercanas <https://www.meteonorm.com/>.

Tabla 1. Escenarios simulados con estrategias adicionales. Fuente: Preparación por los autores.

Escenario	Especificaciones del modelo
Modelo base calibrado	<p>Modelado sin alteraciones siguiendo las especificaciones técnicas originales del proyecto.</p> <p><i>Envolvente y orientación:</i> Envolvente hecha de paneles de poliuretano termoacústico en forma de "sándwich" - 50 mm y 100 mm de grosor en los muros (valor U: 0,375 y 0,193 W/m²°C) y 45 mm en cielos rasos (valor U: 0,413 W/m²°C); además de muros y techos de poliuretano de un grosor de 30 mm (valor U: 1,065 W/m²°C). Orientación suroeste del invernadero.</p> <p><i>Losa:</i> Piso de vinilo (e = 2,5 mm) sobre un subsuelo de madera aglomerada fenólica (e = 45 mm), apoyado por listones de madera con una sección de 50 mm x 50 mm y aislación de lana de vidrio (e = 50 mm) entre los listones; todo sobre una losa de hormigón armado (valor U con puente: 1,065 W/m²°C).</p> <p><i>Cielo falso:</i> Marcos con láminas de policarbonato (e = 10 mm, valor U: 1,057 W/m²°C) y láminas de madera entrechapada fenólica (e = 8 mm, valor U: 3,093 W/m²°C).</p> <p><i>Ventilación natural:</i> Según las observaciones y entrevistas en terreno, se consideró un tiempo de apertura desde las 8:30 a las 16:00. Se usó el modo de ventilación programada, con una proporción máxima de 10 ac/h y un setpoint de temperatura de 24°C. Se asignó una tasa de infiltración constante de 1,5 ac/h.</p> <p><i>Calendario de la puerta:</i> Todas se mantienen cerradas durante el fin de semana. Durante la semana también se mantienen cerradas, con la excepción de la que está entre el aula y la antecámara y la puerta entre la antecámara y el exterior. Las últimas dos están abiertas 100% del tiempo, entre las 8:30 y las 16:00.</p> <p><i>Calendario de celosías:</i> Las celosías de metal que conectan el aula con el invernadero están siempre cerradas.</p>
1 Reducción de infiltración/ aumento de la capacidad de ventilación	<p><i>Envolvente y orientación:</i> La infiltración en todas las salas se redujo en aproximadamente un 60% y la capacidad de ventilación a través de las aberturas se aumentó en un 50%.</p>
2 Orientación y hermeticidad del invernadero	<p><i>Envolvente y orientación:</i> Orientación este del invernadero y reducción de su infiltración a un 50% (mayor hermeticidad al aire).</p> <p><i>Calendario de celosía:</i> Horas de apertura entre las 8:30 y las 10:30.</p>
3 Aumento de la aislación y reemplazo de la transparencia en los techos.	<p><i>Envolvente y orientación:</i> Reemplazo del policarbonato transparente en el techo inclinado del aula por un termopanel aislante.</p> <p><i>Cielo falso:</i> Se agregó aislación con poliuretano expandido (e = 50 mm) en la parte superior del cielo falso de madera contrachapada y el doble del grosor del policarbonato puesto sobre él (e = 20 mm).</p>
4 Exposición de la masa térmica del piso	<p><i>Envolvente y orientación:</i> Igual al escenario 3.</p> <p><i>Cielo falso:</i> Igual al escenario 3.</p> <p><i>Calendario de celosía:</i> Igual al escenario 2.</p> <p><i>Losa:</i> Eliminación de la capa aislante. Se mantiene el piso de vinilo sobre una losa de hormigón armado (e = 250 mm) y se pone una brecha de 300 mm entre la parte inferior de la losa y el suelo.</p>
5 Horas estrictas de apertura de las puertas y ventadas	<p><i>Envolvente y orientación:</i> Igual a los escenarios 3 y 4. Adicionalmente, la orientación del invernadero y la infiltración son las mismas que las del escenario 2.</p> <p><i>Cielo falso:</i> Igual al escenario 3.</p> <p><i>Losa:</i> Igual al escenario 4, sin considerar una separación del suelo.</p> <p><i>Ventilación natural:</i> Un tiempo de apertura de ventanas se aplicó entre las 10:30 y las 13:30.</p> <p><i>Calendario de la puerta:</i> Todas las puertas se mantienen cerradas a lo largo del fin de semana, sin calendario de apertura. Durante la semana estas también se mantienen cerradas, pero en el caso de las puertas entre el aula y la antecámara, así como de la puerta entre la antecámara y el exterior, estas se abren temporalmente durante el día para la entradas y salida de los estudiantes durante el horario de clases (entre las 8:30 y las 13:30).</p> <p><i>Calendario de celosía:</i> Las horas de apertura de las celosías de metal son de entre las 8:30 y las 10:30; y entre las 15:30 y las 18:00.</p>
6 Adición de masa térmica	<p>Las mismas condiciones que en el escenario anterior, pero agregando una masa térmica con la postura de un muro de adobe grueso (e = 40 mm, valor U: 1,627 W/m²°C) entre el aula y el invernadero.</p>

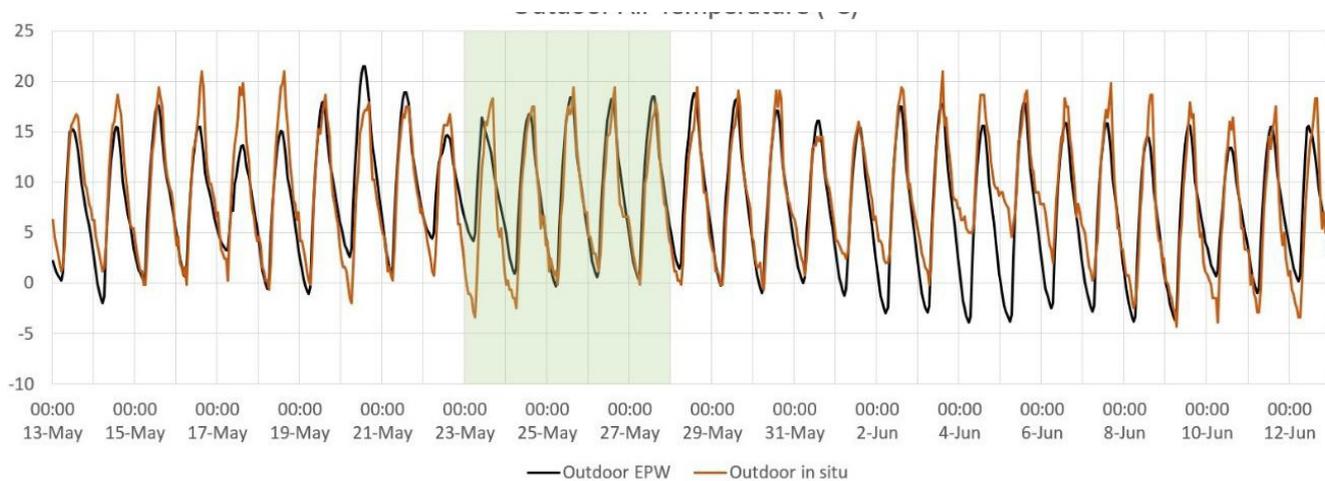


Figura 6. Comparación entre las temperaturas exteriores de la semana representativa en base a mediciones in situ, y las temperaturas exteriores basadas en el archivo .epw. Fuente: Preparación por los autores.

LÍMITES DE CONFORT TÉRMICO

Para evaluar las condiciones térmicas dentro de las aulas, y considerando que no hay estándares o normas nacionales que delimiten la zona de confort, se usó la teoría del confort adaptativo, tomando como referencia el estándar ASHRAE 55-2017 (2017). Cumpliendo con las condiciones de los espacios interiores de los edificios de oscilaciones libres, las fórmulas usadas para definir los límites son (Ecuación 1 y Ecuación 2):

(Ecuación 1)
 $80\% \text{ acceptability over } (^{\circ}\text{C}) = 0.31 \times (t_{\text{pma}}(\text{out})) + 21.3$

(Ecuación 2)
 $80\% \text{ acceptability under } (^{\circ}\text{C}) = 0.31 \times (t_{\text{pma}}(\text{out})) + 14.3$

donde t_{pma} (exterior) es la temperatura media exterior.

SIMULACIONES DE ESCENARIOS PROPUESTOS

Una vez calibrado el modelo, se ejecutaron simulaciones adicionales con diferentes estrategias. Se aplicaron estrategias bioclimáticas, reconociendo las características específicas del clima frío tropical en gran altitud, y se basaron en las temperaturas alcanzadas, así como en el equilibrio térmico presentado por el software. Se ejecutaron cinco escenarios diferentes en base al modelo original, incorporando las estrategias detalladas en la Tabla 1 al escenario base.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores de la temperatura exterior se presentan primero, tanto desde el monitoreo como desde el archivo .epw

generado (Figura 6). La semana para la ejecución de las simulaciones se identificó en base a la mejor coincidencia de los valores alcanzados en ambos casos. Además, los gráficos resultantes con las calibraciones realizadas se presentan; note la superposición de la línea gris con las mediciones hechas in situ (Figura 7).

Al aplicar las fórmulas del modelo de confort adaptativo, y habiendo identificado la temperatura promedio del mes a $8,5^{\circ}\text{C}$, la zona de confort térmico en las semanas medidas estaría entre los 17°C y los 24°C . Esta "zona de confort" se puede ver diagramada en los resultados de las mediciones, en las Figuras 8 y 9. Según las mediciones realizadas (ver Figura 8), se observó una variación mínima entre las temperaturas de la antecámara, del invernadero y del aula. En todos los ambientes hay una oscilación térmica extremadamente amplia de aproximadamente 25°C , con temperaturas muy por sobre el límite de control en las horas cercanas al mediodía. En los momentos más fríos, que coinciden con la hora del inicio de las clases, las temperaturas en el aula también se alejan mucho de la zona de confort, cerca de 8°C por debajo de esta. El invernadero es el primer ambiente que se calienta y que se enfría, pero sus temperaturas usualmente no difieren de las de los otros ambientes, siendo en algunos días más bajas que las de la antecámara.

La temperatura promedio en el aula cuando se consideran las 24 horas del día es de aproximadamente $17,7^{\circ}\text{C}$. Este valor está justo dentro del rango de confort adaptativo (ver la banda verde en la Figura 8) pero, como ya se mencionó, el problema principal es la gran oscilación térmica. Esta situación condiciona los valores de la temperatura que están dentro de la zona de confort solo un 25% del tiempo, mientras que otro 25% están por sobre la zona de confort y el 50% del tiempo están por debajo de ella. Si esto se limita a las horas en las que los estudiantes usan el aula, un tercio del tiempo están en condiciones de confort, generalmente entre las 10:00 y las 12:00; un tercio del tiempo hay falta de confort debido al frío (al comienzo del día); y el otro tercio

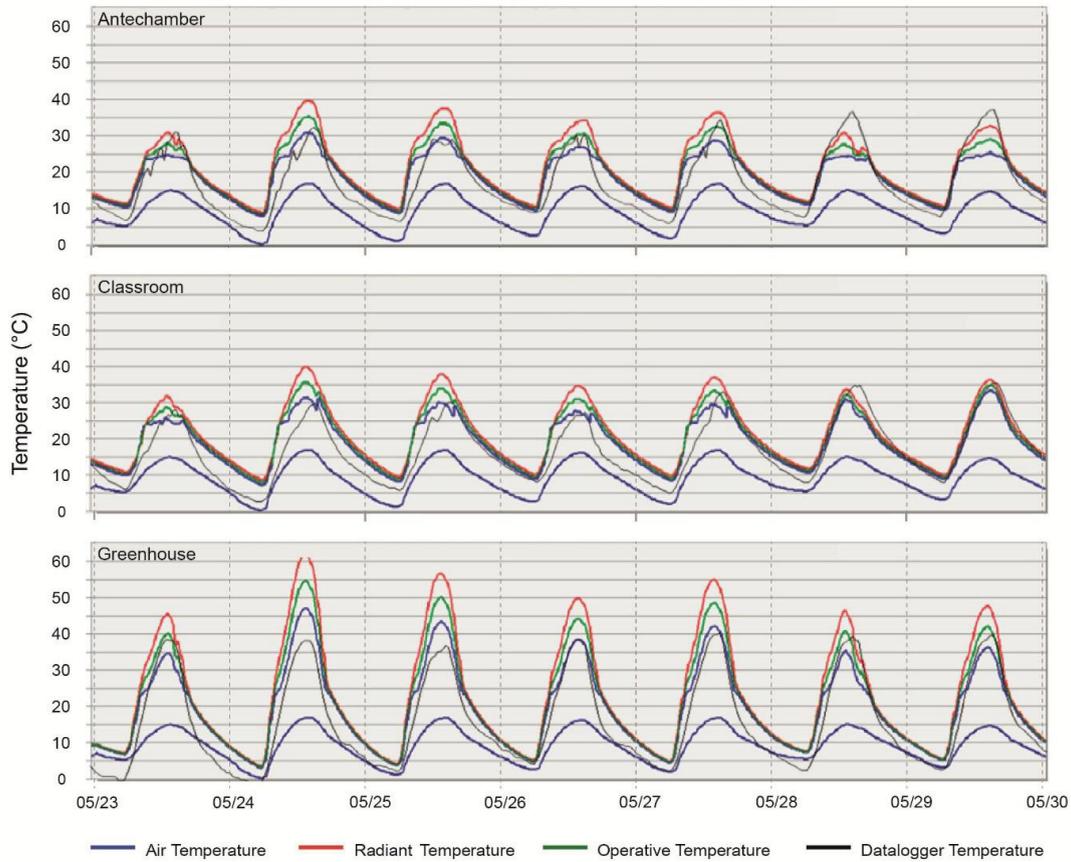


Figura 7. Calibración de la antecámara (parte superior), el aula (al centro) y el invernadero (parte inferior) con temperaturas radiantes (en rojo), temperaturas operacionales (en verde), temperatura externa del aire simulada (en azul) y la temperatura del aire externo medido in situ (en gris).

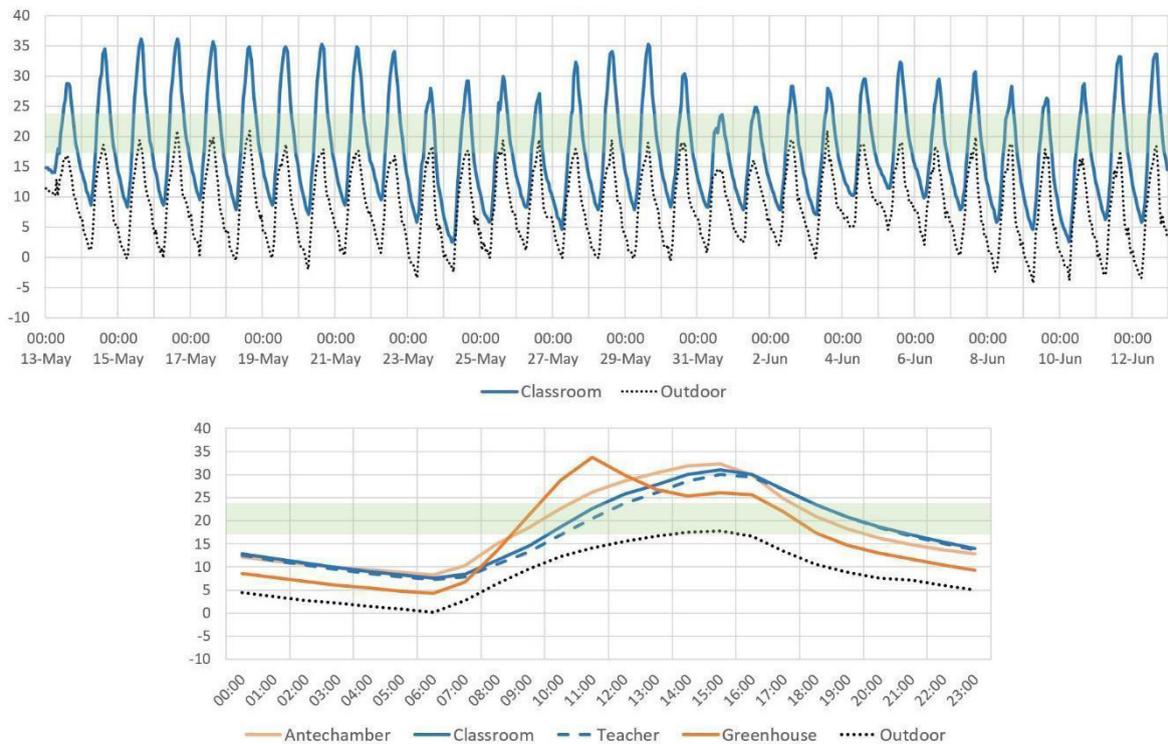


Figura 8. Temperatura del aire en el aula y en el exterior (arriba); temperaturas horarias promedio de todas las salas del módulo (abajo). La zona verde indica los límites de confort. Fuente: Preparación por los autores.

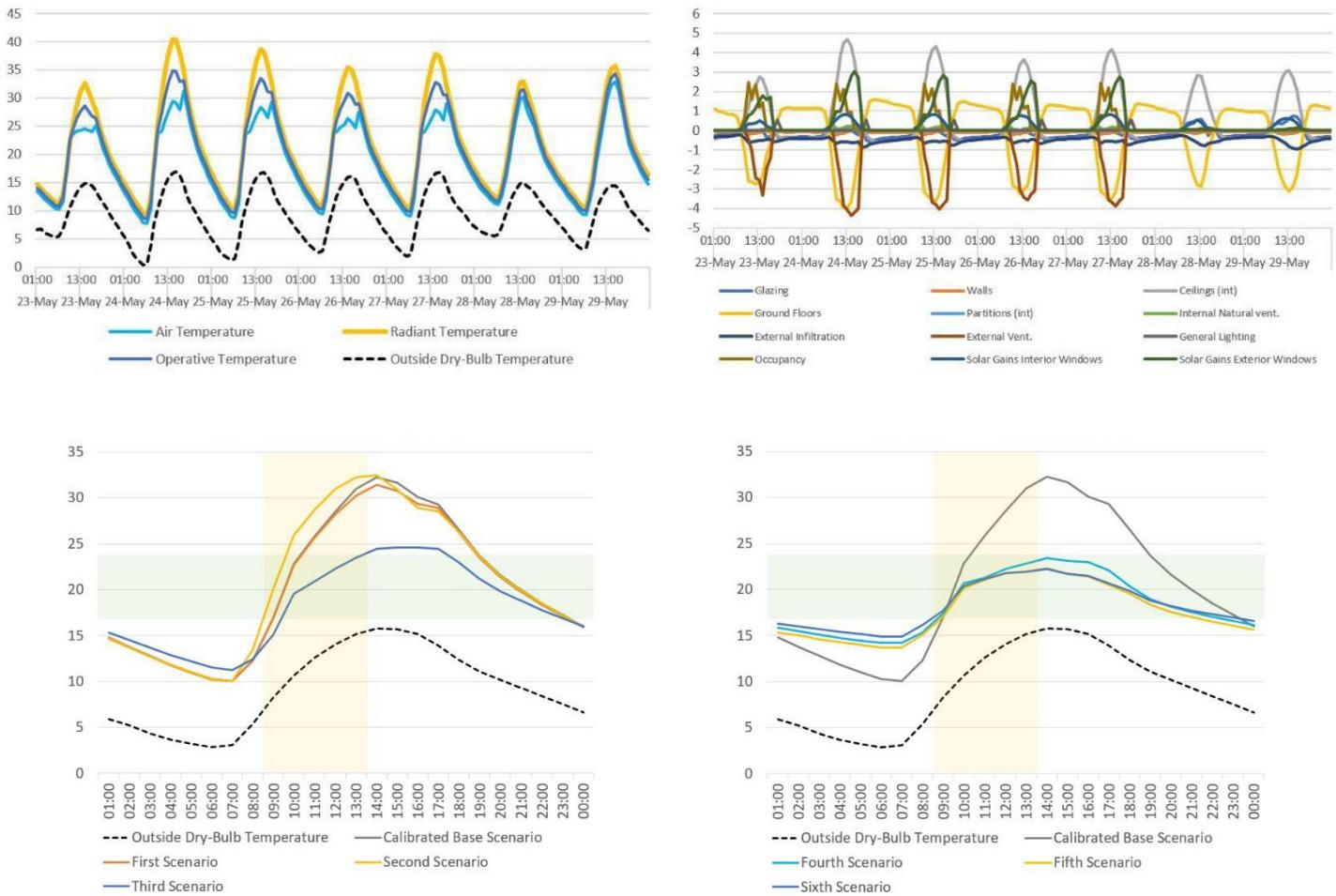


Figura 9. Simulaciones de temperatura y equilibrio térmico de la propuesta base (arriba) y las simulaciones de temperatura de la propuesta base con los seis escenarios propuestos (abajo). La barra verde es la zona de confort y la amarilla es las horas de uso del aula. Fuente: Preparación por los autores.

debido al exceso de calor, después del mediodía. Al ingresar a clases, las temperaturas están cerca de los 11°C y las de la tarde usualmente llegan a 31°C. En casos particulares, las temperaturas más bajas pueden llegar a 8°C y las más altas, a 34°C. Todo esto muestra condiciones muy desfavorables en cuanto al confort térmico que, probablemente, tendrá consecuencias negativas para la atención de los estudiantes.

Las bajas temperaturas en el aula al comienzo del día (solo entre 5°C y 8°C de temperatura exterior) muestran cuán fácil es perder el calor en la noche. Por otro lado, es impresionante lo abrupta que puede ser la elevación de la temperatura en las primeras horas de la mañana: aproximadamente 12°C en solo 3 horas. En la tarde, las temperaturas del aula pueden alcanzar más de 35°C, lo que hace que el espacio sea prácticamente inhabitable. El hecho de que el ambiente no esté ocupado durante la noche, además de la ausencia de masa térmica, implica que las temperaturas temprano en la mañana son bastante bajas, alrededor de 8°C. Por otro lado, la ausencia de una masa térmica, el exceso de material translúcido (especialmente en superficies horizontales) y el uso limitado de ventilación natural elevan la temperatura interior de forma abrupta y excesiva.

Los resultados de las simulaciones con el modelo calibrado se presentan a continuación, con las diferentes modificaciones mencionadas en la metodología (ver Tabla 1) usando el software *DesignBuilder*. Estos resultados se expresan en los valores de la temperatura operacional y el equilibrio térmico, que permite entender mejor los fenómenos que los explican (Figura 9).

En los escenarios del 1 al 3, los cambios que se implementaron para las simulaciones alteran aspectos específicos del módulo base. Por otro lado, en los escenarios 4 al 6, ciertas estrategias combinadas y probadas anteriormente se agregan, según su efectividad probada. El primer escenario muestra que la reducción en la infiltración y el aumento en la posibilidad de ventilación no son decisivos si no van acompañados por otras estrategias. A pesar de la leve reducción de la temperatura máxima, prácticamente no hay cambios en las temperaturas mínimas interiores. En un segundo escenario, el invernadero está orientado hacia el este, la dirección más adecuada para aprovechar la radiación directa temprano en la mañana; las condiciones tienen temperaturas mínimas y máximas muy similares, pero el aumento de la temperatura interior es más rápido. Como

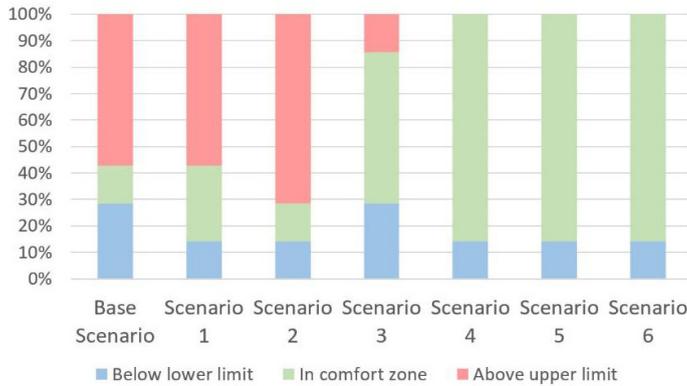


Figura 10. Porcentaje del tiempo en confort térmico durante las horas de clase en cada escenario. Fuente: Preparación por los autores.

se puede ver en la Figura 10, el problema principal en estos primeros dos escenarios, aparte del base, es el calor excesivo dentro del aula. El tercer escenario, donde se elimina la transparencia de los cielos falsos, y se aumenta la aislación de estos, muestra un cambio sustancial en el comportamiento de la temperatura interior. Las temperaturas máximas se reducen por entre 7°C y 8°C a cerca de 25°C, mientras que las mínimas se elevan levemente en alrededor de 2°C, llegando a aproximadamente 12°C.

En el escenario 4, los cambios en el cielo raso y en el cielo falso del escenario anterior se mantienen y el intercambio de aire entre el aula y el invernadero se activa en las primeras horas de la mañana. Se agrega la estrategia de eliminar la aislación térmica en el piso, reconociendo este elemento como uno de los pocos que entrega masa térmica al edificio. El resultado muestra una mejora en las posibilidades de entregar confort térmico. Por un lado, las temperaturas en los momentos más calurosos del día no exceden los 24°C, mientras que, al comienzo del día, las temperaturas más frías son de cerca de 15°C, cinco grados por sobre el módulo base. El quinto escenario, donde las condiciones del escenario anterior se mantienen, considera la losa sobre el piso, así como la adición de una mayor capacidad de ventilación natural en los momentos más calurosos. Adicionalmente, se consideró mantener las puertas cerradas y las rejillas abiertas entre el invernadero y el aula en los momentos más fríos de la mañana. Con estos cambios, los valores de las temperaturas mínimas y máximas parecen ser muy similares.

Finalmente, un sexto escenario consideró la incorporación de masa térmica en el espacio interior; el elemento que divide el aula del invernadero se reemplazó con un muro grueso de adobe, para calentarlo durante el día y que no quede expuesto al exterior en la noche. Los resultados muestran un comportamiento aún mejor, con temperaturas mínimas al comienzo de las clases solo 2°C desde el límite inferior de la zona de confort. En general,

desde el cuarto escenario donde se expone la masa del piso, y aún más en el último escenario donde la masa térmica de un muro se agrega, la importancia de esta estrategia es evidente, especialmente para controlar el alza de la temperatura alrededor del mediodía. Sin embargo, sus limitaciones también son aparentes, ya que la ausencia de cargas térmicas cuando no hay clases y la dureza del clima mismo no permiten valores de temperatura ideales que se puedan mantener hasta la mañana siguiente.

CONCLUSIONES

Aunque la propuesta original del módulo considera correctamente la inclusión de la estrategia de captura solar en un clima frío, como el de la puna peruana, la ganancia solar directa excesiva a través del techo translúcido implica un aumento notorio de la temperatura en momentos cuando ya no es necesario elevarla. La captura indirecta a través del invernadero muestra ser suficiente para lograr el aumento deseado, pero condicionado a una orientación estricta hacia el este para que ese aumento en la temperatura ocurra durante las primeras horas de la mañana. Una segunda condición determinante es reconocer la poca masa térmica que el proyecto tiene, y que se ubica en el suelo. Exponer esa masa eliminando la aislación permite que las temperaturas interiores se suavicen levemente durante el día.

Junto con una superficie translúcida más pequeña, la orientación correcta del invernadero, la exposición de la masa térmica en el suelo y la versatilidad en la ventilación entre el invernadero, el aula y el exterior, es posible mejorar las condiciones temprano en la mañana y mantenerlas dentro del rango de confort temprano en la tarde, lo que permite mantener condiciones de confort térmico durante la mayoría de las horas de uso. Finalmente, es necesario reconocer las limitaciones de las estrategias bioclimáticas tienen en un edificio de estas características y en un clima hostil como el de la puna, en el sentido de que los edificios no tienen un uso continuo y que la consideración de la masa térmica está limitada a la ligereza de los materiales que requiere el modularidad. Aunque a mediodía es posible controlar las condiciones a través de la versatilidad de la ventilación natural, será difícil tener un confort térmico temprano en la mañana si no hay sistemas de calefacción solar activos o sistemas de calefacción artificial.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido posible gracias a la colaboración del Programa Nacional de Infraestructura Educativa (PRONIED) del Ministerio de Educación del Perú, y el Centro de Investigación de la Arquitectura y la Ciudad de la Pontificia Universidad Católica del Perú (CIACI PUCP)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASHRAE Standard (2017). Standard 55-2017 *Thermal environmental conditions for human occupancy*. Ashrae: Atlanta, GA, USA.

Chui Betancur, H. N., Huaquisto Ramos, E., Quispe, G. B., Canales Gutiérrez, Á. & Calatayud Mendoza, A. P. (2022). Características de la arquitectura vernácula en zonas altoandinas de Perú. Una contribución al estudio del mundo rural. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 15, 21-21. DOI: <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu15.cavz>

Bos, M. S., Ganimian, A. J., Vegas, E. & Alfonso M. (2014). *Brief N°13: Perú en PISA 2012 logros y desafíos pendientes*. BID. Retrieved from: <https://repositorio.minedu.gob.pe/handle/20.500.12799/3814>

BURGA, J. (2010). Arquitectura vernácula peruana: un análisis tipológico. Colegio de Arquitectos del Perú.

Geng, Y., Ji, W., Lin, B. & Zhu, Y. (2017). The impact of thermal environment on occupant IEQ perception and productivity. *Building and Environment*, 121, 158-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.05.022>

Givoni, B. (1992). Comfort, climate analysis and building design guidelines. *Energy and buildings*, 18(1), 11-23. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-7788\(92\)90047-K](https://doi.org/10.1016/0378-7788(92)90047-K)

Havey, P., Ravache, B., Fergadiotti, A., Kohler, C., & Yazdani, M. (2019). Accuracy of HVAC Load Predictions: Validation of EnergyPlus and DOE-2. Using an Instrumented Test Facility. In *Proceedings of Building Simulation*. DOI: <https://doi.org/10.26868/25222708.2019.211268>

Kürker, E. & Eskin, N. (2021). Effect of design and operational strategies on thermal comfort and productivity in a multipurpose school building. *Journal of Building Engineering*, 44, 102697. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102697>

Manzano-Agugliaro, F., Montoya, F. G., Sabio-Ortega, A. & García-Cruz, A. (2015). Review of bioclimatic architecture strategies for achieving thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 736-755. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.095>

Mazzeo, D., Matera, N., Cornaro, C., Oliveti, G., Romagnoni, P. & De Santoli, L. (2020). EnergyPlus, IDA ICE and TRNSYS predictive simulation accuracy for building thermal behaviour evaluation by using an experimental campaign in solar test boxes with and without a PCM module. *Energy and Buildings*, 212, 109812. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109812>

Molina, J. R., Lefebvre, G., Espinoza, R., Horn, M. & Gómez, M. M. (2021). Bioclimatic approach for rural dwellings in the cold, high Andean region: A case study of a Peruvian house. *Energy and Buildings*, 231, 110605. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110605>

Programa Nacional de Infraestructura Educativa, PRONIED del Ministerio de Educación, MINEDU (2021). Ficha de Homologación de Módulo Prefabricado Aula tipo Heladas. Retrieved from: <https://www.gob.pe/institucion/pronied/campa%C3%B1as/4440-fichas-de-homologacion-de-modulos-prefabricados>

Sáez, E., & Canziani, J. (2020). Vernacular architecture and cultural landscapes in the Sondondo Valley (Peru). *The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 44(M1), 175-180. DOI: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIV-M-1-2020-175-2020>

Szokolay, S. (2012). *Introduction to architectural science*. Routledge. DOI:<https://doi.org/10.4324/9780080473130>

Torres Puñez, C. M. (2021). Construyendo la educación: infraestructura como determinante del rendimiento académico en el Perú 2000-2015. [Thesis for the degree of Economist, Universidad de Lima]. Retrieved from: <https://hdl.handle.net/20.500.12724/13874>

Tremblay, J. C. & Ainslie, P. N. (2021). Global and country-level estimates of human population at high altitude. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(18), e2102463118. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.2102463118>

Vidal, J. P. (2014). Las ocho regiones naturales del Perú. *Terra Brasilis Revista da Rede Brasileira de História da Geografia e Geografia Histórica*, (3). DOI: <https://doi.org/10.4000/terrabrasilis.1027>

Wargocki, P., Porras-Salazar, J. A. & Contreras-Espinoza, S. (2019). The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*, 157, 197-204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>

Wieser, M., Rodríguez-Larraín, S. & Onnis, S. (2021). Bioclimatic strategies for high altitude tropical cold climate. Prototype validation in Orduña, Puno, Perú. *Estoa. Revista de la Facultad de Arquitectura y Urbanismo de la Universidad de Cuenca*, 10(19), 09-19. DOI: <https://doi.org/10.18537/est.v010.n019.a01>

Zomorodian, Z. S., Tahsildoost, M. & Hafezi, M. (2016). Thermal comfort in educational buildings: A review article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 895-906. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.033>

CAMBIO CLIMÁTICO Y CONFORT TÉRMICO EN LA VIVIENDA DE INTERÉS SOCIAL COLOMBIANA

Recibido 16/10/2022
Aceptado 07/06/2023

CLIMATE CHANGE AND THERMAL COMFORT IN COLOMBIAN SOCIAL HOUSING

MUDANÇA CLIMÁTICA E CONFORTO TÉRMICO EM HABITAÇÕES SOCIAIS COLOMBIANAS

Luisa Fernanda Callejas-Ochoa

Facultad Artes Integradas
Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-1967-2707>
luisa.callejas@tau.usbmed.edu.co

Manuela Marín-Echeverri

Facultad de Arquitectura
Universidad de Santo Tomás, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0001-8452-145X>
manuela.marin@ustamed.edu.co

Michel Steven Puerta-Sepúlveda

Facultad Artes Integradas
Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0002-8264-5464>
maico.puerta02@gmail.com

Valentina Arroyave-Molina

Facultad Artes Integradas
Universidad de San Buenaventura, Medellín, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-0854-8815>
valarroyavemolina@gmail.com

Monique Silva Neves

Escola de Designo
Universidade do Estado de Minas Gerais, Belo Horizonte, Brazil
<https://orcid.org/0000-0002-7961-6929>
monique.0152606@discente.uemg.br



RESUMEN

El cambio climático es una de las problemáticas más relevantes del siglo XXI a nivel mundial y, a pesar del desarrollo de estrategias que buscan minimizar sus consecuencias, es una realidad irreversible. Por consiguiente, es pertinente analizar su impacto sobre la arquitectura colombiana, específicamente en la Vivienda de Interés Social (VIS), tipo de edificación que más se construye en el país. El objetivo de esta investigación fue conocer el desempeño térmico de la VIS actual, en relación con el cambio climático, a partir de un modelo tipo para las ciudades más pobladas de Colombia Bogotá, Medellín y Cali. Dicho modelo se realizó a través de simulaciones computacionales en tres escenarios futuros (2030/2050/2080), los que permitieron diagnosticar cómo el cambio climático tendrá efecto en el confort térmico de sus ocupantes. Dentro de los resultados se demuestra que, del total de los escenarios evaluados (576), tan sólo el 18,9% se encuentra en un rango aceptable de tiempo en confort térmico (>70%). Esto que indica que la mayor parte de la VIS actualmente construida en Colombia no brinda condiciones de confort térmico tanto en un escenario de cambio climático como en el escenario actual, pues en ambas situaciones los casos favorables representan un bajo porcentaje respecto del total de los casos evaluados.

Palabras clave

cambio climático, viviendas de interés social, confort térmico.

ABSTRACT

Climate change is globally one of the most relevant problems of the 21st century and despite strategies that seek to minimize its consequences, it is an irreversible reality. Therefore, it is pertinent to analyze its impact on Colombian architecture, specifically on Social Housing (SH), the type of building most frequently built in the country. The purpose of this research was to get to know the thermal performance of current SH, in relation to climate change, based on a standard model for the most populated cities in Colombia, namely Bogotá, Medellín, and Cali. This model was made using computer simulations in three future scenarios (2030/2050/2080), which allowed diagnosing how climate change will affect the thermal comfort of the occupants. The results show that, of the total number of scenarios evaluated (576), only 18.9% are in an acceptable range of time in thermal comfort (>70%). This indicates that most of the SH currently built in Colombia do not provide thermal comfort conditions either under a climate change scenario or in the current scenario, since in both situations the favorable cases represent a low percentage with respect to the total number of cases evaluated.

Keywords

climate change, social housing, thermal comfort.

RESUMO

As mudanças climáticas são uma das questões mais relevantes do século XXI em nível global e, apesar do desenvolvimento de estratégias para minimizar suas consequências, é uma realidade irreversível. Portanto, é pertinente analisar seu impacto na arquitetura colombiana, especificamente na Habitação de Interesse Social (HIS), o tipo de construção mais comum no país. O objetivo desta pesquisa foi conhecer o desempenho térmico da HIS atual em relação às mudanças climáticas, com base em um modelo padrão para as cidades mais populosas da Colômbia: Bogotá, Medellín e Cali. Esse modelo foi criado por meio de simulações computacionais em três cenários futuros (2030/2050/2080), que permitiram diagnosticar como as mudanças climáticas afetarão o conforto térmico dos ocupantes. Os resultados mostram que, dos cenários avaliados (576) apenas 18,9% estão em uma faixa aceitável de conforto térmico (>70%). Isso indica que a maior parte da HIS atualmente construída na Colômbia não oferece condições de conforto térmico tanto em um cenário de mudanças climáticas quanto no cenário atual, pois em ambas as situações os casos favoráveis representam uma porcentagem baixa em relação ao total de casos avaliados.

Palavras-chave

mudanças climáticas, habitação de interesse social, conforto térmico.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático es una de las problemáticas ambientales más relevantes del siglo XXI a nivel mundial. Es hoy el objetivo número 13 para el desarrollo sostenible propuesto por las Naciones Unidas y, a pesar del desarrollo de estrategias que buscan combatirlo y minimizar sus consecuencias, es una realidad irreversible (IPCC, 2007). En el caso específico de Colombia, los fenómenos como El Niño y La Niña son un ejemplo típico de cómo la variabilidad climática interanual ha ido cambiando (Pabón & Montealegre, 2017). Por esta razón, es importante analizar su impacto sobre la arquitectura colombiana, específicamente en la Vivienda de Interés Social (en adelante, VIS) y reflexionar acerca de su capacidad de resiliencia, ya que su construcción comprende uno de los índices más altos del país.

Colombia se encuentra ubicada sobre la línea ecuatorial en la zona tropical de Sudamérica, por lo que recibe un alto aporte de radiación solar anual. Esta ubicación específica conlleva a que su clima esté determinado por su topografía, es decir, que los cambios meteorológicos fluctúan según la posición geográfica de las ciudades (IDEAM & UNAL, 2018). Debido a esta particularidad, el país no puede categorizarse dentro de un solo clima específico, por lo que en ocasiones no resultan evidentes las consecuencias que el cambio climático ocasiona en el territorio nacional. Frente a esta situación, Pabón (2012) argumenta que la expresión contundente del calentamiento global y del cambio climático en el territorio colombiano es la reducción del área de los glaciares de montaña y las tendencias de incremento del nivel medio del mar en las costas colombianas. Por este motivo, la arquitectura colombiana debería considerar un proceso de adaptación que priorice las dinámicas ambientales actuales y futuras del país.

Colombia viene presentando desde mediados del siglo XX un patrón claro de crecimiento en los centros urbanos, en cuanto a que las capitales del país superan el 90% del nivel de urbanización, mientras que las ciudades de menor tamaño presentan un crecimiento mucho mayor frente a la ruralidad (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2021b). Lo anterior evidencia la necesidad de empezar a evaluar cuáles son los criterios que se tienen en cuenta, en la actualidad, para el diseño de edificaciones.

Según el grupo intergubernamental de expertos sobre el cambio climático, la operación y construcción de edificios producen el 38% de todas las emisiones de CO₂ relacionadas con la energía, por lo que estas deben reducirse a la mitad para el año 2030 si se desea encaminar al sector de la construcción hacia la neutralidad climática en 2050 (IPCC, 2020).

Dentro de las estrategias planteadas en estudios existentes a nivel internacional para enfrentar el cambio climático, se destacan dos posibilidades, por una parte, Aleksic et al. (2016) proponen “mitigación y adaptación”, ambas aplicables desde cualquier sector de la sociedad. Según los autores, desde el punto de vista arquitectónico, la mitigación se aborda desde la creación de edificios eficientes energéticamente, a través del uso de energías renovables y una adecuada selección de materiales, mientras que la adaptación al cambio climático busca construir edificaciones eficientes energéticamente y además adaptadas a las condiciones naturales de su contexto. Así pues, se plantea que la atención hasta ahora en el campo arquitectónico se ha centrado en medidas de mitigación, lo que ha generado que la prioridad no sea la implementación de estrategias que ayuden a que las construcciones existentes sean resilientes a su entorno.

Teniendo en cuenta esto, los autores exponen varios ejemplos de viviendas resilientes a condiciones climáticas extremas como huracanes, inundaciones o terrenos inestables, las cuales, por medio de su adaptabilidad, resisten a estas situaciones. Al analizar esto en el contexto colombiano, se ratifica la necesidad de plantear viviendas y espacios resilientes a las condiciones climáticas del contexto y de esta forma, además de prever la respuesta a adversidades climáticas, se puede contribuir a la mejora de la calidad de vida de las personas, pues como expone Eckardt (2011) “la resiliencia posibilita la condición de convivencia de las comunidades con las condiciones de riesgo de un determinado territorio.”

Asimismo, dentro del proceso de adaptación al cambio climático se ha demostrado también la relevancia que ejerce el confort térmico en la salud de las personas y esto sucede por la gran cantidad de tiempo que se pasa en espacios cerrados. Gamble et al. (2009) exponen que una persona puede pasar más del 90% de su vida en un edificio, lo que demuestra la incidencia que el diseño de este tiene sobre su salud. Por este motivo, la explicación de Soto-Estrada et al. (2016) y Januszkiewicz (2017) resulta relevante en este punto, ya que, a pesar de investigar en lugares del mundo aislados, Colombia y Polonia coinciden en la importancia que tiene el diseño de la envolvente en una construcción.

En sus estudios ambos mencionan que las edificaciones resilientes, además de generar espacios confortables térmicamente, ayudan a que la salud física y mental de las personas no se vea perjudicada, ratificando la relación directa que existe entre arquitectura, salud y cambio climático. Así pues, los dos estudios demuestran que el tipo de arquitectura que se desarrolla actualmente, en los dos contextos analizados, no responde a su entorno inmediato y con ello se concluye que la arquitectura en la que habitamos no es resiliente al cambio climático. Entendiéndolo de esta manera, es trascendental empezar

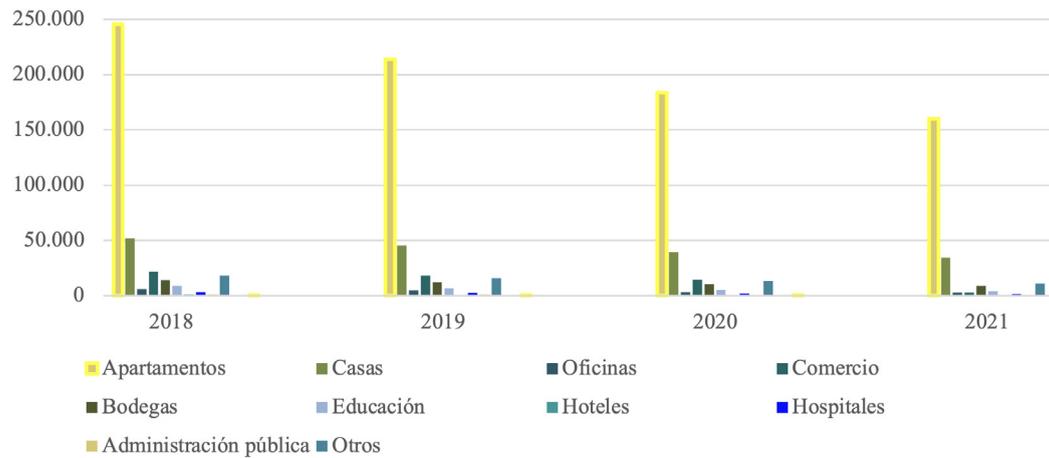


Figura 1: Promedio anual del área nueva por destinos, períodos 2018-2021. Fuente: Elaboración de los autores a partir del Censo de Edificaciones (CEED)

a desarrollar viviendas que desde su diseño garanticen a sus ocupantes bienestar tanto para el momento de ser concebidos, como también para escenarios futuros.

Adicionalmente, desde el punto de vista urbano, también se ha empezado a hablar sobre la importancia de la resiliencia con respecto al cambio climático y su relación con la sostenibilidad. Alabsi et al. (2021) mencionan que la adaptación climática es uno de los criterios más relevantes para la sostenibilidad y da como ejemplo ciudades en Asia en donde han logrado encontrar una armonía entre arquitectura y medio ambiente en función de la experiencia y la cultura de la comunidad local. Asimismo, Gifreu (2018) se atreve a repensar la definición del desarrollo sostenible, exponiendo que este debe ser “puntual para prevenir y mitigar los efectos del cambio climático”.

De esta manera, es fundamental entender que el cambio climático es un hecho, así como también lo es la necesidad de indagar sobre medidas no solo de mitigación, sino también de adaptación a este, pues el panorama descrito reafirma la necesidad de consolidar edificaciones resilientes a las condiciones climáticas que se avecinan.

Teniendo en cuenta esto, se planteó como objetivo principal de la presente investigación estudiar el comportamiento térmico frente al cambio climático de las VIS ubicadas en las tres ciudades más pobladas de Colombia: Bogotá, Medellín y Cali, por medio de simulaciones computacionales para observar su conducta en tres escenarios futuros (2030/2050/2080).

LA VIVIENDA EN COLOMBIA

Durante los cuatro años comprendidos entre el 2018 y 2021, la vivienda multifamiliar fue el tipo de construcción que mayor área nueva representó en Colombia, sumando el 68% promedio del área nueva construida según un

estudio del año 2021 realizado por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (2021a), y cuyos datos se pueden observar en la Figura 1. Esta fue la razón principal por la cual la presente investigación se centró en la vivienda multifamiliar colombiana, pues al ser la más representativa, puede llevar a un mayor impacto social. Asimismo, dentro del documento citado, es la VIS la que mayor área representó en el sector de la vivienda multifamiliar, acotando nuestro caso de estudio.

La VIS en Colombia es definida por el Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio (2020) como “aquella que reúne los elementos que aseguran su habitabilidad, estándares de calidad en diseño urbanístico, arquitectónico y de construcción y que cuyo valor máximo es de ciento cincuenta salarios mínimos legales mensuales vigentes (150 SMLMV)”.

Para el año 2021, la VIS se ha convertido en una de las principales estrategias para brindarle un hogar a las familias colombianas. Sin embargo, estas viviendas no se construyen teniendo en cuenta las condiciones medioambientales ni los parámetros de sostenibilidad que garanticen el bajo consumo energético.

Giraldo & Herrera (2017) y Giraldo et al. (2015) exponen que en la VIS en Colombia no se implementan estrategias de climatización pasivas, sino que se suelen usar sistemas de ventilación mecánicos para ayudar a mejorar la sensación de confort interno del edificio, lo cual genera un mayor consumo de energía. Según lo anterior, las VIS en Colombia no son diseñadas para afrontar las condiciones climáticas actuales ni futuras de su contexto sin el uso de estrategias activas que ayuden a mejorar las condiciones de confort. Giraldo & Herrera (2017) argumenta que se desconoce el manejo científico del confort a través de estrategias pasivas en el momento de diseñar estas viviendas, lo que, en consecuencia, genera un desarrollo de edificios descontextualizados que no garantizan el bienestar de sus habitantes.



Figura 2: Resumen gráfico de la metodología implementada para la investigación. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 1: Humedad relativa y temperatura promedio para las ciudades evaluadas. Escenario actual y escenarios futuros. Fuente: Elaboración de los autores.

Ciudad	Año	Temperatura* promedio (°C)	Humedad relativa (%)	Temperatura* promedio día más frío (°C)	Temperatura* promedio día más caluroso (°C)	Rango de temperatura* en confort (ASHRAE 55, Confort 90)
Bogotá	Actual	13,2	81,7	11,9	13,8	24,4 - 19,4
	2030	14,4	80,8	12,3	15,6	24,8 - 19,8
	2050	15	80,6	12,6	16,6	25 - 20
	2080	16,3	80,4	14,1	17,3	25,4 - 20,4
Datos tomados de la estación meteorológica Bogotá/Eldorado, Latitud: 4,717° Longitud: -74,15°, Altitud: 2548 msnm						
Medellín	Actual	21,8	70,8	21,4	26,3	27,1 - 22,1
	2030	22,1	77,2	22,7	26,2	27,2 - 22,2
	2050	22,6	77,3	23	26,4	27,3 - 22,3
	2080	23,8	77,4	23	26,9	27,7 - 22,7
Datos tomados de la estación meteorológica Medellín/Olaya Herrera, Latitud: 6.217° Longitud: -75.6°, Altitud: 1499 msnm						
Cali	Actual	23,4	76,3	21,8	25,6	27,6 - 22,6
	2030	24,8	74,9	22,3	28,4	28 - 23
	2050	25,3	74,9	23,1	28,8	28,1 - 23,1
	2080	26,4	75,1	24,2	29	28,5 - 23,5

Datos tomados de la estación meteorológica Cali CO, Latitud: 3.4°, Longitud: -76.5°, Altitud: 944 msnm

*Temperatura de bulbo seco

METODOLOGÍA

La presente investigación implementó una metodología de tipo experimental y cuantitativa que permitió diagnosticar la capacidad de adaptación al cambio climático de las VIS en Colombia. La metodología incluyó tres etapas: una primera etapa de delimitación del caso de estudio y definición de las viviendas tipo a evaluar.

Una segunda, en la que se llevaron a cabo simulaciones computacionales de desempeño térmico para las viviendas tipo en las tres ciudades seleccionadas (Bogotá, Medellín y Cali), teniendo en cuenta las proyecciones climáticas futuras (2030/2050/2080). Por último, una tercera etapa que incluyó el procesamiento de resultados obtenidos y análisis comparativos, considerando la relación entre tiempo y lugar.

Tabla 2: Patrones de ocupación e iluminación artificial. Fuente: Elaboración de los autores

Horario	Patrones de ocupación		Patrones de iluminación artificial (DPI) (5w/m2)	
	Habitaciones (%)	Sala/Cocina (%)	Habitaciones (%)	Sala/Cocina (%)
00:00 - 00:59	100	0	0	0
01:00 - 01:59	100	0	0	0
02:00 - 02:59	100	0	0	0
03:00 - 03:59	100	0	0	0
04:00 - 04:59	100	0	0	0
05:00 - 05:59	100	0	0	0
06:00 - 06:59	100	0	100	0
07:00 - 07:59	100	0	100	0
08:00 - 08:59	0	0	0	0
09:00 - 09:59	0	0	0	0
10:00 - 10:59	0	0	0	0
11:00 - 11:59	0	0	0	0
12:00 - 12:59	0	0	0	0
13:00 - 13:59	0	0	0	0
14:00 - 14:59	0	50	0	0
15:00 - 15:59	0	50	0	0
16:00 - 16:59	0	50	0	100
17:00 - 17:59	0	50	0	100
18:00 - 18:59	0	100	0	100
19:00 - 19:59	0	100	0	100
20:00 - 20:59	0	100	0	100
21:00 - 21:59	0	100	0	100
22:00 - 22:59	100	0	100	0
23:00 - 23:59	100	0	100	0

En la Figura 2 se esquematiza y describe detalladamente el proceso metodológico de la investigación.

Para la delimitación del caso de estudio, se consideró las VIS ubicadas en las tres ciudades más pobladas del país, las cuales, de acuerdo con el último censo de población y vivienda del año 2018, son Bogotá, Medellín, y Cali (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, 2018). Luego, se identificó el rango del valor comercial definido para la VIS en el país, el cual para el año 2022 oscila entre los \$17.746,7 US (70 SMLMV) hasta los \$34.225,7 US (150 SMLMV).

Posterior a la definición del rango y ubicación, se procedió con una recolección de datos de la oferta comercial actual del sector inmobiliario a través de búsqueda en sitios web, con la intención de determinar un modelo de vivienda tipificado en cada una de las ciudades a estudiar. En esta fase se consideraron 20 proyectos de VIS multifamiliar

recientemente terminados o en construcción. De estos, se identificaron ocho aspectos de las tipologías de vivienda evaluadas: área de apartamento, número de habitaciones, número de fachadas expuestas, inclusión de balcón, cantidad de ventanas por habitación, zona social y cocina, y altura total del edificio.

Una vez establecida cada vivienda tipo, se llevaron a cabo simulaciones computacionales de desempeño térmico en el programa Rhinoceros 3D con el plug-in ClimateStudio, el cual se soporta en el motor de cálculo EnergyPlus para sus simulaciones de desempeño térmico (Solemnia, 2020). Este permite realizar simulaciones de eficiencia energética, acceso de luz natural, desempeño de luz artificial y aspectos de confort térmico y visual.

Para el desarrollo de las simulaciones, se tomaron archivos climáticos de las estaciones meteorológicas principales para cada una de las ciudades seleccionadas.

Tabla 3: Tasa metabólica y cargas internas establecidas por ciudad. Fuente: Elaboración de los autores.

Apartamento tipo - Bogotá						
Espacio	Área (m2)	Cant. de personas	Personas/m2	Tasa metabólica	Equipos (kW)	
Cocina / Sala	15,8	4	0,25	1,8	7,59	
Habitación principal	8,25	2	0,24	0,7	n/a	
Habitación 1	4,97	1	0,2	0,7	n/a	
Habitación 2	6,61	1	0,15	0,7	n/a	
Apartamento tipo - Medellín						
Cocina / Sala	18,03	4	0,22	1,8	6,66	
Habitación principal	12,08	2	0,17	0,7	n/a	
Habitación 1	5,96	1	0,17	0,7	n/a	
Habitación 2	5,96	1	0,17	0,7	n/a	
Apartamento tipo - Cali						
Cocina / Sala	17,92	4	0,22	1,8	6,7	
Habitación principal	9,52	2	0,21	0,7	n/a	
Habitación 1	4,95	1	0,2	0,7	n/a	
Habitación 2	6,17	1	0,16	0,7	n/a	

Posteriormente, estos archivos fueron procesados por medio del software de proyección climática Meteorm, para así generar archivos climáticos en tres escenarios futuros (2030/2050/2080). En la Tabla 1 se presentan los datos climáticos más relevantes de las ciudades evaluadas para el escenario actual y los futuros.

Junto con el análisis de los datos climáticos, se llevaron a cabo cuatro simulaciones anuales (actual, 2030, 2050 y 2080) para los espacios mayormente ocupados de la vivienda tipo de cada ciudad y variando en estas la orientación de su fachada principal. Los resultados arrojaron como dato más relevante la temperatura operativa horaria en un período de tiempo determinado, de acuerdo con el uso de los espacios evaluados. Adicionalmente, se consideró la variable de ubicación de la vivienda en relación con el edificio, por lo que se simuló tres situaciones por cada vivienda tipo: el primero ubicado en el primer nivel, el segundo ubicado en un nivel intermedio y el tercero ubicado en el nivel superior.

Para la definición de horarios de ocupación, patrones de iluminación artificial, cantidad de personas y carga térmica de equipos, se tuvo en cuenta la normativa establecida por la Asociación Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), (2013), quienes manejan estándares claros y coherentes con la realidad colombiana (Tabla 2). Con respecto a la tasa metabólica, se trabajó con las cifras determinadas por el CBE thermal comfort tool, que maneja estándares específicos para cada actividad (Tabla 3). Para la ventilación natural, al ser un espacio en régimen pasivo,

esta se considera que se dé a través de las aberturas, a las cuales se les asignó una temperatura de operatividad, porcentaje de apertura y horario determinados (Tabla 4).

Por otra parte, desde hace un buen tiempo, se han creado escenarios de proyección del cambio climático como herramienta para la investigación y evaluación del impacto y mitigación del cambio climático. Estos son definidos como “[...] alternativas con base en supuestos, de cómo evolucionará el mundo, por lo que no son pronósticos, ya que no se les asocian probabilidades” (Escoto et al., 2017) y son publicados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el cambio climático (IPCC).

El objetivo principal de estos escenarios es facilitar la investigación y evaluación del cambio climático, reduciendo el rango de incertidumbre en los esfuerzos que se hacen para su mitigación y adaptación (O’Neill et al., 2014). Es por esto que autores como Kebede et al. (2018) y O’Neill et al. (2014) recomiendan a la comunidad científica que considere un conjunto de escenarios comunes.

No obstante lo anterior, para la presente investigación solo fue posible generar el escenario A2 de los escenarios SRES para los archivos climáticos considerados, el cual representa uno de los escenarios menos optimista de este conjunto. De acuerdo con lo planteado en la literatura académica, este escenario resulta equivalente a un punto medio entre los escenarios RCP 6 y 8.5 (Pereira Ruchansky, 2019). Por su parte, en relación con el acumulado total de emisiones de CO2 entre 1990 y 2100 para diferentes

Tabla 4: Temperatura, porcentaje y horario de habilitación para de apertura de ventana. Fuente: Elaboración de los autores.

Ciudad	Año	Temperatura operativa que habilita la apertura de ventana	Procentaje de apertura efectiva de ventana	Horario habilitado para operación de ventana
Bogotá	Actual	21,9		
	2030	22,3		
	2050	22,5		
	2080	22,9		
Medellín	Actual	24,6	50% (sistema de apertura corrediza)	Horario de ocupación determinado para cada espacio. Ver Tabla X
	2030	24,7		
	2050	24,8		
	2080	25,2		
Cali	Actual	25,1		
	2030	25,5		
	2050	25,6		
	2080	26		
Infiltraciones consideradas		Tasa de renovación por infiltración: 0,5 cambios de aire por hora		

Tabla 5. Características de escenarios SRES. Fuente: Elaboración de los autores con base en la traducción y adaptación de Quante & Bjørnæs (2016) hecha por Pereira Ruchansky (2019)

Escenario	Descripción
A1	Crecimiento económico mundial muy rápido, alcanzando la población mundial máxima hacia mediados de siglo, desarrollo alternativo de tecnologías de energía. Se divide en tres grupos, que reflejan alternativas de cambio tecnológico: intensiva en combustibles fósiles (A1FI), energías de origen no fósil (A1T), y equilibrio entre las distintas fuentes (A1B)
A2	Mundo muy heterogéneo con crecimiento de población fuerte, desarrollo económico lento, y cambio tecnológico lento
B1	Escenario con la misma población mundial que A1, pero con una evolución más rápida de las estructuras económicas hacia una economía de servicios y de información.
B2	Mundo con población y crecimiento económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para alcanzar la sostenibilidad económica, social y medioambiental

grupos escenarios, se establece que el escenario A2 podría estar cercano al SSP3 y el SSP4 (Pedersen et al., 2021). El escenario considerado se describe en la Tabla 5.

A continuación, se analizaron los resultados obtenidos de las simulaciones descritas, considerando el estándar ASHRAE 55:2020 de confort adaptativo para edificios naturalmente ventilados. Esto permitió identificar el nivel de confort térmico para cada uno de los espacios evaluados en las viviendas a partir de la determinación del porcentaje de tiempo en confort establecido por dicho estándar.

Para evaluar el desempeño térmico se han creado múltiples estándares y normas a nivel mundial como, por ejemplo, el Reglamento de Instalaciones Térmicas de los Edificios (RITE), la norma ISO 7730:2005, ASHRAE 55:2020 y la norma UNE-EN 16798-1:2020. Sin embargo, dentro de la normativa colombiana no se cuenta con un estándar propio que permita evaluar de manera objetiva el confort.

Esta investigación consideró el estándar ASHRAE 55:2020 para el procesamiento de datos, pues ha sido ampliamente citado en normativas relacionadas

Tabla 6. Características constructivas de la vivienda tipo para cada ciudad. Fuente: Elaboración de los autores.

Ciudad/característica	Cali	Medellín	Bogotá
Área (m ² - por rangos)	50m ² - 60m ²	50m ² - 60m ²	50m ² - 60m ²
Número de habitaciones	2 habitaciones	3 habitaciones	2 habitaciones
Fachadas expuestas	1 fachada expuesta	1 fachada expuesta	1 fachada expuesta
Existencia de balcón	Con balcón	Con balcón	Sin balcón
Ventanas habitaciones	1 ventana	1 ventana	1 ventana
Ventanas cocina	sin ventanas	1 ventana	1 ventana
Ventanas por zona social	1 ventana	1 ventana	1 ventana
Número de pisos	8 pisos	23 pisos	12 pisos
Altura libre interior	2,24m	2,20m	2,30m
Acabado de piso interior	Concreto a la vista (sin mortero de nivelación)	Concreto a la vista (con mortero de nivelación)	Concreto a la vista (sin mortero de nivelación)
Materialidad muros interiores	Muros divisorios en ladrillo con espesor promedio de 12cm		
Materialidad muros exteriores	Muros exteriores en concreto reforzado con acabado colores claros (ej. Blanco, amarillo, azul claro)		Muros exteriores en concreto reforzado con acabado en colores oscuros (ej. Gris oscuro, café oscuro)
Materialidad y acabado de losa	Losa maciza de 10cm de espesor. Acabado en cara inferior con pintura texturizada color blanco		
Materialidad de la cubierta	Losa maciza de 10cm de espesor. Acabado en cara inferior con pintura texturizada color blanco. Acabado en cara superior con impermeabilizante y mortero de 5cm)		
Ventanería	Ventanería de aluminio natural y vidrio claro de 3mm		
Transmitancia térmica de materiales opacos			
Ciudad	Elemento constructivo	U-Value [W/m ² K]	Heat Capacity [[k]/m ² k]
Bogotá - Cali - Medellín	Cubierta	3.696	272.32
	Muros fachadas	3.911	367.92
	Muros interiores	2.861	227,52
	Losa de entrepiso	4.444	229.575
	Losa contrapiso	3.39	570
Características de elementos translúcidos			
Ciudad	U-Value [W/m ² K]	SHGC	Tvis
Bogotá - Cali - Medellín	5.82	0.818	0.877
Elementos de protección fijos y móviles			
En ningún caso se consideraron elementos de protección en las ventanas, ni fijos o móviles (ej: aleros, cortinas)			

Y sistemas de certificación de edificaciones verdes, además de ser considerado uno de los más apropiados para evaluar el desempeño térmico de viviendas que funcionan en oscilación libre (Rubio et al., 2017). Este se basa en el porcentaje de personas insatisfechas (PPD por sus siglas en inglés) y en voto medio previsto (PMV por sus siglas en inglés) como la mayoría de los estándares citados. Esta norma propone un modelo para determinar los requerimientos del confort térmico en edificios naturalmente ventilados y solo es aplicable cuando los ocupantes realizan una actividad sedentaria, con tasa metabólica entre 1 y 1.3 met. Asimismo, contempla dos

límites de temperatura operativa superior y dos inferiores, que corresponden a un índice de aceptabilidad del 80% y 90% respectivamente, y es a partir de los cuales se define el rango de confort para determinado espacio (Godoy, 2012) En la Tabla 6 se presentan los rangos de confort de aceptabilidad del 90% para cada escenario evaluado.

En relación con la definición de la vivienda tipo, a partir de la búsqueda realizada de la oferta del sector inmobiliario se definieron las características para establecer una para cada ciudad de estudio. En la Tabla 6 se presentaron los aspectos evaluados y se identificaron las características



Figura 3. Plantas arquitectónicas de vivienda tipo para Cali, indicando ubicación de aberturas y de obstrucciones. Fuente: Elaboración de los autores.

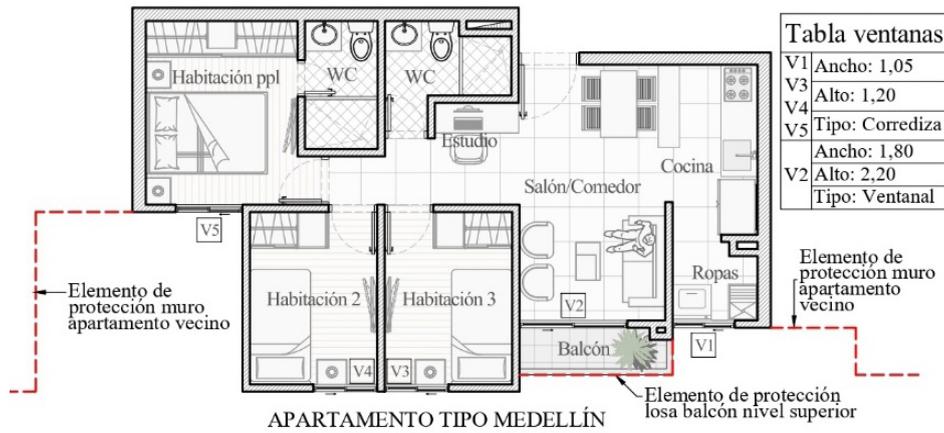


Figura 4. Plantas arquitectónicas de vivienda tipo para Medellín, indicando ubicación de aberturas y de obstrucciones. Fuente: Elaboración de los autores.

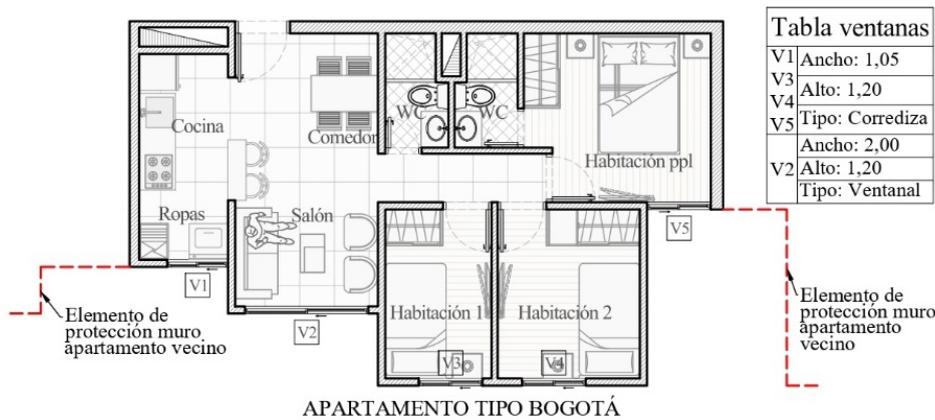


Figura 5. Plantas arquitectónicas de vivienda tipo para Bogotá, indicando ubicación de aberturas y de obstrucciones. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 7. Resumen de los resultados obtenidos por porcentaje de escenarios favorables. Fuente: Elaboración de los autores.

Ciudad	Piso	Año	Cocina y sala	Hab. principal	Hab. 1	Hab. 2	Porcentaje de escenarios favorables por ciudad	Porcentaje de escenarios favorables totales
Cali	Primer piso	Actual	100%	25%	100%	50%	26%	
		2030	100%	25%	100%	100%		
		2050	100%	25%	100%	100%		
		2080	100%	25%	100%	100%		
	Piso intermedio	Actual	0%	0%	0%	0%		
		2030	0%	0%	0%	0%		
		2050	0%	0%	0%	0%		
		2080	0%	0%	0%	0%		
	Último piso	Actual	0%	0%	0%	0%		
		2030	0%	0%	0%	0%		
		2050	0%	0%	0%	0%		
		2080	0%	0%	0%	0%		
Porcentaje de escenarios favorables por espacio			33,33%	8,33%	33,33%	29,17%		
Medellín	Primer piso	Actual	50%	0%	0%	0%	14%	18,92%
		2030	50%	0%	0%	50%		
		2050	75%	25%	25%	50%		
		2080	100%	50%	100%	100%		
	Piso intermedio	Actual	0%	0%	0%	0%		
		2030	0%	0%	0%	0%		
		2050	0%	0%	0%	0%		
		2080	0%	0%	0%	0%		
	Último piso	Actual	0%	0%	0%	0%		
		2030	0%	0%	0%	0%		
		2050	0%	0%	0%	0%		
		2080	0%	0%	0%	0%		
Porcentaje de escenarios favorables por espacio			22,92%	6,25%	10,42%	16,67%		
Bogotá	Primer piso	Actual	50%	25%	0%	0%	17%	
		2030	50%	25%	0%	0%		
		2050	0%	0%	0%	0%		
		2080	25%	0%	0%	0%		
	Piso intermedio	Actual	75%	100%	0%	0%		
		2030	75%	100%	0%	0%		
		2050	25%	50%	0%	0%		
		2080	75%	100%	25%	0%		
	Último piso	Actual	0%	0%	0%	0%		
		2030	0%	0%	0%	0%		
		2050	0%	0%	0%	0%		
		2080	0%	0%	0%	0%		
Porcentaje de escenarios favorables por espacio			31,25%	33,33%	2,08%	0,00%		

Tabla 8. Consolidado de porcentaje de escenarios en los que se alcanza el 70% o más del tiempo en confort térmico. Fuente: Elaboración de los autores

Ciudad	Cali	Medellín	Bogotá	Total escenarios
Actual	12%	2%	9%	22%
2030	12%	4%	10%	25%
2050	12%	6%	3%	20%
2080	12%	12%	9%	33%

más representativas para cada uno de ellos. Por su parte, la Figura 3, Figura 4 y Figura 5 representan las plantas arquitectónicas de estos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el procesamiento y análisis de los resultados se partió por definir una unidad mínima de análisis, es decir, un escenario. En total, se analizaron 576 escenarios, que se componen de los siguientes parámetros de análisis: una ciudad, un espacio, un año, una ubicación en relación con el edificio y una orientación. Los resultados de las temperaturas operativas en los horarios de ocupación para cada escenario fueron enfrentadas al rango de confort determinado para cada caso, a fin de identificar el tiempo en el que ese escenario se encuentra en confort térmico.

Posteriormente, se definió un valor mínimo que establece un escenario como "aceptable", en términos de confort térmico. Dentro de la bibliografía académica se ha indagado sobre los límites de aceptabilidad para el índice de voto medio previsto (PMV), considerando variables como las fluctuaciones de la temperatura exterior durante el día o el año (Lenzuni, 2021), así como también en la validación de indicadores para evaluar el confort térmico interior, como por ejemplo, el porcentaje de tiempo que se encuentra un espacio dentro del rango de confort térmico (Rueda et al., 2023). Sin embargo, no se encontró un mínimo de aceptabilidad relacionado con el tiempo en confort térmico de un espacio.

En consecuencia, para el análisis de los resultados obtenidos se consideró que los escenarios con 70% o más del tiempo dentro del rango de confort térmico serían espacios con un desempeño térmico "aceptable". Dicho valor se define al considerar que los escenarios evaluados se encuentran en oscilación libre, condición que dificulta alcanzar el 100% del tiempo en confort térmico.

Con la información obtenida se obtuvo, por un lado, una tabla resumen (Tabla 7) que identifica el porcentaje de los escenarios por espacio, por ciudad y totales encontrados dentro de ese rango aceptable de tiempo en confort. Por otro lado, se resumió en la Tabla 8 el porcentaje

de escenarios favorables para cada año, por ciudad y escenarios totales, permitiendo identificar las variaciones entre años.

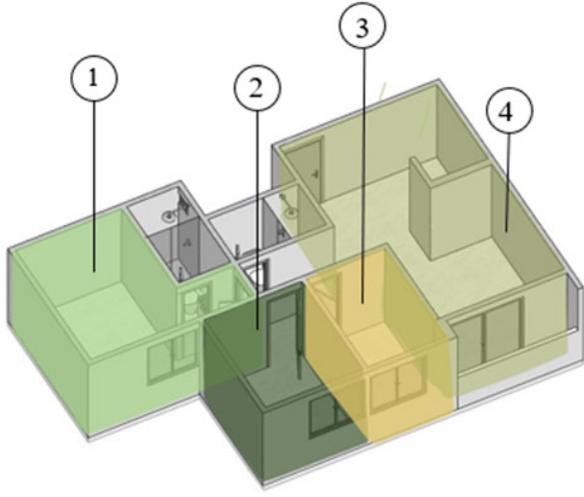
Adicionalmente, en la Figura 6 se identificaron los escenarios más favorables y desfavorables para cada ciudad, considerando la combinación de los parámetros de análisis que arrojaron el mayor y menor tiempo en confort.

De los resultados obtenidos, se observan comportamientos particulares por ciudad y también tendencias generales. Desde una perspectiva general, para Cali y Medellín se presenta un comportamiento diferenciado entre la planta baja, el piso intermedio y superior. Para el primer nivel se presenta un mayor porcentaje de tiempo en confort térmico en la mayoría de los espacios analizados, sin importar orientación ni año evaluado. En contraposición, para estas mismas ciudades, los apartamentos en pisos intermedios y superiores presentan un mayor porcentaje de tiempo por encima del confort térmico en los escenarios evaluados, indicando ganancias térmicas elevadas, situación que también hallaron Murillo et al. (2022) para una VIS existente en la ciudad de Medellín.

Asimismo, se observa un patrón en relación con los tiempos de desconfort térmico. En Medellín y Cali, para la mayoría de estos escenarios, la principal causa son las temperaturas elevadas. Por su parte, en Bogotá solo se presentan situaciones con temperaturas bajas (Tabla 9). Esta condición podría evaluarse según investigaciones como la de Pérez-Fargallo et al. (2018), en la que plantea estándares de confort específicos para cada caso. Se asume además que la situación descrita responde a las condiciones climáticas específicas de cada ciudad.

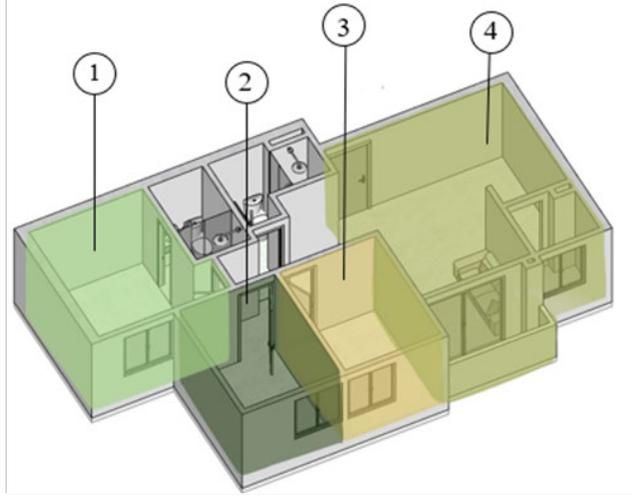
Desde un análisis particular por ciudad, se observa que Cali cuenta con solo el 26% de los escenarios evaluados dentro del rango de tiempo en confort aceptable. Sin embargo, las variaciones de los porcentajes resultantes para estos no se producen entre cada año evaluado. Lo anterior indica que, para este contexto, el déficit de confort no pareciera ser consecuencia del cambio climático, sino más bien del diseño de la VIS actual para Cali. En vista de lo anterior, garantizar una vivienda confortable térmicamente para el escenario actual debería ser la prioridad, lo que a su vez significaría que

Vivienda tipo – Cali



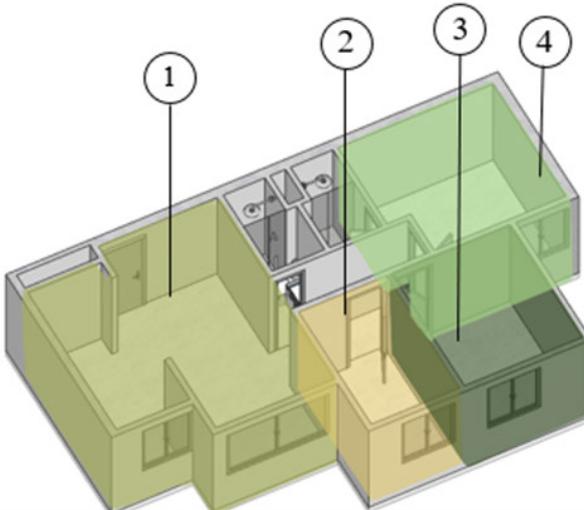
	Escenario desfavorable:	Escenario favorable:
HABITACION PRINCIPAL 1	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 5%	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: Actualidad Tiempo en confort: 82%
HABITACION 1 2	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 4%	Nivel: Inferior Orientación: Norte Años: Actualidad Tiempo en confort: 94%
HABITACION 2 3	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 19%	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 86%
COCINA Y SALA 4	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste y Este Años: 2030, 2050 y 2080 y Actualidad Tiempo en confort: 0%	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: Todos Tiempo en confort: 99%

Vivienda tipo - Medellín



	Escenario desfavorable:	Escenario favorable:
HABITACION PRINCIPAL 1	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2030, 2050 y 2080 Tiempo en confort: 0%	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: Actualidad Tiempo en confort: 99%
HABITACION 1 2	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 15%	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 91%
HABITACION 2 3	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 3%	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 95%
COCINA Y SALA 4	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2050 y 2080 Tiempo en confort: 0%	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 95%

Vivienda tipo - Bogotá



	Escenario desfavorable:	Escenario favorable:
HABITACION PRINCIPAL 1	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: 2050 Tiempo en confort: 37%	Nivel: Intermedio Orientación: Norte y Oeste Años: 2030 y 2050 Tiempo en confort: 97%
HABITACION 1 2	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 6%	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 73%
HABITACION 2 3	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2030 Tiempo en confort: 0%	Nivel: Último Orientación: Norte Años: 2030 Tiempo en confort: 69%
COCINA Y SALA 4	Nivel: Intermedio Orientación: Oeste Años: 2030 Tiempo en confort: 7%	Nivel: Inferior Orientación: Oeste Años: 2080 Tiempo en confort: 94%

Figura 6. Escenarios más desfavorables y favorables para cada ciudad y espacio analizado. Fuente: Elaboración de los autores.

Tabla 9. Porcentaje de escenarios en disconfort, según ciudad y totales de acuerdo con ubicación dentro del rango de confort.
 Fuente: Elaboración de los autores.

Ciudad	Espacio	Mayor porcentaje de tiempo por encima del rango de confort	Mayor porcentaje de tiempo por debajo del rango de confort
Cali	Cocina y sala	67%	0%
	Habitación principal	67%	25%
	Habitación 1	67%	0%
	Habitación 2	67%	0%
	Porcentaje del total de escenarios para Cali	67%	6%
Medellín	Cocina y sala	67%	10%
	Habitación principal	67%	27%
	Habitación 1	67%	23%
	Habitación 2	67%	17%
	Porcentaje del total de escenarios para Medellín	67%	19%
Bogotá	Cocina y sala	0%	65%
	Habitación principal	0%	67%
	Habitación 1	0%	98%
	Habitación 2	0%	100%
	Porcentaje del total de escenarios para Bogotá	0%	82%
Porcentaje del total de escenarios evaluados		44%	36%

estaría preparada para el escenario futuro del cambio climático.

Por otro lado, en Bogotá se presenta mayor tiempo en confort térmico cuando la fachada expuesta se orienta a este y oeste, en comparación con la orientación norte y sur, las cuales no tienen una incidencia solar directa debido al comportamiento del sol en Colombia.

Finalmente, el espacio con mayor afectación frente al cambio climático son las habitaciones, en donde se ven más marcadas las diferencias del tiempo en confort entre los años evaluados, diferente a la cocina en la que las variaciones se encuentran entre el 1%-2%.

CONCLUSIONES

Del total de los escenarios evaluados (576), tan solo el 18,9% se encuentra dentro de un rango aceptable de tiempo en confort térmico. Dentro de esta cifra, es Cali la ciudad en la se observan mayores porcentajes de tiempo en confort térmico, tanto en la actualidad como en la proyección del cambio climático, donde un 26% de los escenarios evaluados para esta ciudad se encuentran dentro del rango de temperatura en confort, porcentaje

igualmente bajo. Adicionalmente, sorprende que, para el total de los casos evaluados en las tres ciudades, se presenta una tendencia favorable con el paso del tiempo. Por ejemplo, para el 2080, aumenta el porcentaje de escenarios favorables en un 11%, frente al porcentaje de escenarios favorables para el clima actual, para el que se obtiene un 78% de los casos evaluados por fuera del rango en confort térmico.

Lo anterior indica que la mayor parte de la VIS actualmente construida en Colombia no brinda condiciones de confort térmico tanto en un escenario de cambio climático, como en el escenario actual, pues en ambas situaciones los casos favorables representan un bajo porcentaje respecto al total de los casos evaluados. Esta situación se ve agravada por la similitud encontrada entre los diseños arquitectónicos de apartamentos en las diferentes ciudades, ya que evidencia una desconexión con el contexto climático, lo que podría ser uno de los principales motivos por los que se presentan situaciones como las que se reflejan en los resultados obtenidos.

Para futuras investigaciones se hace urgente indagar en estrategias de diseño que respondan al cambio climático para las viviendas nuevas, así como en estrategias de adaptación al cambio climático para viviendas existentes,

considerando en ambos escenarios, como primera medida, satisfacer el confort térmico del contexto actual. Los análisis particulares por ciudad, así como la identificación de algunas tendencias descritas en el apartado anterior, pueden servir como punto de partida para lo propuesto.

Cabe destacar, además, que dentro de las simulaciones se tomaron las consideraciones tales como no incluir preexistencias o vecinos, ya que no había un entorno estimado por ser situaciones hipotéticas. Adicionalmente, las rutinas para el usuario considerado son las establecidas en estándares internacionales, es decir, no están acotadas a la realidad sociocultural colombiana. Esto se debe a que, en la actualidad, no hay un perfil creado que pueda ser estudiado en este tipo de análisis específicos.

Finalmente, al ser una investigación que no considera mediciones reales de los espacios, sus conclusiones, si bien pueden dar indicios de posibles situaciones, estas deberán corroborarse en futuras investigaciones con mediciones en sitio y encuestas de percepción de confort térmico.

AGRADECIMIENTOS

La presente investigación se desarrolló dentro del semillero de investigación de bienestar, clima y sostenibilidad de la Universidad de San Buenaventura-Medellín, a quién los autores agradecen por promover la creación de estos espacios. Asimismo, los autores agradecen a la Facultad de Arquitectura, Diseño y Urbanismo de la Universidad de la República (Montevideo, Uruguay), especialmente a Alicia Piccion y a Lucía Pereira, por brindar apoyo técnico durante el desarrollo de la investigación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alabsi, A. A. N., Wu, Y., Koko, A. F., Alshareem, K. M. & Hamed, R. (2021). Towards Climate Adaptation in Cities: Indicators of the Sustainable Climate adaptive Urban Fabric of Traditional Cities in West Asia. *Applied Sciences*, 11(21), 10428. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112110428>

Aleksić, J., Kosanović, S., Tomanović, D., Grbić, M., & Murgul, V. (2016). Housing and Climate Change-related Disasters: A Study on Architectural Typology and Practice. *Procedia Engineering*, 165, 869–875. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.786>

ASHRAE 55 (2020). ANSI/ASHRAE Standard 55-2020: Thermal Environmental Conditions For Human Occupancy. Edit. ASHRAE Standar, American National Standards Institute (ANSI). GAJ0392, Recuperado de: www.ashrae.org

Asociación Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). (2013). NBR 15575 - *Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos - Parte 1*.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2018). *Censo nacional de población y vivienda 2018. Resultados Colombia total nacional*. DANE. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/files/censo2018/infografias/info-CNPC-2018total-nal-colombia.pdf>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021a). *Censo de edificaciones (CEED) Históricas*. DANE. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/censo-de-edificaciones/ceed-historicos>

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021b). *Informes de Estadística Sociodemográfica Aplicada: Patrones y tendencias de la transición urbana en Colombia (Nro.7)*. Gobierno de Colombia. Recuperado de: <https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/poblacion/informes-estadisticas-sociodemograficas/2021-10-28-patrones-tendencias-de-transicion-urbana-en-colombia.pdf>

Eckardt, F. (2011). Landscapes of Disaster. *Topos*, (76), 47–50. Recuperado de: https://www.uni-weimar.de/fileadmin/user/fak/architektur/professuren_institute/Stadtforschung/media/Landscapes_of_Disaster_Topos_F_Eckardt.pdf

Escoto Castillo, A., Sánchez Peña, L. & Gachuz Dalgado, S. (2017). Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP): nuevas maneras de comprender el cambio climático y social. *Estudios Demográficos y Urbanos*, 32(3), 669–693. DOI: <https://doi.org/10.24201/edu.v32i3.1684>

Gamble, J., L., Ebi, K., Grambsch, A. E., Sussman, F. G. & Wilbanks, T. J. (2009). Analyses of the Effects of Global Change on Human Health and Welfare and Human Systems (SAP 4.6) United States, *Environmental Protection Agency*, Washington, D.C.

Gifreu, J. (2018). Ciudades adaptativas y resilientes ante el cambio climático: estrategias locales para contribuir a la sostenibilidad urbana. *Revista Aragonesa de Administración Pública*, (52), 102-158. Recuperado de: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6759308>

Giraldo, C., Bedoya, C., & Alonso, L. (2015). Eficiencia energética y sostenibilidad en la vivienda de interés social en Colombia. En *Greencities & Sostenibilidad*, 155–180. Málaga, España: Universidad Politécnica de Madrid. Recuperado de: https://oa.upm.es/42543/1/INVE_MEM_2015_229809.pdf

Giraldo, W. & Herrera, C. A. (2017). Ventilación pasiva y confort térmico en vivienda de interés social en clima ecuatorial. *Ingeniería y Desarrollo*, 35(1), 77–101. Recuperado de: <http://www.scielo.org.co/pdf/inde/v35n1/2145-9371-inde-35-01-00077.pdf>

Godoy Muñoz, A. (2012). El confort térmico adaptativo: aplicación en la edificación en España. [Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cataluña]. Portal de acceso abierto al conocimiento de la UPC. Recuperado de: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18763/TFM_Alfonso%20Godoy%20Munoz.pdf?sequence=1&isAllowed=y

IDEAM & UNAL. (2018). *Variabilidad Climática y Cambio Climático en Colombia*, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales., Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de: <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023778/variabilidad.pdf>

IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. (Nro. 4). Informe público 2007. IPCC. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf

IPCC. (2020). El cambio climático y la tierra. Informe público 2020. IPCC. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf

ISO 7730 (2005). Ergonomics of the thermal environment — Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria. Recuperada de: <https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/91/39155.html>

Januszkiewicz, K. (2017). Climate Change Adopted Building Envelope as A Protector of Human Health in the Urban Environment. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 245(5), 1-7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/245/5/052004>

Kebede, A. S., Nicholls, R. J., Allan, A., Arto, I., Cazcarro, I., Fernandes, J. A., Hill, C. T., Hutton, C. W., Kay, S., Lázár, A. N., Macadam, I., Palmer, M., Suckall, N., Tompkins, E. L., Vincent, K. & Whitehead, P. W. (2018). Applying the global RCP-SSP-SPA scenario framework at sub-national scale: A multi-scale and participatory scenario approach. *Science of the Total Environment*, 635, 659-672. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.368>

Lenzuni, P. (2021). Compliance with limits of acceptability for thermal comfort, and implications for long-term comfort. *Building and Environment*, 204, 108067. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108067>

Ministerio de Vivienda Ciudad y Territorio. (2020). VIS y VIP I Minivienda. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. Recuperado de: <https://www.minvivienda.gov.co/viceministerio-de-vivienda/vis-y-vip>

Murillo, M., Calle J., Jaramillo, S., Garavito, A. & Parra, E. (2022). *Desempeño térmico de la vivienda social por niveles según el cambio climático*. VI Congreso Internacional Medio Ambiente Construido y Desarrollo Sustentable (MACDES), La Habana, Cuba.

O'Neill, B. C., Krieglér, E., Riahi, K., Ebi, K. L., Hallegatte, S., Carter, T. R., Mathur, R. & van Vuuren, D. P. (2014). A new scenario framework for climate change research: The concept of shared socioeconomic pathways. *Climatic Change*, 122, 387-400. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0905-2>

Pabón, J. (2012). Cambio climático en Colombia: Tendencias en la segunda mitad del siglo XX y escenarios posibles para el siglo XXI. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 36(139), 261-278. Recuperado de: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-39082012000200010&lng=en&nrm=iso&tlng=es

Pabón, J. & Montealegre, E. (2017). Los fenómenos de El Niño y de La Niña, su efecto climático e impactos socioeconómicos. *Revista de la Academia Colombiana de ciencias exactas*, 41(34), 1-168. Recuperado de: <https://repositorio.accefyn.org.co/handle/001/113>

Pedersen, J. S. T., Duarte Santos, F., van Vuuren, D., Gupta, J., Encarnação Coelho, R., Aparício, B. A. & Swart, R. (2021). An assessment of the performance of scenarios against historical global emissions for IPCC reports. *Global Environmental Change*, 66, 102199. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2020.102199>

Pereira Ruchansky, L. (2019). *Evaluación del desempeño térmico y energético de mejoras pasivas aplicadas a vivienda existente en contexto de cambio climático en Montevideo (Uruguay)*. [Tesis de Maestría, Universidad del Bío-Bío]. Repositorio digital-Sistema de bibliotecas Universidad del Bío-Bío. Recuperado de: http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/3868/1/Pereira_Ruchansky_Lucia.pdf

Pérez-Fargallo, A., Pulido-Arcas, J. A., Rubio-Bellido, C., Trebilcock, M., Piderit, B. & Attia, S. (2018). Development of a new adaptive comfort model for low-income housing in the central-south of Chile. *Energy and Buildings*, 178, 94-106. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.030>

Quante, M. & Bjørnæs, C. (2016). Introduction to the Assessment—Characteristics of the Region. In: Quante, M., Colijn, F. (eds) North Sea Region Climate Change Assessment. Regional Climate Studies. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-39745-0_1

Rubio-Bellido, C., Pérez-Fargallo, A., Pulido-Arcas, J. & Trebilcock, M. (2017). Application of adaptive comfort behaviors in Chilean social housing standards under the influence of climate change. *Building Simulation*, 178(10), 933-947. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12273-017-0385-9>

Rueda López, M. J., Moujalled, B., Guyot, G., Golly, B., Ondarts, M., Wurtz, F. & Gonze, E. (2023). Analysis and comparison of thermal comfort indicators based on a long-term campaign in low energy residences. *Journal of Building Engineering*, 65, 105707. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.105707>

Solem L.L.C. (2020). Solemma. ClimateStudio Documents. Recuperado de: <https://climatestudiodocs.com/docs/thermalAnalysis.html>

Soto-Estrada, E., Álvarez-Carrascal, M. F., Gómez-Lizarazo, J. & Valencia-Montoya, D. (2016). Confort térmico en Viviendas de Medellín. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 18(35), 51-68. DOI: <https://doi.org/10.22395/RIUM.V18N35A4>

UNE-EN 16798-1 (2020). Energy performance of buildings - Ventilation for buildings - Part 1: Indoor environmental input parameters for design and assessment of energy performance of buildings addressing indoor air quality, thermal environment, lighting and acoustics - Module M1-6. Recuperada de: <https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0063261>

EVALUACIÓN TÉRMICA, LUMÍNICA Y TERMOGRÁFICA DE UNA SOLUCIÓN HABITACIONAL DE MADERA EN CLIMA TEMPLADO CÁLIDO PARA EL HÁBITAT POPULAR

Recibido 06/03/2023
Aceptado 11/06/2023

THERMAL, LIGHT, AND THERMOGRAPHIC EVALUATION OF A WOODEN HOUSING SOLUTION IN A WARM TEMPERATE CLIMATE FOR LOW-INCOME HOUSING.

AVALIAÇÃO TÉRMICA, LUMÍNICA E TERMOGRÁFICA DE UMA SOLUÇÃO HABITACIONAL DE MADEIRA EM CLIMA TEMPERADO QUENTE PARA O HABITAT POPULAR

Graciela Melisa Viegas

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC),
Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-6248-4678>
gracielviegas@iipac.laplata-conicet.gov.ar

Jesica B. Esparza

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC),
Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina
<https://orcid.org/0000-0002-0396-2104>
jessicaesparza@iipac.laplata-conicet.gov.ar

Gustavo Alberto San Juan

Instituto de Investigaciones y Políticas del Ambiente Construido (IIPAC),
Facultad de Arquitectura y Urbanismo (FAU)
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET)
Universidad Nacional de La Plata (UNLP), La Plata, Argentina
<https://orcid.org/0000-0001-8924-9918>
gustavosanjuan@iipac.laplata-conicet.gov.ar



RESUMEN

El acceso a la vivienda en los sectores sociales de bajos ingresos plantea la necesidad de una reflexión relevante para América Latina. En este contexto, se ha desarrollado una Solución Habitacional Modular (SHM) de madera en un barrio de la periferia de CABA llamado el Partido de La Plata, orientada a la mejora habitacional de sectores populares y gestionada por una cooperativa de trabajo, la universidad y el sector científico-técnico. Se tiene por objetivo evaluar el comportamiento térmico, lumínico y las condiciones de estanqueidad en la envolvente edilicia de una SHM de madera del sector Partido de la Plata en un clima templado-cálido. Para ello, en primer lugar, se realizó un monitoreo interior y exterior (temperatura, humedad relativa e iluminación natural), luego se evaluaron los calefactores solares de aire y finalmente se realizó termografía digital nocturna. Los resultados muestran desempeños favorables en el aspecto lumínico diurno y una buena respuesta térmica diurna en épocas frías. No obstante, también se encontraron fenómenos por mejorar, como la necesidad de acondicionamiento térmico nocturno, de mejora de la estanqueidad de la envolvente, de ventilación nocturna en épocas cálidas de refuerzo del sombreado y del aislamiento térmico.

Palabras clave

hábitat, madera, sistemas modulares, evaluación.

ABSTRACT

Access to housing in low-income sectors brings up the need for a relevant reflection on Latin America. In this context, a wood-based Modular Housing Solution (MHS) has been developed in a neighborhood on the outskirts of CABA called La Plata, oriented to a housing improvement for working-class sectors, and managed by a labor cooperative, the university, and the scientific-technical sector. The objective is to evaluate the thermal and light behavior and the airtightness conditions of the building envelope of a wooden MHS in the La Plata district in a warm-temperate climate. For this purpose, first, indoor and outdoor monitoring (temperature, relative humidity, and natural lighting) was carried out, then the solar air heaters were evaluated, and finally, digital thermography was performed at night. The results show favorable daytime lighting performance and good daytime thermal response in cold weather. However, there was also room for improvement, such as the need for thermal conditioning at night, improvement of the airtightness of the envelope, night ventilation in warm seasons, reinforcement of shading, and thermal insulation.

Keywords

habitat, wood, modular systems, evaluation.

RESUMO

O acesso à moradia nas camadas sociais de baixa renda levanta a necessidade de uma reflexão relevante para a América Latina. Nesse contexto, foi desenvolvida uma Solução Habitacional Modular (SHM) de madeira em um bairro da periferia da CABA (Cidade Autônoma de Buenos Aires) chamado Partido de La Plata, com foco na melhoria habitacional das camadas populares e gerenciada por uma cooperativa de trabalho, a universidade e o setor científico-tecnológico. O objetivo é avaliar o desempenho térmico, lumínico e as condições de estanqueidade do envelope construtivo de uma SHM de madeira na região do Partido de La Plata em um clima temperado-quente. Para isso, em primeiro lugar, foi realizado um monitoramento interno e externo (temperatura, umidade relativa e iluminação natural), em seguida, foram avaliados os aquecedores solares de ar e, por fim, foi realizada termografia digital noturna. Os resultados mostram desempenhos favoráveis na iluminação diurna e uma boa resposta térmica diurna durante períodos frios. No entanto, também foram encontrados aspectos a serem melhorados, como a necessidade de condicionamento térmico noturno, melhoria na estanqueidade do envelope, ventilação noturna em períodos quentes, reforço do sombreado e isolamento térmico.

Palavras-chave

habitat, madeira, sistemas modulares, avaliação.

INTRODUCCIÓN

El hábitat es un referente simbólico-imaginario de la existencia humana en el que intervienen dimensiones como la dimensión política, económico-social, estético-cultural, ética y medioambiental. En este marco, la vivienda adecuada plantea tanto la necesidad tanto de la seguridad sobre la tenencia de la tierra como la disponibilidad de servicios e infraestructura (agua potable, saneamiento, accesibilidad y cultura) y se la entiende como un proceso multidimensional que contempla el derecho a un “vivir” digno y saludable, al disfrute de la ciudad y los espacios públicos, bajo el principio de justicia social.

Paralelamente, el Hábitat Popular se desarrolla como respuesta a las desigualdades entre los más vulnerables y los que más tienen (Miranda-Gassull, 2017) de forma progresiva y espontánea, sin colaboración de técnicos ni profesionales, con escasos recursos económicos y con grandes esfuerzos, bajo lo que se conoce como Producción Social del Hábitat -en adelante, PSH- (Migueltorena, 2020; San Juan et al., 2023). La PSH genera espacios habitables, componentes urbanos y rurales, bajo el control de auto-productores y otros agentes sociales que operan sin fines lucrativos (Enet et al., 2008; Pirez, 2016; Romero-Fernández, 2002, citado en Miranda-Gassull, 2017). Asimismo, responde a una cultura de la solidaridad y de la complementariedad con otros actores sociales, con implicancias políticas, económicas y sociales de transformación de las relaciones de poder. Se entiende que la PSH se asocia a la Tecnología para la Inclusión Social (TIS) en relación con la resolución tecnológica de la vivienda. En relación con esto, Thomas & Becerra (2014) las definen como formas de diseñar, desarrollar, implementar y gestionar tecnologías orientadas a resolver problemas sociales y ambientales, generando dinámicas sociales y económicas de inclusión social y de desarrollo sustentable, cuyos principales actores son las organizaciones sociales.

De esta manera, se entiende que, desde la perspectiva de PSH y las TIS, la búsqueda de soluciones efectivas y sostenibles que colaboren en la mejora del hábitat popular y el diseño de viviendas adecuadas deben superar el asistencialismo estatal y producir propuestas que fortalezcan las capacidades de los pobladores para superar sus problemas en base a sus propias pautas culturales y políticas (Pelli, 2007).

En este contexto, nace una Solución Habitacional Modular -en adelante, SHM- la cual resulta de la interacción social para definir respuestas en la construcción de políticas públicas/sociales destinadas a sectores en situación de vulnerabilidad. Dentro de este marco, propone el diseño de una unidad habitacional a partir del establecimiento de lógicas proyectuales para situaciones de emergencia habitacional, las cuales incorporan saberes, mejoran la calidad de vida,

capacitan, fomentan la auto-organización y la co-gestión del hábitat, fomentan la producción y el trabajo y generan espacios de integración e intercambio.

En cuanto a los materiales, resuelve su estructura y cerramiento en madera. Por ello, se considera que la SMH se ha transformado en una opción accesible, confiable y sustentable frente a los materiales de construcción tradicionales, ya que proporciona una calidad térmica mejor a la construcción tradicional de mampostería.

Si bien existe un elevado consenso respecto de las potencialidades de la construcción en madera debido a su eficiencia energética y su bajo impacto ambiental, se observan escasos trabajos acerca de su comportamiento térmico, energético y de confort ambiental. Se considera que, frente a las actuales condiciones ambientales, climáticas y de crisis energética, conocer el comportamiento térmico de las construcciones en madera podría fomentar su utilización.

A nivel internacional, Viholainen et al. (2021) destacan que la construcción en madera puede reducir el carbono embebido en la construcción y centra su análisis en la percepción de los ciudadanos europeos acerca de su uso para mejorar su aceptación social. Por otro lado, las evaluaciones de rehabilitación energética no contemplan el uso de la madera frente a posibles mejoras (Pérez Fargallo et al., 2016), evadiendo al importante parque edilicio que combina la madera y fábrica (Iglesias Gutiérrez del Álamo & Lasheras Merino, 2020; De Araújo, et al., 2019). Sin embargo, se observan esfuerzos por fomentar el uso de la madera, como en Muñiz, et al. (2022), quien desarrolla un sistema simplificado y flexible íntegramente en madera que complejiza el trabajo en taller para reducir tiempos y procesos en obra. En el ámbito latinoamericano, diversas investigaciones han demostrado los beneficios de este tipo de construcción (Filio Reynoso et al., 2017; Silva et al., 2023). Garay Moena et al. (2022), por ejemplo, destaca las ventajas de la madera como su baja huella de carbono, la capacidad de industrialización, la adopción de estándares nacionales e internacionales, la eficiencia sísmica, térmica y acústica. Sin embargo, se requiere fomentar su utilización como material constructivo. Del mismo modo, destaca que en Chile aún persisten percepciones negativas en cuanto a la combustibilidad del material, la fragilidad y su relación con la construcción precaria, a la vez que la población considera que no proporciona durabilidad ni seguridad (Salazar, 2008). Si bien existen experiencias de su utilización en la construcción de viviendas populares aún vigentes (Jiménez, 2020), en dicho país sólo el 14% de la construcción se realiza en madera (en contraste, en países nórdicos este índice es mayor al 90%), a pesar de que la producción forestal al 2008 fue la primera de Latinoamérica con 2.110.000 ha.

Otro ejemplo es Uruguay, que cuenta con 1.000.000 ha de especies arbóreas de rápido crecimiento. Sin embargo, el recurso se encuentra desaprovechado por la escasa

inversión en esta industria (Dieste et al., 2019). En este sentido, se analiza la potencialidad de agregar valor a la producción forestal del país y se destaca la importancia de fomentar esta industria renovable para reducir los impactos ambientales de la construcción. Sus mayores impactos se dan en la fase de uso, mantenimiento, reparación y sustitución (en cuanto al uso de pinturas, barnices y demás elementos, piezas nuevas, etc.), mientras que el acondicionamiento energético por el uso de la construcción es significativamente menor. Pese a que no se han registrado estudios sobre los impactos en la habitabilidad de viviendas de madera, actualmente se trabaja en metodologías que valoran sus potencialidades desde la mirada del ciclo de vida (Soust-Verdaguer, 2022).

En el caso de Argentina, la construcción en madera se considera una alternativa importante para traccionar la industria forestal. De acuerdo con Vogel (2020), al año 2019 el país contaba con 1.300.000 ha de bosques cultivados, con especies aptas para desarrollar componentes estructurales. Según dicho autor, existe un número de empresas que construyen aproximadamente 3500 viviendas en madera al año, las que representan el 3% del total de viviendas construidas anualmente con permiso de construcción. De estas, más del 70% utilizan el sistema de entramado estructural (sistema plataforma o sistema continuo).

En relación con lo anterior, es importante mencionar la existencia, en la ciudad de La Plata, del Centro de Capacitación, Transferencia de Tecnología, Producción y Servicios en Madera (CTM- FCAyF- UNLP), cuyo objetivo es impulsar el desarrollo sustentable y la competitividad del sector foresto-industrial de la región, junto con producir bienes y servicios especializados. En esta última línea, se encuentra el desarrollo aquí expuesto, donde la UNLP es central en la gestión de esta vivienda.

La propuesta que se desarrolla para la presentación de este trabajo se localiza en la periferia urbana del Partido de La Plata, capital de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Esta localidad cuenta con 772.618 habitantes y se registran 260 barrios populares con más de 50.000 familias, donde la mayoría de las viviendas presenta condiciones de irregularidad, precariedad, escasa o nula accesibilidad a los servicios de infraestructura, pavimento o iluminación (UCALP, 2021). De esta manera, el crecimiento de las desigualdades socio-económicas se visualiza en la reproducción de un territorio desigual, fragmentado y en disputa (Dammer Guardia et al., 2019), situación que se ha profundizado con la pandemia por COVID-19.

En este contexto, se presentan los avances de dos proyectos de investigación (San Juan, 2018-2021; Viegas, 2021-2024) y en particular, este artículo tiene por objetivo evaluar el

comportamiento térmico, lumínico y las condiciones de temperatura y estanqueidad de la envolvente edilicia de una SHM construida en madera y desarrollada en el Partido de la Plata, caracterizado por un clima templado-cálido-húmedo. Se espera establecer el comportamiento de base, destacar sus aspectos sustentables y formular posibles mejoras para su replicabilidad en contextos que lo necesiten.

METODOLOGÍA

El Partido de La Plata, Buenos Aires (- 34° 56' 00"; - 57° 57' 00") se ubica en una planicie alta (23msnm.) al borde del río de La Plata. Su clima templado cálido con amplitudes térmicas menores a 14°C (zona bioambiental argentina III-b) incorpora dos estaciones marcadas, invierno y verano, con prevalencia del primero. La temperatura media anual es de 15,8°C y la precipitación de 1007 mm/año. En invierno, la temperatura media anual es 9,7°C; HR: 82%; GDcalefacción₂₀: 1668°C. Por su parte, la temperatura media anual de verano es 21,7 °C; HR: 70% (IRAM, 2012).

La SH fue construida buscando dar respuesta a criterios de flexibilidad tipológica, funcional, constructiva y productiva y propone un módulo base de 30 m² lineal con estar-comedor, cocina y baño, el cual es ampliable a 1 o 2 dormitorios (Figura 1). Puede armarse individual o apareada en un terreno. Se orienta perpendicular al norte donde tiene una galería semi-cubierta. Sus componentes principales (anillos de madera y paneles modulados de 1,22 m x 2,44m) se materializan en forma sistematizada en un taller (CTM-UNLP), lo que permite producir en gran cantidad, del mismo modo que se reducen los desechos, economizan materiales, dan flexibilidad en cuanto a cerramientos y al uso de materiales reciclados, y mejoran las condiciones laborales de los constructores (Figura 1). Respecto del aislamiento térmico, posee 0,02 m de EPS en paredes, 0,04 m de EPS en techo y 0,04 m de EPS en pisos de (densidad 20 kg/m³). Finalmente, la superficie total de ventanas (baño, sur, comedor) y puertas (puerta ventana y de acceso) de madera con vidrio simple es de 8,62 m².

Respecto de su sistema de climatización, posee dos calefactores solares de aire resueltos con una caja de madera (1,22 m x 2,00 m x 0,10 m) que tiene orificios laterales, chapa acanalada galvanizada negro mate como superficie absorbadora (de 0,5 mm de espesor), separada 0,03 m de la caja en su parte posterior, y vidrio simple como cubierta transparente. Se conectan al interior con un conducto superior e inferior de PVC de 110 mm de diámetro con tapa. En la Tabla 1 se muestran los indicadores¹ de la solución habitacional.

1 G admisible para edificios de viviendas de 80 m³ y GDinvierno entre 1500 y 2000: 2,15 (IRAM, 2000). Kadmisibles Nivel B (recomendado). Invierno (Temp. exterior de diseño mayor o igual a 0°C). Muros 1 W/m² °C; techos 0,83 W/m² °C. Verano (zona bioambiental IIIb). Muros 1,25 W/m² °C; techos 0,48 W/m² °C (IRAM, 1996).

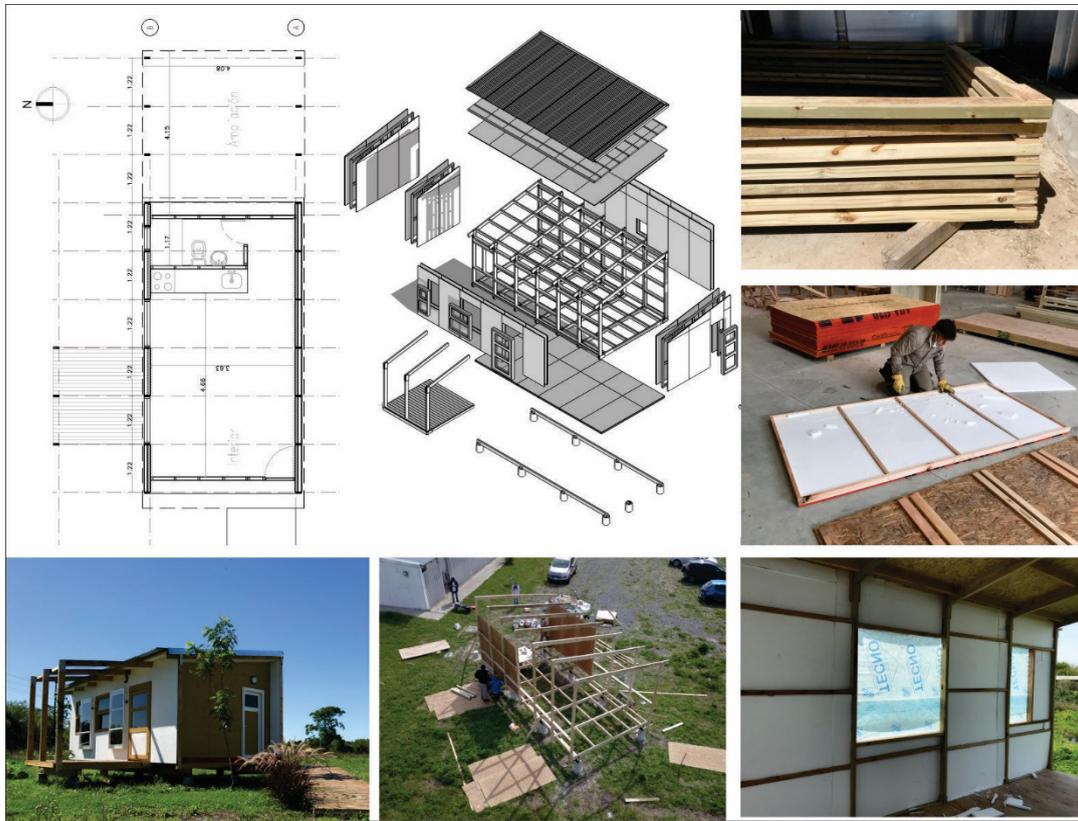


Figura 1: Documentación gráfica de la solución habitacional, despiece, imágenes del proceso, resultado final. Fuente: Elaboración de los autores

Tabla 1: Indicadores dimensionales, morfológicos y energéticos. Referencias: Ic - Índice de compacidad; FF - Factor de forma; K - transmitancia térmica; G - Coeficiente global de pérdidas. Fuente: Elaboración de los autores.

	21,0	25	80,8	8,62	6,73	0,25	1,64	106,3	1,18	1,5	0,8	0,4	0,7	2
Perímetro interior (m)														
Área útil (m ²)														
Volumen interior (m ³)														
Superficie total de ventanas y puertas (m ²)														
Superficies de ventanas y puertas Norte (m ²)														
Superficie de ventana sur (m ²)														
Superficie de puerta oeste (m ²)														
Envolvente interior (m ²)														
Ic (%)														
FF														
K pared (W/m ² °C)														
K techo (W/m ² °C)														
K piso (W/m ² °C)														
G (W/°C m ²)														

En cuanto a la recolección de datos, el proceso involucra lo siguiente:

- I. Mediciones a SH sin ocupación por personas, que incluyen: temperatura (°C), humedad relativa (%), e iluminancia (Lux) entre agosto y noviembre del 2021. Esta se realizó en unidades discretas de tiempo de 15 minutos utilizando micro-adquisidores de datos HOBO UX100-003, suspendidos a 1,2m de altura, dos colocados en el estar/dormir y dos apoyados en los conductos de los calefactores solares de aire (uno a la entrada del aire frío y otro a la salida del aire caliente) y un sensor en el exterior colocado suspendido debajo del piso a la sombra (Figura 2);
- II. Medición de iluminancia punto a punto en una hora y día específico mediante un luxómetro digital 20.000 Lutron LUX LT-YK10LX;
- III. Recopilación de datos climáticos horarios de la estación meteorológica Observatorio Astronómico de La Plata (OALP);
- IV. Mediciones de temperatura en °C (similares condiciones que el paso i) para evaluar las potencialidades/ dificultades de la ventilación cruzada y selectiva en un período extremadamente cálido (el que fue representativo de los días más cálidos del verano en la región) en diciembre de 2022;
- V. Evaluación de las temperaturas y estanqueidad de



Figura 2: Colocación de adquirentes de datos y toma de imágenes termográficas. Fuente: elaboración de los autores

la envolvente y sus encuentros (Figura 2) mediante termografía digital nocturna (21hs), utilizando una cámara termográfica Testo 865 (lente estándar FOV 31° x 23° – IFOV 3,4 mrad. Pantalla TFT de 3.5" – 320 x 240 píxeles) al iniciar el período frío del año 2022, e incorporando energía auxiliar en el interior mediante un radiador eléctrico de 2000 Wh.

La metodología de simulación lumínica involucra simulaciones de iluminancia natural mediante el software *Velux Daylight Visualizer* para dos días soleados con baja y con alta iluminancia respectivamente (agosto y noviembre²).

RESULTADOS

ILUMINACIÓN NATURAL INTERIOR

Se analizaron las mediciones puntuales en un día de agosto donde se registraron máximos de 800 lux (coincidentes con el ingreso de rayos solares) y en noviembre de 500 lux, cuando el ingreso del sol se reduce debido al diseño y orientación (Figura 3). Considerando el punto medido como promedio, se observa que para un día tipo soleado de agosto (representativo del 35% de los días de este mes)³, entre las 9 y las 18hs no se requiere iluminación auxiliar de acuerdo con lo señalado por IRAM (1969)⁴.

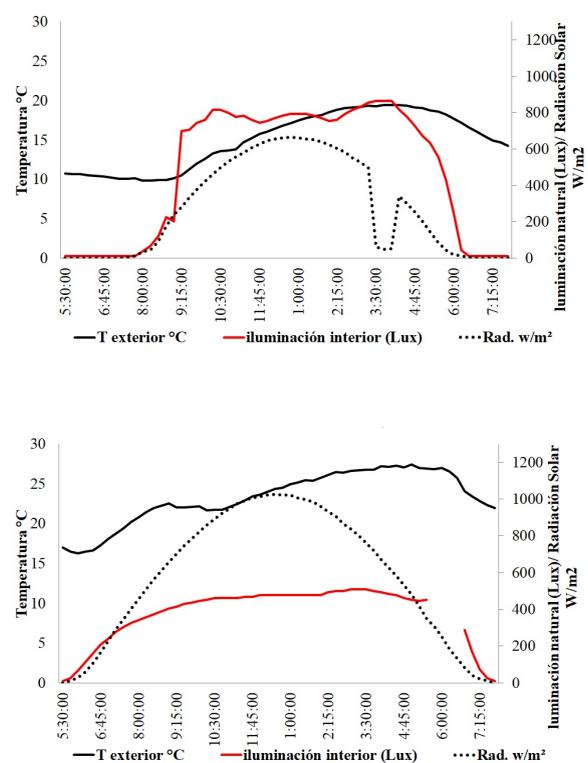


Figura 3: Medición puntual (localizada en la estrella roja de la planta de la Figura 3) de la iluminación natural en el ambiente principal en Agosto (superior) y noviembre (inferior). Fuente: elaboración de los autores

2 Los meses de medición se validaron en función de los días tipo de diseño para la región de La Plata. El día de medición de agosto presenta valores promedio (mediodía solar) de radiación solar global de 670 W/m² e iluminancia global de 77.000 Lux (condición más desfavorable en junio con 560 W/m² y 55.440 Lux). El día de medición de noviembre presenta valores promedio (mediodía solar) de radiación solar global de 1070 W/m² y una iluminancia de 107.000 Lux (condición más desfavorable diciembre con 1100 W/m² y 110.000 Lux).

3 En días con cielo cubierto (35% del total de días del mes presentan heliofania relativa entre 20% y 70%), la iluminancia global horizontal se reduce a 40.000 lux.

4 En comedor/estar el nivel de iluminancia general es 50 lux y el específico hasta 150 lux.

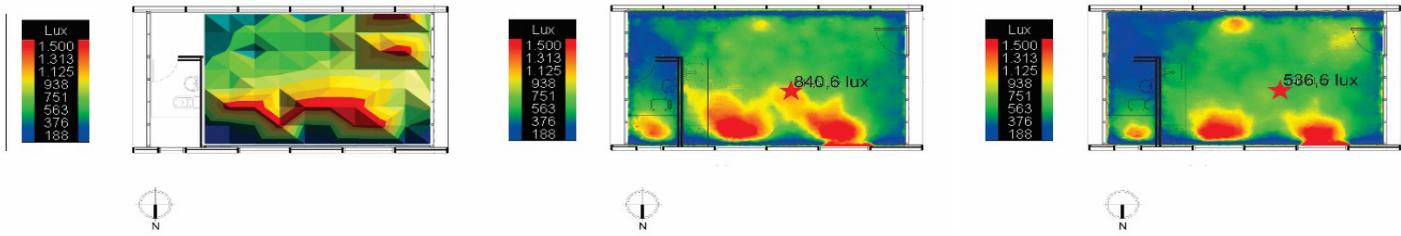


Figura 4: Mediciones punto a punto para el 24 de agosto a las 15 hs (izquierda), simulación de iluminación natural en un día soleado a las 15hs de agosto (centro) y noviembre (derecha). Fuente: elaboración de los autores

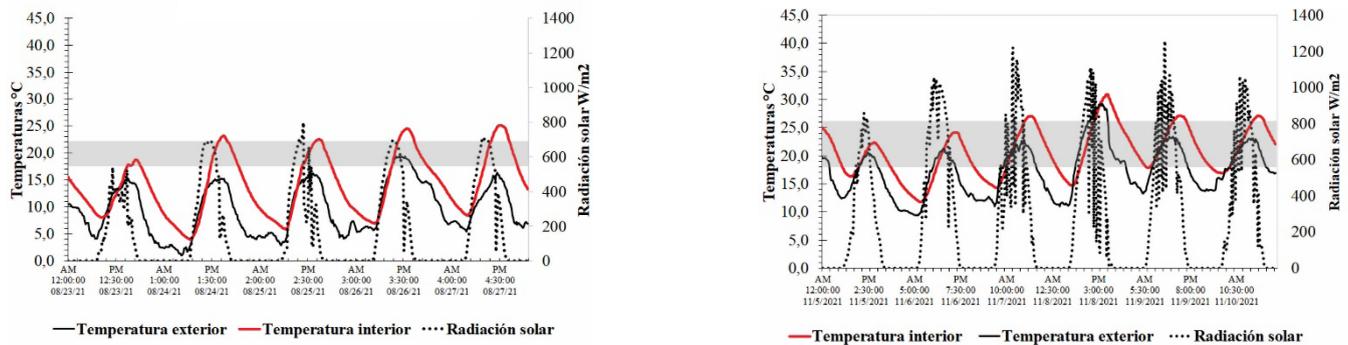


Figura 5: Comportamiento térmico en agosto (izquierda) y noviembre (derecha). Fuente: elaboración de los autores

Posteriormente, se compararon las mediciones punto a punto en el ambiente principal (Figura 3) con simulaciones para dos días soleados con baja y alta iluminancia global horizontal, respectivamente, para comprobar la distribución de la iluminancia E (Lux) en un determinado punto y hora de medición (Figura 4).

Las mediciones *in situ* punto a punto en el mes de agosto muestran una mayor uniformidad en el espacio (con valores mínimos de 500 lux). Junto con esto, destacan el aporte lumínico de la ventana localizada en la puerta de acceso y muestran el ajuste de las simulaciones. A partir del ajuste, las simulaciones lumínicas registraron valores promedio entre 500 y 700 lux, tanto en agosto como en noviembre.

En la ubicación cercana a la ventana se observan registros de 1500 lux en ambos meses. De acuerdo con lo simulado, el 81% de la superficie presenta más de 300 lux en agosto, el 86% de la superficie presenta más de 300 lux en noviembre y de acuerdo con lo medido, el 97% presenta más de 300 lux en la superficie.

COMPORTAMIENTO TÉRMICO

En la figura 5 se puede observar el comportamiento térmico de la SHM durante 5 días en agosto y noviembre, además del nivel de confort térmico entre 18 y 22 °C en

invierno y extendido a 26 °C en verano (Givoni, 1969).

En los gráficos se puede observar que en el período fresco, la SH se mantiene en 4°C sobre la temperatura mínima exterior y 7°C sobre la máxima exterior, lo último debido al efecto del ingreso de radiación solar. Esta condición se verifica durante los días con heliofanía relativa superior al 70 % (24/08 al mediodía 22,3 °C en el interior, 15 °C en el exterior). También se logra verificar el funcionamiento de la ganancia solar directa, así como el aporte de calor proporcionado por los calefactores solares de aire. De acuerdo con el período dentro de confort térmico, se observa que la oscilación día-noche es ocasionada por la falta de inercia térmica de la SH, por lo cual se requeriría aporte de energía auxiliar entre las 11.45 PM y las 10 AM.

En cuanto al período cálido se observa en el gráfico correspondiente que el comportamiento de la vivienda se ve perjudicado por la ausencia de vegetación en la pérgola y de ventilación cruzada. En este sentido, se visualiza que ante temperaturas exteriores máximas de 30°C, la SH eleva sus temperaturas máximas dos grados más que la exterior. Se planteó entonces evaluar las condiciones internas recreando acciones que se asimilen a la protección vegetal de la pérgola, la ventilación cruzada nocturna y el bloqueo del calefactor solar, en un período representativo de días muy cálidos de 2022.

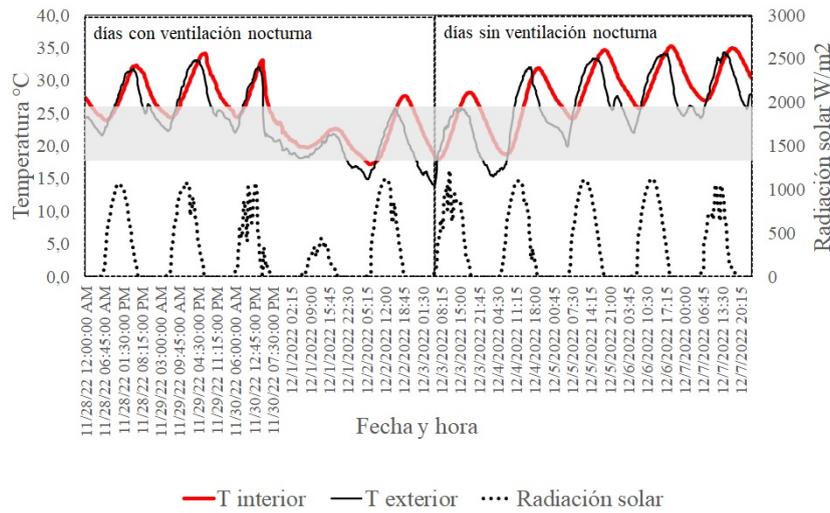


Figura 6: Comportamiento en días cálidos con y sin ventilación nocturna (en gris se indica el nivel de confort de verano 18°C a 26°C). Fuente: elaboración de los autores

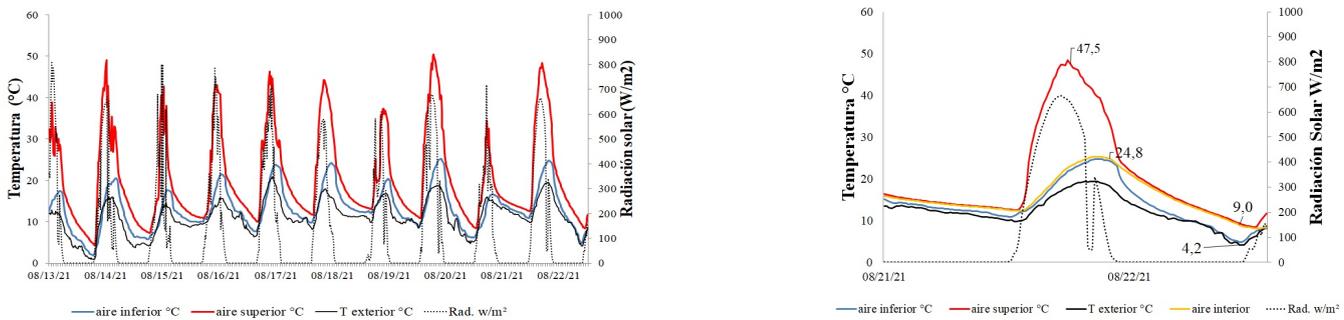


Figura 7: Respuesta térmica del calefactor solar de aire en el período fresco. Fuente: elaboración de los autores

COMPORTAMIENTO TÉRMICO EN DÍAS CÁLIDOS APLICANDO VENTILACIÓN NOCTURNA

Para este análisis se realizó ventilación cruzada (ventana norte y sur) mediante la apertura de las ventanas sur y norte (cruzadas) después de las 17hs, y cerrándolas a las 8.30 hs para evitar el ingreso de calor diurno.

En la imagen se muestra que, en días muy cálidos, asimilables a las condiciones de verano (temperatura máxima promedio de 35,2 °C en ola de calor de febrero de 2023, según SMN⁵), si bien las temperaturas interiores son elevadas (Figura 6) y se ubican por sobre el nivel de confort durante el día, la SH permite disipar la temperatura gracias a su buena ventilación nocturna al abrir la ventana inferior sur (0,4 m x 0,4 m) y la norte (1,2 m x 1,2 m). Por las noches, las temperaturas bajan y se ubican en el nivel

de confort. Se considera que los niveles son aceptables y podrían mejorarse a partir del sombreado de la envolvente con vegetación circundante, de la mejora en la inercia térmica, posible de ser incorporada en los pisos de la SH, y refuerzo del aislamiento térmico.

CALEFACTORES SOLARES DE AIRE PARA ACONDICIONAMIENTO AMBIENTAL

Los calefactores solares de aire para acondicionar el ambiente interior principal se evaluaron en invierno como aporte de calor (Figura 7).

Al evaluar 10 días corridos con buena heliofanía, el calefactor registra temperaturas máximas entre 40 y 50 °C. En un día con buena heliofanía (700 W/m² de radiación solar máxima), el calefactor alcanza 47,5 °C en la salida

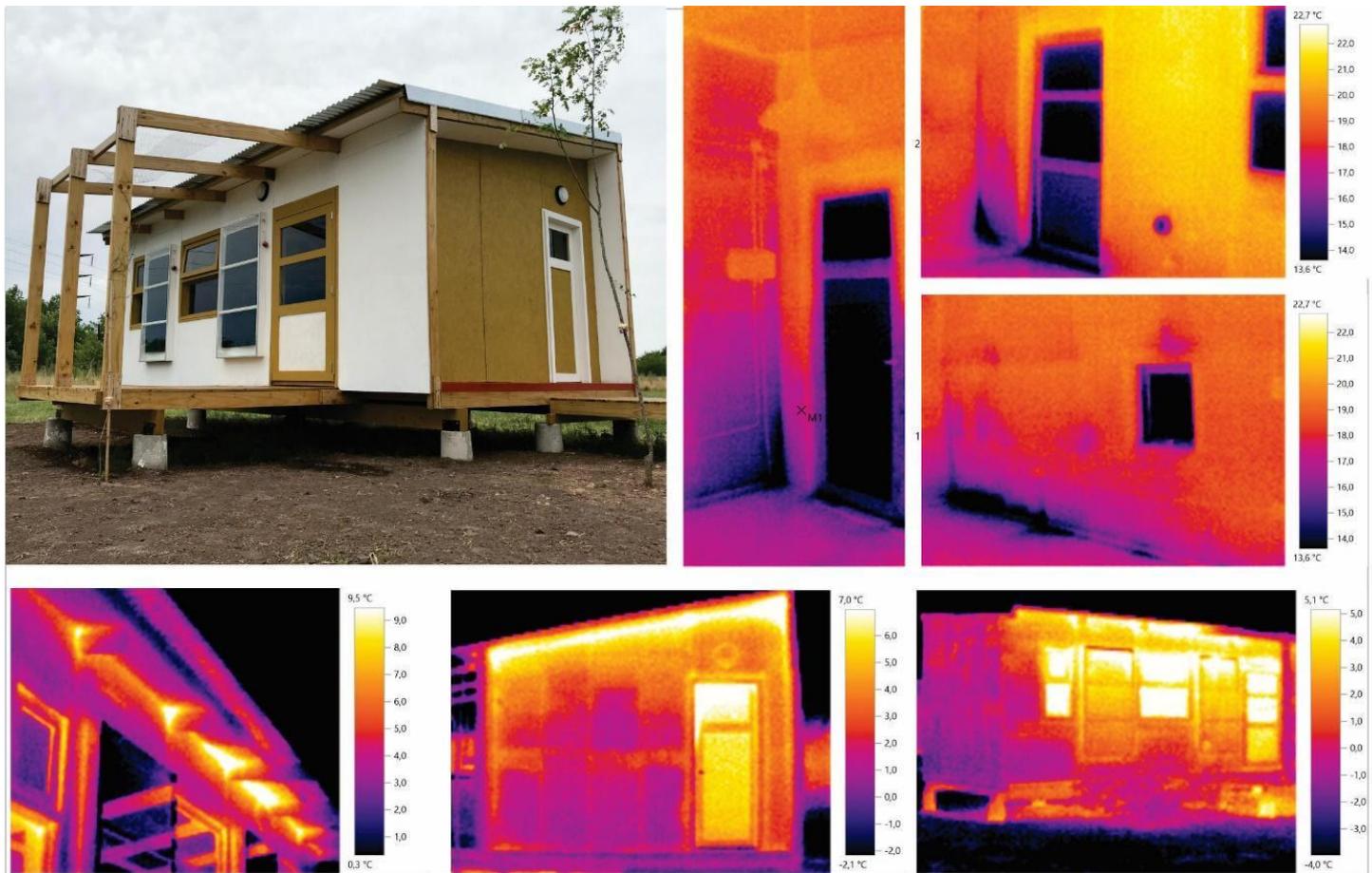


Figura 8: Imágenes termográficas tomadas el día 27/05/2022 entre las 20 y las 22h. Fuente: elaboración de los autores

del aire caliente, mientras que en el interior de la SH las máximas son de 24,8 °C, es decir, casi 5°C por sobre la temperatura máxima. Por su parte, al caer el sol, las temperaturas del sistema solar descienden debido a que no tiene masa térmica. De esta manera, las temperaturas interiores se mantienen casi 5°C por encima (9°C) de la temperatura exterior (4,2°C). En síntesis, el sistema solar tiene buena respuesta térmica y aporta al acondicionamiento interior. Sin embargo, la mejora en la inercia térmica realizada a través de la incorporación de masa en pisos o uso de sistemas solares pesados tipo Muro Acumulador de Calor (MAAC), podría reducir la caída de temperatura nocturna.

EVALUACIÓN DE LA TEMPERATURA Y ESTANQUEIDAD DE LA ENVOLVENTE EDILICIA

En la figura 8 se sintetiza la evaluación de las temperaturas y la estanqueidad de la envolvente térmica, cuyo salto térmico entre interior y exterior fue de 10°C. Del mismo modo, se puede observar que las temperaturas de las paredes en el interior son las esperadas (entre 17 y 22°C), en

contraposición a las bajas temperaturas de las paredes exteriores (menores a 6°C). Con estas cifras, se verifica que la envolvente de madera y su aislamiento térmico interior no producen pérdidas térmicas sustanciales. Como es de esperarse, las puertas de madera simple y las ventanas de vidrio simple son las causantes de las mayores pérdidas, las cuales corresponden a condiciones de diseño de una solución habitacional económica. En este sentido, el uso de postigos de madera y el refuerzo de las puertas podría reducir la pérdida de calor mencionada. Por otra parte, el estudio permite verificar que la estructura de costillas de madera con aislamiento interior no produce puentes térmicos considerables. Sin embargo, se detectan puntos críticos (uniones de paredes y piso), donde se observa fuga de calor con valores menores a 14°C. Asimismo, cabe destacar que no se detectaron pérdidas de calor por la unión de paredes con el techo.

Con respecto al exterior, se observan puntos críticos, por un lado, en la unión del techo con las paredes y, por otro, en la extensión de los tirantes de madera desde el interior al exterior. Estos sectores requerirían del sellado con elementos adecuados para evitar pérdidas térmicas.

Finalmente, si relacionamos este análisis con el comportamiento de la SH en días muy cálidos, el efecto de las infiltraciones produciría ingreso de calor en verano, con lo cual será fundamental mejorar la estanqueidad del ambiente, reforzar el aislamiento térmico y proporcionar la protección vegetal de la SH para mejorar las condiciones de confort interior.

CONCLUSIONES

El acceso a la vivienda en los sectores de mayor vulnerabilidad se produce de manera autogestionada, por lo cual los procesos de autoproducción y autoconstrucción de la vivienda se transforman en la única forma de acceso al suelo en las dinámicas del hábitat popular. En este contexto, se desarrolló una solución habitacional modular (SHM) materializada en madera, diseñada, construida y gestionada por todos los actores sociales involucrados, con el fin de buscar la generación de desarrollos tecnológicos para la inclusión social, que fomenten la autodeterminación, autogestión e independencia de los grupos sociales involucrados, coincidiendo con lo expuesto por Pelli (2007), Thomas & Becerra (2014), Enet et al. (2008) y Pirez (2016). Al igual que en Muñiz et al. (2022), se fomenta el trabajo en taller para reducir el trabajo de obra y mejorar las condiciones laborales de los grupos cooperativos.

El análisis del comportamiento térmico, lumínico y de estanqueidad de la SH permite sustentar los beneficios de este tipo de construcciones poco analizados en la bibliografía internacional (Pérez Fargallo et al., 2016; Iglesias Gutiérrez del Álamo & Lasheras Merino, 2020; De Araújo et al., 2019) y fomentar la construcción en madera (Muñiz et al., 2022; Filio Reynoso et al., 2017; Silva et al., 2023; Garay Moena et al., 2022), la cual, en línea con lo propuesto por Dieste et al. (2019), también agregaría valor al recurso forestal local a través de un centro de producción local.

Con respecto al análisis de la iluminancia en agosto (en días soleados), considerando como un valor promedio el registrado en el centro del espacio, se podría concluir que, entre las 9 AM y las 6 PM, no se requeriría iluminación auxiliar de acuerdo a IRAM (1969).

En cuanto al análisis térmico, se concluye que este presenta una buena respuesta en los meses frescos, ya que se logra acondicionar durante el día con energía solar. Sin embargo, la ausencia de masa térmica hace necesaria la incorporación de energía auxiliar en el período nocturno. Los calefactores solares de aire presentaron un buen aporte para el acondicionamiento diurno. Por otro lado, la envolvente edilicia registra algunos puntos críticos

que requieren mejorar su estanqueidad, pero en general retiene el calor en el interior mientras que las caras externas de los muros se encuentran fríos (sin pérdida de calor).

Finalmente, en lo que refiere a la condición de verano, se concluye que es fundamental accionar mecanismos de refrescamiento nocturno para bajar la carga térmica diurna, junto con la necesidad de mejorar el sombreado de la envolvente exterior, mejorar la estanqueidad y el aislamiento térmico, dado que el nivel en las condiciones climáticas evaluadas no es suficiente ante el exceso de temperatura, como sí lo logra en el invierno.

Para concluir, se hace imprescindible que en futuras investigaciones se realicen simulaciones térmicas para evaluar las mejoras necesarias en condición de verano y bajo escenarios de cambio climático, del mismo modo que puedan evaluarla respuesta térmica de nuevas soluciones habitacionales modulares que incorporen masa térmica en la superficie del piso en épocas cálidas.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas y a la Agencia de Promoción Científica y Técnica, al Consejo Social de la Universidad Nacional de La Plata, a la Cooperativa de trabajo Barrios Productores LTDA, al Centro Tecnológico de la Madera de la UNLP y al Departamento de Sismología e Información Meteorológica de la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata (FCAG- UNLP) quien proporcionó datos meteorológicos.

REFERENCIAS

- Dammer Guardia, M., Delgadillo, V. & Erazo, J. (2019). La ciudad, espacio de reproducción de las desigualdades. *Andamios*, 16(39), 7-13. DOI: <https://doi.org/10.29092/uacm.v16i39.672>
- De Araújo V. A., Gutiérrez-Aguilar, C. M., Cortez-Barbosa, J., Gava, M. & García J. N. (2019). Disponibilidad de las técnicas constructivas de habitación en madera, en Brasil. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 21(1), 68-75. DOI: <https://doi.org/10.14718/revarq.2019.21.1.2014>
- Dieste, A., Cabrera, M. N., Clavijo, L., & Cassella, N. (2019). Analysis of wood products from an added value perspective: The Uruguayan forestry case. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 21(3), 305-316. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-221X2019005000303>

Enet, M., Romero-Fernández, G. & Olivera-Gómez, R. (2008). Herramientas para pensar y crear en colectivo, en programas intersectoriales de hábitat Ed. CYTED-HABYTED-RED XIV.

Filio Reynoso, O., Borja De La Rosa, A., Fuentes Salinas, M. & Corona Ambriz, A. (2017). Wood frame house construction project in Mexico. *Journal of Construction*, 16(2), 307-322. DOI: <https://dx.doi.org/10.7764/rdlc.16.2.307>

Givoni, B. A. (1969). *Man, Climate and Architecture*. Elsevier Architectural Science Series.

Garay Moena, R., Castillo Soto, M., Fritz Fuentes., C., & Hernández Ortega, C. (2022). Desarrollo de un indicador integrado de sustentabilidad y seguridad estructural para el mercado de viviendas de madera aplicado a Chile central. *Revista Hábitat Sustentable*, 12(1), 8-23. DOI: <https://dx.doi.org/10.22320/07190700.2022.12.01.01>

Iglesias Gutiérrez Del Álamo, M. & Lasheras Merino, F. (2020). Vigencia de las estrategias constructivas originales para la conservación de los entramados estructurales de madera, a través del ejemplo de un edificio madrileño del S. XIX. *Informes de la Construcción*, 72(560), e363. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.73119>

IRAM (1969) Norma IRAM – AADL J20-02 Iluminación natural en edificios. Condiciones Generales y requisitos especiales.

IRAM (1996). Norma IRAM 11605 Acondicionamiento térmico de edificios. Condiciones de habitabilidad en edificios. Valores máximos admisibles de transmitancia térmica en cerramientos opacos.

IRAM (2000). Norma IRAM 11604 Aislamiento térmico de edificios. Verificación de sus condiciones higrotérmicas. Ahorro de energía en calefacción. Coeficiente volumétrico G de pérdidas de calor. Cálculo y valores límites

IRAM. (2012). Norma IRAM 11603 Acondicionamiento térmico de edificios. Clasificación bioambiental de la República Argentina. Buenos Aires, Argentina

Jiménez, R. (2020). Análisis de la vigencia del sistema constructivo LAD-MA para la autoconstrucción asistida de viviendas progresivas. *Informes De La Construcción*, 72(560), e367. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.73728>

Migueltoarena, A. (2020) Espacios residenciales generados desde la producción social del hábitat y su vinculación con el Estado en la ciudad de Tandil. *Población & Sociedad*, 27(1), 1-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.19137/pys-2020-270101>

Miranda-Gassull, V. (2017). El hábitat popular. Algunos aportes teóricos de la realidad habitacional de sectores desposeídos. *Territorios* (36), 217-238. DOI: <https://doi.org/10.12804/revistas.urosario.edu.co/territorios/a.4440>

Muñiz, S., Mosquera, E. & Corral, A. (2022). Construcción de una vivienda de madera con el sistema UBUILD. *Informes de la Construcción*, 74(565), e428. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.87025>

Pelli, V. S. (2007). *Habitar, participar, pertenecer. Acceder a la vivienda - incluirse en la sociedad*. Editorial NOBUKO.

Pérez Fargallo, A., Calama Rodríguez, J. M., Flores Alés, V. (2016). Comparativa de resultados de rehabilitación energética para viviendas en función del grado de mejora. *Informes de la Construcción*, 68(541), e134. DOI: <http://dx.doi.org/10.3989/ic.15.048>

Pirez, P. (2016). Las heterogéneas formas de producción y consumo de la urbanización latinoamericana. *Revista Quid*, 16(6), 131-167. Recuperado de: <https://publicaciones.sociales.uba.ar/index.php/quid16/article/view/2085>

Romero-Fernández, G. (2002). La producción social del hábitat: Reflexiones sobre su historia, concepciones y propuestas. En Ortiz Flores, E. & Zarate, L. (Comps.), *Vivitos y coleando. 40 años trabajando por el hábitat popular de América Latina*, 70-79. México: UAM.

San Juan, G. (2018-2021). Proyecto de Investigación Plurianual CONICET: Problemáticas ambientales del hábitat popular en la periferia del Gran La Plata. Políticas Públicas / Sociales, como respuesta, en el marco de la Producción Social del Hábitat (PSH) y la Tecnología para la Inclusión Social (TIS).

San Juan, G. A., Viegas, G. M., Reynoso, L. E. & Esparza, J. B. (2023). Hábitat popular. Modelo sistémico para abordar una propuesta de solución habitacional y su inserción urbana. *Revista de Arquitectura (Bogotá)*, 25(1), 25–39. DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2023.25.4132>

Salazar, M. V. (2008). Proyectos que buscan hacer de la vivienda de madera, una vivienda de calidad: Chile apuesta por la construcción en madera. *Revista de la Construcción*, 7(1), 114-116. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=127612580012>

Silva, M. F. F., Silva, J. V. F., Favarim, H. R. & Campos, C. I. de (2023). Physical-mechanical properties and heat transfer analysis of osb produced with phenol-formaldehyde and zno nanoparticles addition. *Maderas. Ciencia y tecnología*, 25(3), 1–6. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0718-221x2023000100403>

Soust-Verdaguer, B., Moya, L., & Llatas, C. (2022). Evaluación de impactos ambientales de viviendas en madera: El caso de "La casa Uruguaya". *Maderas. Ciencia y tecnología*, 24, 1-12. DOI: <https://dx.doi.org/10.4067/s0718-221x2022000100410>

Thomas, H. E., & Becerra, L. D. (2014). Sistemas tecnológicos para el desarrollo inclusivo sustentable. *Voces en el Fénix 37 Sistemas tecnológicos para el desarrollo inclusivo sustentable*, 120-129. Recuperado de: https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/36222/CONICET_Digital_Nro.653fb65f-597d-4c01-8d7d-09a4adc88d6b_c.pdf?sequence=5&isAllowed=y

UCALP. (2021). *Observatorio Socioeconómico de la Universidad Católica de La Plata*. Recuperado de: <https://www.ucalp.edu.ar/la-universidad/observatorio-socioeconomico/>

Viegas, G. (2021-2024) Proyecto de Investigación Científica y Tecnológica: Plan de mejoramiento integral de viviendas en sectores poblacionales en riesgo socio-territorial localizados en asentamientos informales del Partido de La Plata. Estrategias orientadas a la envolvente edilicia, el saneamiento y el acceso a la energía.

Viholainen, N., Franzini, F., Lähtinen, K., Nyruud, A. Q., Widmark, C., Fredrik Hoen, H. & Toppinen, A. (2021). Citizen views on wood as a construction material: results from seven European countries. *Canadian Journal of Forest Research*, 51. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0274>

Vogel, H. C. (2020). *Diagnóstico integral de la cadena de valor de construcción con madera y aspectos estratégicos para su desarrollo*. Informe Final. Programa de Sustentabilidad y Competitividad Forestal (AR-L1067, Préstamo BID 2853/OC-AR) Dirección General de Programas y Proyectos Sectoriales y Especiales. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Recuperado de: <https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/desarrollo-foresto-industrial/foresto-industria/construccion-madera.php>

APORTES DE LA METODOLOGÍA DE AULA INVERTIDA EN EL PROCESO DE ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA

Recibido 17/01/2023
Aceptado 05/05/2023

CONTRIBUTIONS OF THE INVERTED CLASSROOM METHODOLOGY IN THE TEACHING-LEARNING PROCESS OF BIOCLIMATIC ARCHITECTURE

CONTRIBUIÇÕES DA METODOLOGIA DA SALA DE AULA INVERTIDA NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM DA ARQUITETURA BIOCLIMÁTICA

Alejandro Guerrero-Torrenegra

Escuela de Arquitectura
Universidad del Valle, Cali, Colombia
<https://orcid.org/0000-0003-4691-0803>
alejandro.torrenegra@correounivalle.edu.co

María Machado-Penso

Departamento de Arquitectura y Diseño
Universidad de la Costa, Barranquilla, Colombia
<https://orcid.org/0000-0001-8727-3666>
mmpenso@hotmail.com

Jorge Aldea-López

Facultad de Arquitectura y Diseño
Universidad del Zulia, Maracaibo, Venezuela
<https://orcid.org/0000-0002-0382-8888>
jorge_aldea@hotmail.com

Nelsy Londoño-Bermúdez

Escuela de Arquitectura
Universidad del Valle, Cali, Colombia
<https://orcid.org/0000-0001-6887-2305>
nelsy.londono@correounivalle.edu.co



RESUMEN

La educación se ha transformado debido a las tecnologías. Por lo cual, más que compartir el conocimiento, se busca promover la creatividad desde herramientas y métodos. El objetivo del presente documento es analizar la idoneidad del aula invertida en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la arquitectura bioclimática en contexto de pandemia o enseñanza tradicional presencial. La metodología tiene un enfoque cualitativo, diseño no experimental, y estudio exploratorio. Los resultados confirman que los alumnos dedujeron los conocimientos teóricos y las competencias que habrían recibido de manera lineal en el aula tradicional. Como conclusión, se plantea que la diferencia de esta práctica docente respecto a la tradicional estuvo en hacer que lo teórico deviniera de lo práctico, accionando un proceso de transposición didáctica que no sólo simplificó los saberes, sino que se apoyó en generar transversalidades desde las variables que integran el proceso de aprendizaje.

Palabras clave

arquitectura bioclimática, educación, aula invertida, proyectos, arquitectura vernácula, arquitectura sustentable

ABSTRACT

Education has changed thanks to technology. Therefore, more than sharing knowledge, the aim is to promote creativity through tools and methods. This paper aims at analyzing the suitability of the inverted classroom in the teaching-learning process of bioclimatic architecture in the context of a pandemic or traditional classroom teaching. The methodology has a qualitative approach, a non-experimental design, and an exploratory study. The results confirm that the students deduced the theoretical knowledge and competencies they would have received in a linear way in the traditional classroom. In conclusion, it is suggested that the difference between this teaching practice and a traditional one was in making the theoretical derive from the practical, activating a didactic transposition process that not only simplified knowledge but was based on generating transversalities from the variables involved in the learning process.

Keywords

bioclimatic architecture, education, inverted classroom, projects, vernacular architecture, sustainable architecture.

RESUMO

A educação tem passado por transformações devido às tecnologias. Mais do que compartilhar conhecimento, busca-se promover a criatividade por meio de ferramentas e métodos. O objetivo deste documento é analisar a adequação da sala de aula invertida no processo de ensino-aprendizagem da arquitetura bioclimática em contexto de pandemia ou ensino tradicional presencial. A metodologia adotada possui abordagem qualitativa, design não experimental e estudo exploratório. Os resultados confirmam que os alunos assimilaram os conhecimentos teóricos e habilidades que teriam adquirido de forma linear na sala de aula tradicional. Como conclusão, argumenta-se que a diferença dessa prática docente em relação à tradicional está em fazer com que o teórico se torne prático, ativando um processo de transposição didática que não apenas simplificou os saberes, mas também se apoiou na geração de interdisciplinaridade a partir das variáveis que compõem o processo de aprendizagem.

Palavras-chave

arquitectura bioclimática, educação, sala de aula invertida, projetos, arquitetura tradicional, arquitetura sustentável.

INTRODUCCIÓN

Los jóvenes universitarios ya no ven los avances tecnológicos como novedades, sino que forman parte de su cotidianidad, ahora habitada por herramientas digitales que les permiten acceder y compartir información en todo momento, replanteando los conceptos modernos de tiempo y espacio (Albarello, 2016). Daura y Barney (2016) afirman que el docente debe identificar las actividades que promuevan mayor creatividad y le den mayor autonomía al estudiante para aprender (UNESCO, 2019).

Evidentemente, este cambio de paradigma requiere un cambio en las estrategias de enseñanza-aprendizaje, pues, como bien referencian Soriano y Aguilar (2018), los estudiantes son ahora “nativos digitales”. Al respecto, Perilla (2018) afirma que el alumno de hoy necesita encontrar retos y sentido de utilidad a los contenidos.

En este sentido, el aula invertida, o *flipped classroom*, es un método de enseñanza cuyo objetivo es otorgar al alumno un rol más activo en su proceso de aprendizaje (Berenguer, 2016) y cuya dinámica se traduce en que los alumnos estudiarán por su cuenta los conceptos teóricos facilitados por el docente. De esta forma, se aplica el “aprender haciendo” (González & Yanacallo, 2020) como principio que, traducido al diseño instruccional, conduce a una conversión de las unidades y contenidos de la asignatura en torno a enunciados, los cuales, a modo de hipótesis, debían ser comprobados o refutados por el estudiante mediante la investigación y ejemplificación.

Ahora bien, la enseñanza de la arquitectura está tradicionalmente estructurada en torno al “proceso de adquisición de los saberes para entender y resolver determinado tipo de problemas o situaciones”

(Saldarriaga, 1996, p. 70), los cuales conforman el espacio epistemológico de la arquitectura, es decir, saberes específicos de la disciplina y saberes diversos que se producen en la heteronomía de su práctica (Campo, 2018).

Esto se ha convertido en un problema capaz de articular de forma transversal el proceso de enseñanza-aprendizaje de la arquitectura a nivel de pregrado y posgrado, abordando el proyecto arquitectónico desde las condiciones ambientales (Restrepo, 2013). La mayoría de las escuelas de arquitectura han involucrado en sus currículos académicos la relación entre la arquitectura y el ambiente para “fomentar el conocimiento y las habilidades en el diseño ambiental sostenible, con el objetivo de lograr el confort, el deleite, el bienestar y la eficiencia energética en edificios nuevos y existentes” (Almonte et al., 2012, p. 3). De esta manera, el objetivo del presente artículo es analizar la idoneidad del aula invertida en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la arquitectura bioclimática en contexto de pandemia o enseñanza tradicional presencial.

METODOLOGÍA

Esta investigación de carácter cualitativa se fundamentó en el modelo de aula invertida (Berenguer, 2016), con miras a lograr una perspectiva más profunda que permitiera contextualizar la realidad del proceso de enseñanza-aprendizaje de la arquitectura bioclimática en contexto de pandemia o enseñanza tradicional presencial de la Maestría en Arquitectura y Urbanismo de la Universidad del Valle. En la presente investigación se utilizó un diseño de investigación no experimental y estudio exploratorio.

Para la realización de la investigación se permitió dividir la cátedra en cuatro talleres que se convertirían en módulos para el descubrimiento y la experimentación.

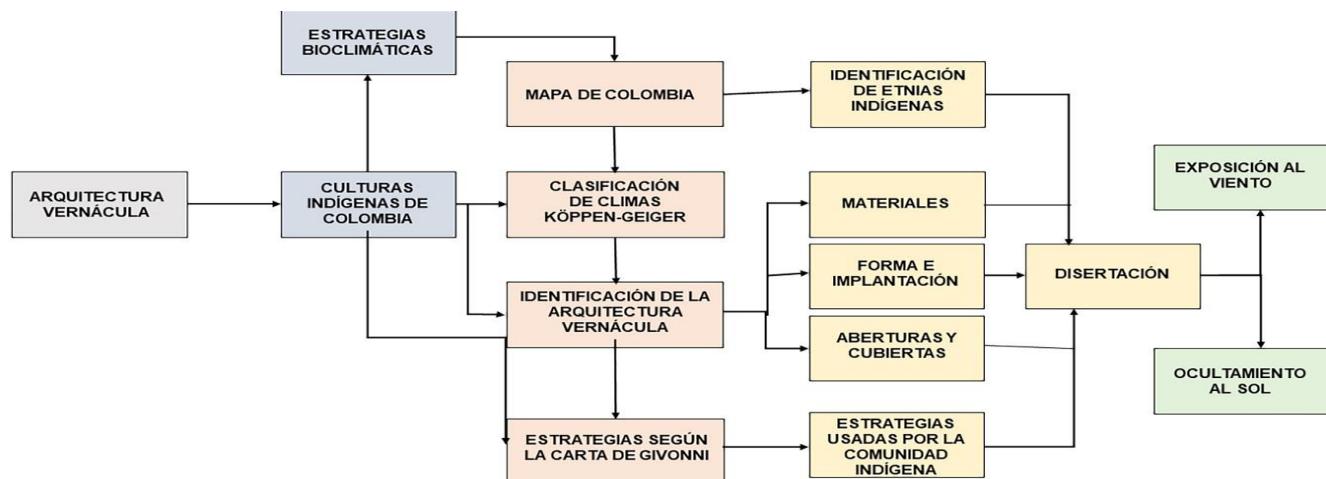


Figura 1. Diagrama taller 1. Fuente: Elaboración de los autores

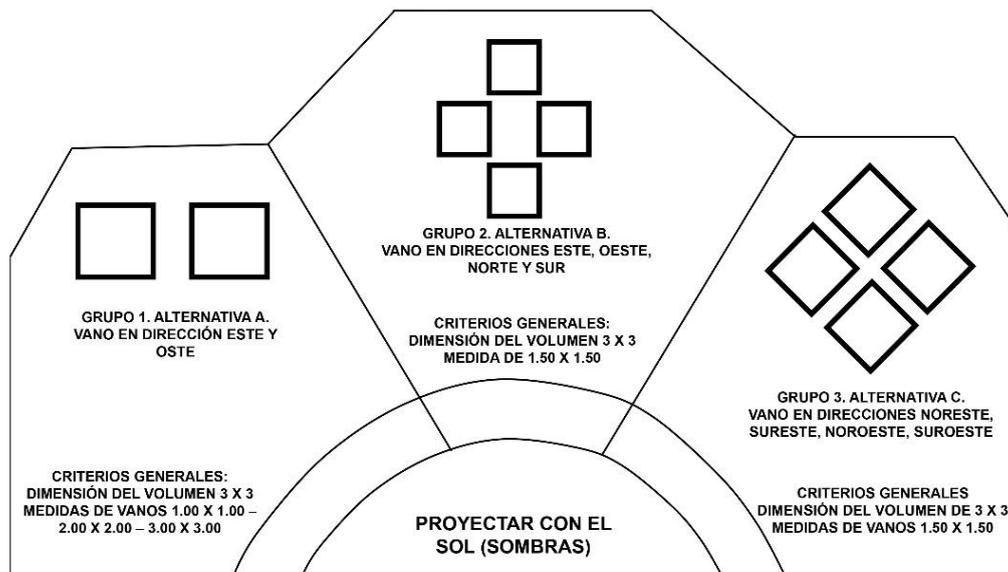


Figura 2. Diagrama taller 2. Fuente: Elaboración de los autores

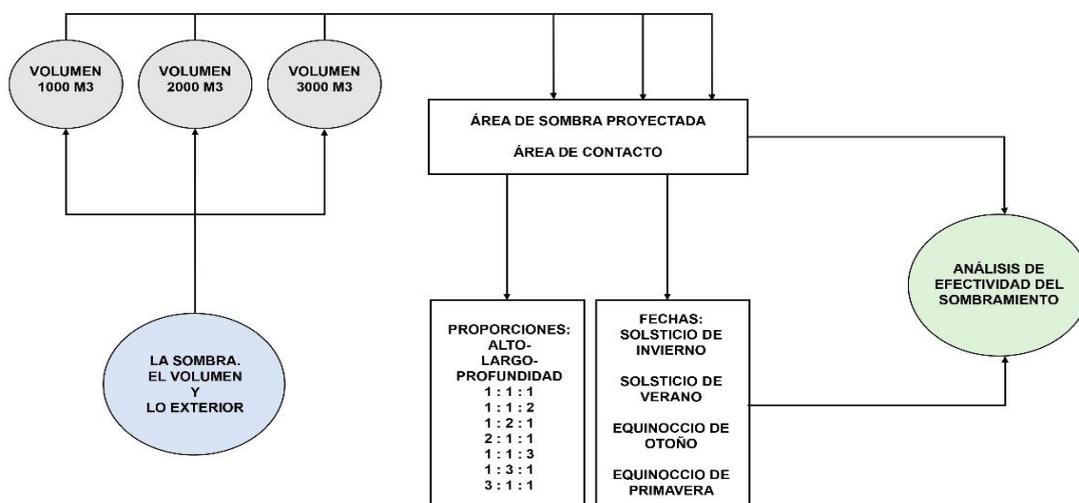


Figura 3. Diagrama taller 2.1. Fuente: Elaboración de los autores

TALLER 1: ARQUITECTURA VERNÁCULA

Se planteó desde el análisis de la arquitectura vernácula de otro país, en este caso Venezuela. Con este referente se mostró, en primer lugar, cómo las formas de construcción de cada una de las etnias estudiadas en este territorio tuvieron una arquitectura que está relacionada con las condiciones ambientales (Philokyprou, 2011). Posteriormente, se fue demostrando cómo dichos aspectos eran considerados en sus edificaciones (Figura 1).

TALLER 2: SOL

Se inició intercambiando conocimientos sobre temas como el movimiento de traslación y rotación de la Tierra y su relación con las envolventes de la edificación.

Posteriormente, se asignó una primera tarea a los estudiantes, que consistía en definir una forma de protección solar para una ventana con una orientación específica (Figura 2). En una segunda parte de este taller se hizo énfasis en la proyección de sombra en espacios exteriores a través de volúmenes contruidos (Figura 3).

TALLER 3: VIENTO

Se inició con la explicación de los principios que producen el movimiento del aire y cómo algunos ejemplos edilicios logran aprovecharlo. Los modelos utilizados en el estudio de las sombras se emplearon para los cálculos y simulaciones, con los cuales los estudiantes pudieron analizar el comportamiento del flujo y movimiento del aire respecto de la ubicación y tamaño de la ventana (Figura 4).

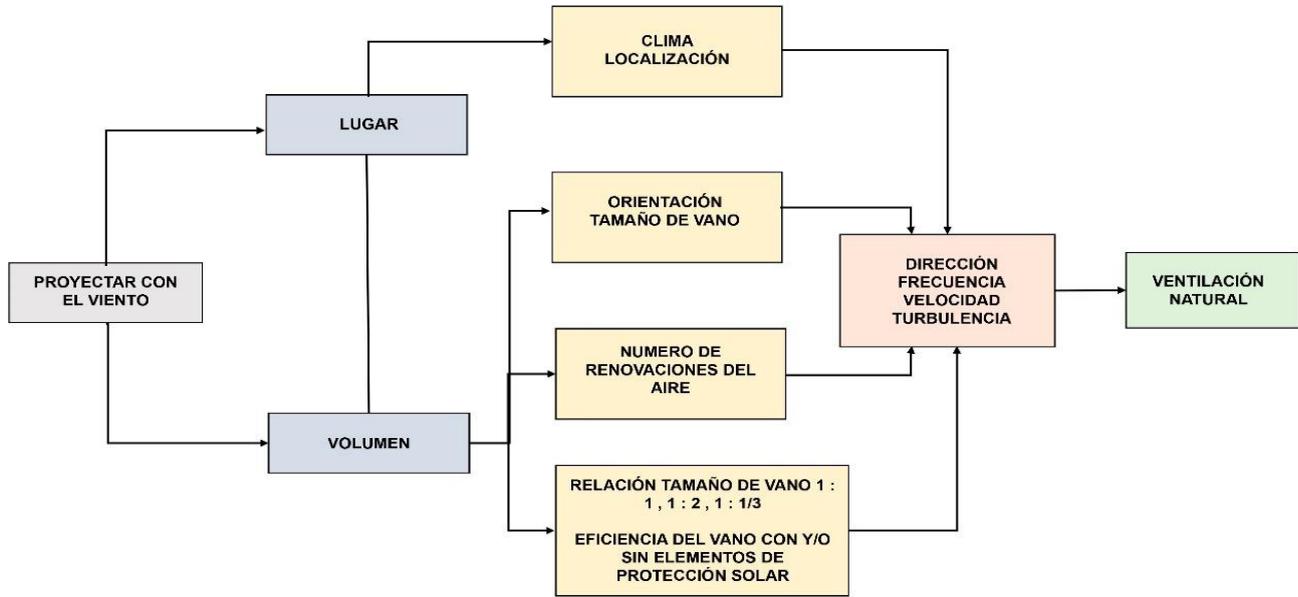


Figura 4. Diagrama taller 3. Fuente: Elaboración de los autores

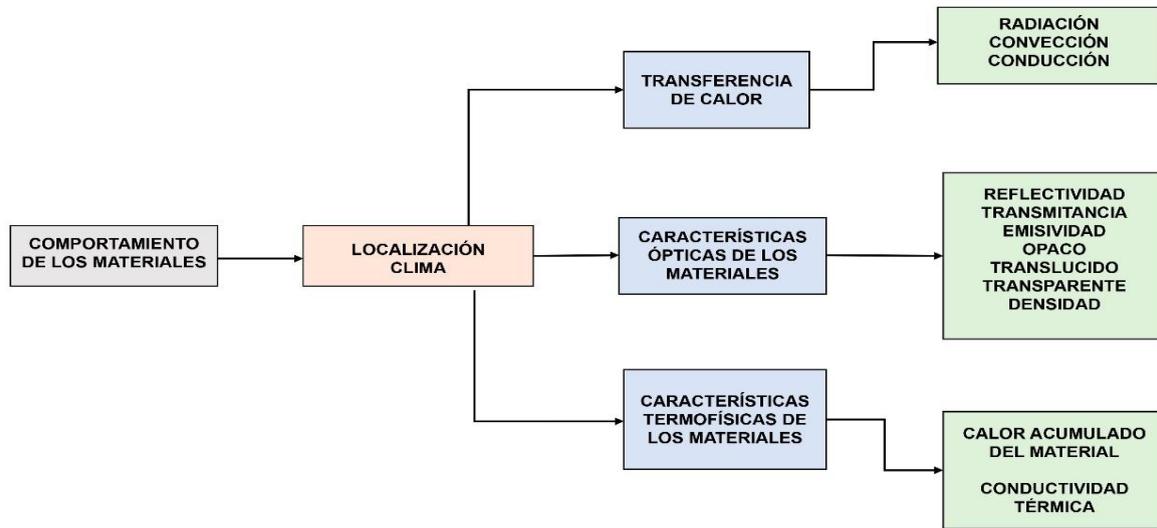


Figura 5. Diagrama taller 4. Fuente: Elaboración de los autores

TALLER 4: TERMODINÁMICO DE LOS MATERIALES

Este taller estuvo mediado por los conceptos que definen las propiedades físicas y térmicas de los materiales. Luego, se propuso analizar el comportamiento de la temperatura horaria interior utilizando materiales de alta, media y baja densidad, con y sin material aislante (Givoni, 1969). Para ello, se utilizó una base de datos programada en Excel (Neila, 1997) que permitió desarrollar análisis, con las que posteriormente los estudiantes debían interpretar los valores de temperatura y horarios (Figura 5).

EVALUACIÓN DEL MÉTODO Y ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Para evaluar el desempeño y la calidad de la función didáctica en la aplicación de los talleres dictados se emplearon tres técnicas: la primera, una evaluación del proceso por pares, que fueron realizadas al final de los talleres antes referidos (aportando una metaevaluación y una heteroevaluación de la experiencia); la segunda, correspondió a una entrevista semiestructurada hecha de forma individual a los estudiantes.

La evaluación de pares fue realizada de forma interna y externa empleando para esto a los 2 profesores que dictaron la asignatura como jurado interno y, como jurado invitado, se incorporaron 4 docentes externos a la MAU. Los mismos asistieron como evaluadores al cierre de cada taller, quienes, junto con presentar su retroalimentación a los participantes y una vez hecho el cierre de la actividad, compartieron sus apreciaciones mediante una entrevista semi estructurada.

La segunda estrategia empleada, la entrevista semiestructurada, se aplicó a los 8 estudiantes inscritos en la asignatura, al igual que en la encuesta estructurada, a través de un muestreo censal. En el mismo se evaluaron, mediante una conversación conducida, cada uno de los indicadores de idoneidad en términos simplificados y generales, con el objetivo de captar una apreciación general que permitiera al alumno compartir los elementos que habían resultado más relevantes dentro del proceso sin ser conducidos por un guion preestablecido.

Por último, para definir los niveles de adecuación en los otros cinco indicadores, una vez finalizada la asignatura, se optó por aplicar un cuestionario en línea cuya escala de calificación sigue el modelo de Likert. En la misma se establecieron cinco niveles, ordenados de menor a mayor, mediante una escala numérica para medir actitudes: 1 (en total desacuerdo), 2 (en desacuerdo), 3 (ni de acuerdo, ni en desacuerdo), 4 (de acuerdo) y 5 (completamente de acuerdo). De esta escala se extrae la media como valor de referencia, ya que se esperaban niveles consistentes en la valoración de los participantes.

Como se comentó con anterioridad, se optó por hacer una muestra censal que abarcó la totalidad de estudiantes del curso, por lo que esta cifra corresponde simultáneamente al universo, muestra y población.

En estos instrumentos se evaluaron seis dimensiones de idoneidad didáctica en torno a los componentes propuestos por Godino, 2017 y Godino, 2013:

- Idoneidad epistémica: Estima los aprendizajes alcanzados con relación a los modelos tradicionales.
- Idoneidad cognitiva: Valora si los objetivos planteados eran alcanzables con relación a los conocimientos previos traídos por los estudiantes y si los mismos fueron alcanzados tras el cierre de la cátedra.
- Idoneidad interaccional: Establece si las interacciones con el docente están resolviendo dudas y dificultades de los alumnos y favorecen el proceso de aprendizaje.
- Idoneidad mediacional: Analiza la adecuación de los recursos empleados en el proceso pedagógico, involucrando tiempos, tecnologías y material.
- Idoneidad afectiva: Evalúa el interés, motivación, implicación y participación del alumno durante el

proceso de aprendizaje.

- Idoneidad ecológica: Fue útil para estimar la adecuación del proceso educativo en el proyecto educativo de la institución, el pénsum de estudios y el entorno social y profesional.

Para el procesamiento de los instrumentos de evaluación de la experiencia se utilizaron las entrevistas semiestructuradas como insumos para evaluar y diseñar el cuestionario referido. Además, las apreciaciones hechas por los pares evaluadores y los estudiantes a modo individual permitieron hacer una valoración cualitativa de la experiencia en términos más amplios, particularmente en lo relativo a la idoneidad epistémica y ecológica.

LA ENSEÑANZA-APRENDIZAJE DE LA ARQUITECTURA BIOCLIMÁTICA EN LA ESCUELA DE ARQUITECTURA DE LA UNIVERSIDAD DEL VALLE

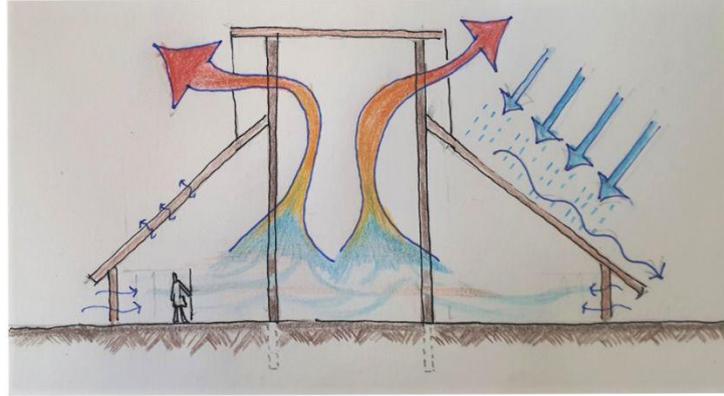
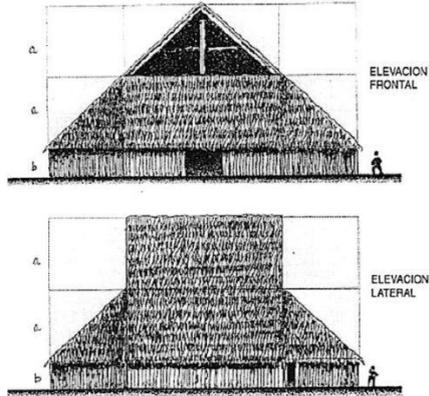
La MAU ofrece una línea de trabajo de arquitectura y urbanismo bioclimático en la que se estudian el confort térmico de los usuarios y el aprovechamiento de las condiciones climáticas del lugar (Olgyay, 1963). El proceso de enseñanza-aprendizaje en la cátedra de Arquitectura y Urbanismo Bioclimático de la MAU ha estado orientado hacia el aprendizaje por competencias, el cual dicta que, para alcanzar los niveles de desempeño de una competencia, se deben cumplir un conjunto de evidencias e indicadores de logros.

En ese sentido, los logros en el proceso de enseñanza-aprendizaje de la asignatura se traducen en generar experiencias distintas para que el estudiante se convierta en protagonista de su proceso educativo mediante la transformación de las estrategias didácticas, lo cual apunta a una resignificación de los procesos inherentes al aula. Al conseguir que los estudiantes se vuelvan protagonistas de su aprendizaje, el ritmo del proceso pasa a cobrar una dimensión personal y se genera un entorno personal del aprendizaje (PLE) (Vidal, 2015). Así, alumnos con diversidad funcional pueden aprovechar las posibilidades de profundizar en ciertos aspectos o repetir contenidos en determinados momentos.

Aguilera-Ruiz et al. (2017) hacen un balance al respecto y refieren, sumado a las ventajas ya mencionadas, el inconveniente de que esta modalidad supone para el docente un esfuerzo adicional que en el método tradicional, al igual que señalan la resistencia que pueden expresar los alumnos ante el mismo.

Para lograr la materialización de esta modalidad, se configura la cátedra teniendo en cuenta la siguiente premisa: lo teórico deviene de lo práctico. Es decir, durante la asignatura se acciona un proceso de transposición didáctica como estrategia que no solo simplifica para el estudiante la asimilación de los

TALLER 1



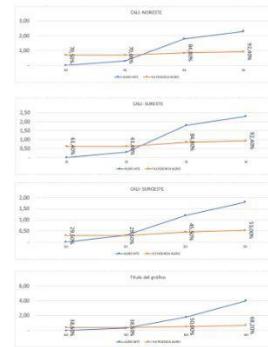
TALLER 2

ANÁLISIS EFICIENCIA DE ALEROS Y PARTESOLAS SEGÚN ORIENTACION

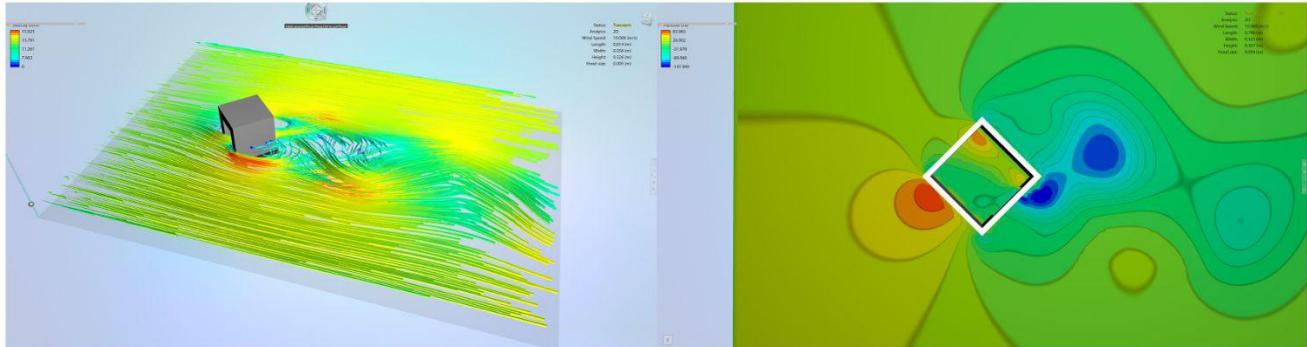
BUENOS AIRES							
ORIENTACION	ALERO HTS	EFICIENCIA ALERO	ANGULO INCLINACION GRADOS	PARTESOL		EFICIENCIA PARTESOL	ANGULO GRADOS PARTESOLAS
				IZQ	DER		
TODAS	0,3	34% A 66%	81	0,3	0,3	32% a 59%	9
TODAS	1,8	45	1,8	1,8	21% a 46%	38	

BUENOS AIRES					
ORIENTACION	ALERO HTS	% EFICIENCIA ALERO	ANGULO INCLINACION GRADOS	PARTESOL	EFICIENCIA PARTESOL
NE	-	66,00%	90	-	37,20
	0,30	66,00%	81	0,30	37,20
	1,80	60,30%	45	1,80	37,20
SE	-	60,00%	90	-	60,00
	0,30	60,90%	81	0,30	59,00
	1,00	65,40%	61	-	66,90
SO	-	34,00%	90	-	34,00
	0,30	34,00%	81	0,30	32,00
	1,20	41,00%	56	-	34,10
NO	-	45,50%	90	-	37,20
	0,30	45,50%	81	0,30	37,20
	1,80	42,30%	45	1,80	37,20

ANÁLISIS DE EFICIENCIA DE ALEROS EN CALI



TALLER 3



TALLER 4

COMPARACION CET- APERTURAS Y MATERIALES

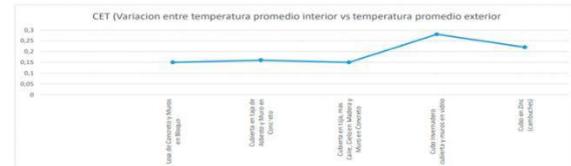


ANALIZANDO LA VARIACION CET (PROMEDIOS TEMPERATURA INTERIOR CON RESPECTO A LOS PROMEDIOS DE TEMPERATURA EXTERIOR), CON RESPECTO A LA ABERTURAS DE VENTILACION Y LOS MATERIALES

SE OBSERVA COMO INFLUYE EL TAMAÑO DE LAS VENTANAS, PARA NUESTRO CLIMA TROPICAL ES INDISPENSABLE QUE LAS VENTANAS SEAN DE TAMAÑOS OPTIMOS PARA GENERAR CONFORTAL INTERIOR DE LA EDIFICACION.

DESCRIPCION MATERIALES

DESCRIPCION MATERIALES	APERTURAS	T MAX	T MINIMA	VAR T J	CET
Losa de Concreto y Muros en Bloque	1,5x1,5	24,77	23,26	1,5	0,15
Cubierta en teja de Asbesto y Muro en Concreto	1,5x1,5	24,81	23,24	1,57	0,16
Cubierta en teja, mas Caire, Cielo en Madera y Muro en Concreto	1,5x1,5	24,73	23,28	1,45	0,15
Cubo Invernadero cubierta y muros en vidrio	1,5x1,5	25,57	22,86	2,72	0,28
Cubo en Zinc (cambuche)	1,5x1,5	25,21	23,04	2,17	0,22



EN ESTE GRAFICO SE EVIDENCIA COMO LOS DIFERENTES MATERIALES USADOS AFECTA LA TEMPERATURA EXTERIOR AL INTERIOR DEL VOLUMEN. EL VIDRIO USADO PARA INVERNADEROS ES MUY UTIL PARA CLIMAS FRIOS Y TEMPLADOS, PERO PARA CLIMAS TROPICALES REQUIERE DE UN DISEÑO AYUDADO CON VEGETACION, MEJORES ABERTURAS Y ELEMENTOS ADICIONALES QUE LE DEN CONFORT AL ESPACIO.

EL ZINC, MUY USADO EN LAS CONSTRUCCIONES IMPROVISADAS, GENERA ESPACIOS INCONFORTABLES PARA TODO TIPO DE CLIMAS, DADO EL MATERIAL QUE ES ALTAMENTE CONDUCTIVO.

Figura 6. Procesos y resultados de los talleres. Fuente: Elaboración de los autores

saberes, sino que también se apoya en la generación de transversalidades desde los elementos que integran los procesos de aprendizaje: actores, canales, medios y secuencias didácticas (López-Gutiérrez & Pérez-Ones, 2022).

En la aplicación de este modelo durante el contexto de la crisis sanitaria mundial producto del covid-19, el aula invertida (Janssen, 2020) se constituyó como un enfoque a considerar, como bien afirman Williner (2021) y Cornelis (2020), al no requerir de la presencia física del profesor. Sin embargo, a pesar de que esta metodología constituye una oportunidad para que el estudiante asuma el protagonismo, igualmente conlleva que tanto la institución como los profesores asuman una carga mayor.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EVALUACIÓN DE LA IDONEIDAD DIDÁCTICA

El aula invertida fue propuesta durante la contingencia sanitaria con el fin de aprovechar el contexto para generar una resignificación de los aprendizajes. A partir de la inversión que supone este cambio de enfoque, el alumno debe trabajar, estudiar y analizar de forma autónoma los conceptos teóricos que los docentes aportan.

Al estructurar la cátedra en talleres y no por contenidos programáticos, para que el aprendizaje de la arquitectura bioclimática se generara de lo real a lo abstracto, se consideró que no era tan necesario que los estudiantes tuvieran conocimientos específicos previos para comprender los ejercicios y, además, se abrió la posibilidad de agrupar estudiantes más allá de su nivel de estudios. Esta nueva organización supuso un fortalecimiento y creación de nuevas sinergias entre pregrado y posgrado, a través del fomento del trabajo colaborativo, la construcción de conocimiento crítico, el intercambio y la disertación dentro del grupo, entre grupos y con los docentes; la demostración del conocimiento interiorizado por parte del estudiante, la especulación teórica a partir de la práctica y, finalmente, la validación de las competencias alcanzadas con el desarrollo de la asignatura (Figura 6).

IDONEIDAD EPISTÉMICA

De los indicadores abordados durante el estudio, este fue el único evaluado más allá de los estudiantes, ya que determina que la propiedad de los contenidos debía ser revisado por pares académicos y expertos. Para tal fin, el cierre de cada taller fue acompañado por un jurado frente al que los alumnos presentaron sus hallazgos, seguido de una sesión de preguntas y respuestas. Sobre las mismas, no se encontraron errores o inconsistencias

epistemológicas en los conceptos o contenidos impartidos y manejados por los participantes, por el contrario, gracias a esas intervenciones se demostró que los enunciados estudiados fueron reafirmados por los estudiantes, quienes encontraron interrelaciones conceptuales y una apropiación de los conceptos, siendo capaces de generar demostraciones y explicaciones de estos con sus propias palabras. Lo anterior evidencia la capacidad de construir argumentos, solventar problemas y plantear conexiones entre saberes.

IDONEIDAD COGNITIVA

Al momento de diseñar los talleres se revisaron y consideraron las competencias adquiridas en las unidades curriculares preliminares, por lo que el nivel de dificultad manejado era el adecuado para una cátedra que tuvo por objeto generar el marco teórico adecuado para la comprensión de los principios de la arquitectura bioclimática. Asimismo, se incluyeron como complemento, sesiones de asesoría para la ampliación y refuerzo de conocimientos, en las que los estudiantes pudieron aclarar dudas y profundizar en diálogo con el docente aspectos que habían sido investigados por estos de forma particular siguiendo el modelo de aula invertida. Sumado a lo anterior, se plantearon diversos modos de evaluación que pretendían activar distintos procesos cognitivos y metacognitivos relevantes como generalización, conexiones, conjeturas, entre otros.

Para lograr una idoneidad cognitiva se hizo necesario monitorear el desempeño de los alumnos de forma individual a lo largo de cada taller, pues, al principio, los cambios del modelo tradicional al enfoque de aula invertida generaron cierta resistencia. Lo anterior se manifestó en las entrevistas particulares, aunque en la encuesta de idoneidad didáctica se alcanzó una media de 4,61. En este punto en particular se encontró que cerca del 50% manifestó sentir un grado de desorientación o confusión en cuanto a la comprensión de los enunciados del primer taller.

IDONEIDAD INTERACCIONAL

Se midió la manera en la que el profesor condujo el ejercicio, del mismo modo, se monitoreó la presentación del tema y los ejercicios, la interacción entre el docente y el estudiante, así como también los espacios ofertados para el diálogo. Si bien en esta fase se empleó una observación sistemática del proceso cognitivo de los alumnos y se observó el diálogo y comunicación entre y con los estudiantes, los instrumentos aplicados resaltaron que, para estos, los niveles de interacción podían ser mejorados.

En los resultados de la encuesta en los ítems 13 y 14 (Tabla 1) se puede apreciar que, si bien más del 60 % valoró estar completamente de acuerdo con la comunicación, el diálogo y la interacción con el docente, el 40 %

Tabla 1: Resultados de encuesta de idoneidad didáctica. Fuente: Elaboración de los autores.

	ÍTEM DE IDONEIDAD DIDÁCTICA	MEDIA	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
1	Comprendí claramente desde el principio los postulados y objetivos de los ejercicios	4,61	0,61
2	Comprendí de forma clara y precisa la relación entre los objetivos de los talleres y de la materia	4,61	0,47
3	Considero que mejoró mi capacidad de analizar e interpretar las soluciones arquitectónicas proyectadas a partir del clima	4,73	0,44
4	Soy capaz de reconocer valores y soluciones tecnológicas en referentes arquitectónicos que permiten aprovechar o proteger la edificación de la luz solar	4,60	0,48
5	Considero que la cátedra enriqueció mi formación como arquitecto	4,86	0,33
6	Considero que los talleres expandieron mi comprensión del hecho arquitectónico	4,60	0,37
7	Considero que el ejercicio mejoró mi apreciación de la arquitectura tropical	4,70	0,45
8	Considero que el taller me aportó conocimientos y procesos para proyectar las consideraciones de diseño bioclimático	4,73	0,37
9	Me mantuve motivado a lo largo de la elaboración de los ejercicios	4,82	0,38
10	La materia me permitió comprender la importancia de investigar y explorar con una visión abierta y pensamiento crítico	4,81	0,39
11	Considero que con los talleres ejercité mi capacidad de inferir conclusiones a partir de premisas y evidencias que se me presentaron en el proceso	4,60	0,61
12	Considero que la materia me llevó a reflexionar y generar nuevas ideas y conceptos para encontrar soluciones de diseño	4,46	0,61
13	Considero que hubo un diálogo pertinente, eficaz y oportuno con el docente	4,53	0,61
14	La comunicación con el docente a lo largo de la materia fue clara y asertiva	4,33	0,69
15	El planteamiento del ejercicio, las instrucciones y el material didáctico fueron suficientes para comprender los objetivos y alcances del ejercicio	4,62	0,48
16	Considero que la cátedra me permitió desarrollar mi pensamiento crítico	4,60	0,61
17	Considero que a lo largo de la asignatura mejoré mis capacidades y aptitudes para llevar a cabo una investigación en lo concerniente a recolectar información, procesarla y generar conclusiones a partir de las mismas	4,66	0,47
18	Considero que esta cátedra mejoró mi comprensión de la arquitectura	4,73	0,44
19	Considero que la cátedra fue planificada en los tiempos óptimos para el cumplimiento de sus objetivos	4,40	0,48
20	Considero que a nivel técnico y didáctico se tuvieron los recursos necesarios para lograr cumplir los objetivos	4,33	0,86
21	Las plataformas y medios utilizados fueron los más idóneos	4,40	0,48
22	Considero que lo aprendido puede ser utilizado en mi práctica como arquitecto	4,93	0,24

restante disminuyó ligeramente su calificación de estar completamente de acuerdo a solo de acuerdo y neutrales, lo cual demuestra que los alumnos percibieron que no fueron integrados plenamente en el proceso educativo.

IDONEIDAD MEDIACIONAL

Se evaluó el uso de tecnologías y material de apoyo, así como todos los aspectos relativos al medio en que se desarrolló el proceso de enseñanza-aprendizaje. Dado que el enfoque adoptado durante esta experiencia estuvo enmarcado en la educación a distancia, es evidente que cobró mayor relevancia el uso de las tecnologías de comunicación e información, las que, en este caso, fueron evaluadas desde la experiencia percibida por los estudiantes a través del cuestionario antes referido. De dicho instrumento se obtuvo una valoración positiva en la totalidad del alumnado. Sin embargo, a nivel técnico, un 14% de la muestra manifestó neutralidad ante la afirmación de que las estrategias dispuestas habían sido suficientes, cifra que se observó en los ítems relativos a la comunicación con el docente y los medios empleados, como puede observarse en la Tabla 1 en los ítems 19, 20 y 21. De esto se puede inferir que, para la preparación de los talleres, es necesario evaluar los ítems, tiempos y material didáctico suministrado a los alumnos.

IDONEIDAD AFECTIVA

En este punto se evaluó el interés de los alumnos en las tareas dispuestas. Con base en lo evidenciado en las encuestas, nuevamente la valoración fue indiscutiblemente positiva. Particularmente de este apartado resalta que, en un principio, los ítems que evaluaron la motivación de los alumnos fueron estimados con la calificación más alta y se mantuvo constante a lo largo del ejercicio, aspecto que se confirmó con la alta participación y disposición de los alumnos en las jornadas de asesorías y las entrevistas realizadas de manera individual.

IDONEIDAD ECOLÓGICA

La idoneidad ecológica está referida a las relaciones de los contenidos impartidos con las directrices, objetivos, estrategias y contenidos de las estructuras que forman el contexto de la unidad curricular. En este caso, las mejores calificaciones por parte del estudiantado encuestado se obtuvieron en este apartado logrando unanimidad en las afirmaciones que se referían a la contribución de los ejercicios en su formación como arquitectos, el estímulo del pensamiento crítico, el desarrollo de competencias investigativas y la integración de saberes dentro de la malla curricular.

SÍNTESIS DE LA IDONEIDAD DIDÁCTICA

Los niveles de internalización y competencias experimentados, de acuerdo con los procesos de

enseñanza-aprendizaje y a partir de las dimensiones de idoneidad didáctica, evidencian una aceptación de las estrategias de aula invertida en la asignatura Arquitectura y Urbanismo Bioclimático. En las idoneidades afectivas, ecológicas, epistémicas y cognitivas se muestra un fortalecimiento del aprendizaje debido a que los procesos de inferencia cognitiva abarcan operaciones de implicación, reflexión y razonamiento. Sin embargo, las dimensiones mediacionales e interaccionales proporcionan unos índices medios de competencia, ya que la virtualidad no favorece dicha interacción. Esto, aunque previsible, remarca el potencial didáctico del aula invertida para consolidar indicadores de logro en lo cognitivo, lo procedimental y lo actitudinal, aunque solo es una pequeña muestra de cómo dicha modalidad tiene un impacto en la experiencia del estudiante a nivel emocional. Conviene decir que, pese a los múltiples medios y estrategias aplicados, los niveles de interaccionalidad fueron menores.

De igual forma, estos resultados muestran que, en la dimensión mediacional de la experiencia didáctica, la valoración de los alumnos fue menor, hecho que puede ser atribuido a la naturaleza de los medios instruccionales y a la educación a distancia, cuya rigidez en la planificación puede ser entendida como un distanciamiento en la relación profesor/estudiante.

CONCLUSIÓN

La implementación de estos talleres en la asignatura de Arquitectura y Urbanismo Bioclimático, evidencian que el aprendizaje inductivo desde la experiencia práctica genera una inmersión en el conocimiento que el estudiante puede utilizar como sustento para su diseño proyectual. Esto no quiere decir que el estudiante sea un mero receptor, sino que, por el contrario, se comporte como el agente principal del proceso de aprendizaje, generando las bases de su conocimiento mediante la experiencia, incentivando su creatividad y estimulando la búsqueda. Esto es cónsono con las formas de conocimiento de las culturas latinoamericanas y con el aprendizaje de la arquitectura, en tanto "aprender haciendo".

Tomar los indicadores de idoneidad didáctica como punto de partida para evaluar la acción docente resultó ser una estrategia enriquecedora. El análisis de la experiencia en torno a los 6 indicadores expuestos permitió detectar que el enfoque planteado de aprender-haciendo tuvo un impacto positivo en el estudiante, más allá del evidenciado en las evaluaciones. Se pudo interpretar a través de los distintos ítems que el proceso resultó ameno y estimulante para los participantes y que la mayor oportunidad para mejorar esta metodología se encontró en la planificación de evaluaciones y los medios didácticos. Aparte, en ambos casos se pudo sugerir la construcción de un plan de estudios colaborativo y la aplicación de

otros formatos y estrategias para las lecciones teóricas en futuros ensayos, que inevitablemente forman parte de los contenidos descritos en el programa.

Por último, esta experiencia demostró que las limitaciones impuestas por el contexto de pandemia y educación a distancia resultaron en una oportunidad para generar transformaciones. Si bien el aprendizaje de la arquitectura y el urbanismo bioclimático se habría estructurado convencionalmente en torno a la ratificación de afirmaciones, repensar el espacio académico para el agenciamiento y empoderamiento del estudiante da las condiciones para lograr un aprendizaje significativo a partir de la reinterpretación de la cotidianeidad. Los principios de la arquitectura y el urbanismo bioclimático afectan nuestra forma de experimentar el entorno desde conceptos clave como la sensación y la calidad térmica. Es por esto que el pensamiento corporeizado a través de la instrumentación digital y la asesoría docente permite consolidar y estimular el pensamiento crítico y el cumplimiento de las competencias.

AGRADECIMIENTOS

La institución que financió la investigación fue la MAU de la Universidad del Valle. La investigación se realizó en la ciudad de Cali-Colombia con la participación de docentes de la Universidad de la Costa y Universidad del Zulia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera-Ruiz, C., Manzano-León, A., Martínez-Moreno, I., Lozano-Segura, M. del C. & Yanicelli, C. C. (2017). El modelo flipped classroom. *International Journal of Developmental and Educational Psychology*, 4(1), 261-266. Recuperado de: <https://revista.infad.eu/index.php/IJODAEP/article/view/1055/931>

Albarello, F. (2016). El ecosistema digital de los jóvenes universitarios. En: J.C. Durand, Á. V. Corengia, F. T. Daura (directores) & M. S. Urrutia (Coordinadora). *Aprender a enseñar: el desafío de la formación docente inicial y continua*. Actas de las VII Jornadas Académicas de la Escuela de Educación de la Universidad Austral, Valdivia, Chile. Recuperado de: <https://www.teseopress.com/formaciondocente>

Almonte, S., Cadima, P., Yannas, S., De Herde, A., Riemer, H., Cangelli, E., López de Asiain, M. & Horvath, S. (2012). *Educate! Sustainable environmental design in architectural education and practice*. [Artículo]. PLEA2012 - 28th Conference, Opportunities, Limits & Needs Towards an environmentally responsible architecture., Lima, Perú. Recuperado de: <https://plea-arch.org/ARCHIVE/websites/2012/files/T09-20120129-0022.pdf>

Berenguer, C. (2016). Acerca de la utilidad del aula invertida o flipped classroom. En: M. Tortosa, S. Grau & J. Álvarez (Ed.), *XIV Jornadas de redes de investigación en docencia universitaria. Investigación, innovación y enseñanza universitaria: enfoques pluridisciplinares*. Alicante, España, 1466-1480. Recuperado de: <http://rua.ua.es/dspace/handle/10045/57093>

Campo Baeza, A. (2018). *Quiero ser arquitecto. Para los que sueñan y luego quieren construir esos sueños*. Diseño editorial. España. Recuperado de: <https://core.ac.uk/download/pdf/148670238.pdf>

Cornelis-Janssen, C. H. (2020). El aula invertida en tiempos del COVID-19. *Educación química*, 31(5), 173-178. DOI: <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.5.77288>

Daura, F. & Barney, M. C. (2016). El desafío de enseñar a la generación net. En: J. C. Durand, Á. V. Corengia, F. T. Daura (Directores) & M. S. Urrutia (Coordinadora) (2016) *Aprender a enseñar: el desafío de la formación docente inicial y continua*. Actas de las VII Jornadas Académicas de la Escuela de Educación de la Universidad Austral, Valdivia, Chile. Recuperado de: <https://www.teseopress.com/formaciondocente>

Givoni, B. (1969). *Man, climate, and architecture*. Elsevier.

Godino, J. D. (2013). Indicadores de la idoneidad didáctica de procesos de enseñanza y aprendizaje de las matemáticas. *Cuadernos de Investigación y Formación en Educación Matemática*, (11), 111-132. Recuperado de: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cifem/article/view/14720>

Godino, J. D., Giacomene, B., Batanero, C. & Font, V. (2017). Enfoque Ontosemiótico de los Conocimientos y Competencias del Profesor de Matemáticas. *Bolema, Rio Claro*, 31(57), 90-113. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1980-4415v31n57a05>

González-Sanmartín, V. A. & Yanacallo-Pilco, W. V. (2020). Aprender haciendo: Aplicación de la metodología por ambientes de aprendizaje. *Polo del Conocimiento*, 5(7), 188-208. Recuperado de: <https://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/1503>

Janssen, C. H. C. (2020). El aula invertida en tiempos del COVID-19. *Educación Química*, 31(5), 173-178. DOI: <https://doi.org/10.22201/fq.18708404e.2020.5.77288>

López-Gutiérrez, J. C. & Pérez-Ones, I. (2022). Docencia universitaria y transposición didáctica. Estudio de percepción. *Revista Chakiñan de Ciencias Sociales y Humanidades*, (16), 24-34. DOI: <https://doi.org/10.37135/chk.002.16.01>

Neila-González, J. & Bedoya-Frutos, C. (1997). Técnicas arquitectónicas y constructivas de acondicionamiento ambiental. Munilla-Lería.

Olgay, V. (1963). *Design with Climate Bioclimatic Approach to Architectural Regionalism*. University Press.

Perilla Granados, J. S. (2018). *Las nuevas generaciones como un reto para la educación actual*. Universidad Sergio Arboleda. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <https://repository.usergioarboleda.edu.co/bitstream/handle/11232/1222/Nuevas%20generaciones.pdf?sequence=5>

Philokyprou, M. (2011). Teaching vernacular architecture and rehabilitation in relation to bioclimatic design elements. In *Architecture & Sustainable Development (vol. 1): 27th International Conference on Passive and Low Energy Architecture* (Vol. 1, p. 89). Presses univ. de Louvain.

Restrepo Botero, C. (2013). *Inclusión de la dimensión bioclimática en la enseñanza de la arquitectura en un marco sostenible*. Caso de estudio programa de arquitectura de la Universidad Católica de manizales: Integración de los temas bioclimáticos y energético ambientales en un marco sostenible en la totalidad del currículo académico [Tesis de maestría. Universidad Internacional de Andalucía]. Recuperado de: https://dspace.unia.es/bitstream/handle/10334/2510/0450_Restrepo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Saldarriaga, A. (1996). *Aprender arquitectura. Manual de supervivencia*. Editorial Corona.

Soriano-Hernández, E. & Aguilar-Espinosa, M. G. (2018). Nuevas generaciones, cambio de estrategias de aprendizaje. *Jóvenes en la Ciencia Revista de divulgación Científica*, 4(1), 1983-1987. Recuperado de: <https://www.jovenesenlaciencia.ugto.mx/index.php/jovenesenlaciencia/article/view/2916>

UNESCO. (2019). Marco de aplicación de la Educación para el Desarrollo Sostenible (EDS) después de 2019. Conferencia General, 40th, [1185]. Recuperado de: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000370215_spa 08/05/2021

Vidal-Ledo, M. J., Martínez-Hernández, G., Nolla-Cao, N. & Vialart-Vidal, M. N. (2015). Entornos personales de Aprendizaje. *Educación Médica Superior*. 29(4). Recuperado de: <https://ems.sld.cu/index.php/ems/article/view/726/314>

Williner, B. (2021). La clase invertida a través de tareas: Una experiencia durante el periodo de aislamiento por COVID-19 en carreras de ingeniería. *Revista Iberoamericana de Tecnología en Educación y Educación en Tecnología*, (28), 48-55. DOI: <https://doi.org/10.24215/18509959.28.e6>

EL TAPANCO EN VIVIENDAS VERNÁCULAS DE QUERÉTARO, MÉXICO. USO Y EFICIENCIA HIGROTÉRMICA

TAPANCO IN VERNACULAR HOUSES IN QUERÉTARO, MEXICO. USE AND HYGROTHERMAL EFFICIENCY

O "TAPANCO" NAS MORADIAS VERNACULARES DE QUERÉTARO, MÉXICO. USO E EFICIÊNCIA HIGROTÉRMICA.

Martín Hernández-Chavela

Facultad de Filosofía y Letras
Universidad de Málaga, Málaga, España
<https://orcid.org/0000-0002-6525-3610>
martin.hc@queretaro.tecnm.mx

Flavio Roberto Ceja-Soto

Carolina Performaces fabrics
Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica (CIDETEQ), Santiago de Querétaro, México
<https://orcid.org/0009-0002-8570-1270>
flace5@hotmail.com

Ángel Marroquín de Jesús

División de Química Industrial y Energías Renovables
Universidad Tecnológica de San Juan del Río, San Juan del Río, México
<https://orcid.org/0000-0001-7425-0625>
amarroquind@utsjr.edu.mx



RESUMEN

Hoy día son evidentes las consecuencias climáticas provocadas por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que encaminan a alcanzar 2.7 °C de calentamiento global hacia 2100. La dependencia energética de las edificaciones es una de las causas principales, pues demandaron solo para calefacción el 50% del consumo de energía global en 2021, siendo necesario implementar sistemas bioclimáticos pasivos de climatización. Este trabajo documenta la utilización en viviendas vernáculas de Querétaro, México, de un eficiente sistema pasivo tipo ático, denominado "tapanco", consistente en una cámara de aire inerte que funciona como amortiguador térmico. Se evaluó un caso aplicando metodologías de medición con termo-higrómetros, complementando con termografía y simulación termo-eólica. Los hallazgos de índices higrométricos adecuados, propiciados por el sistema, lo convierten en alternativa relevante de solución pasiva en el diseño arquitectónico bioclimático futuro, para abatir los índices energéticos y climáticos adversos.

Palabras clave

arquitectura vernácula, arquitectura bioclimática, calentamiento global, eficiencia energética.

ABSTRACT

Today, the climatic consequences caused by greenhouse gas (GHG) emissions are evident and are on track to see global warming of 2.7 °C by the end of the century. The energy dependence of buildings is one of the main causes, since they required 50% of global energy consumption in 2021 just for heating, making it necessary to implement passive bioclimatic air conditioning systems. This work documents the use in vernacular dwellings in Queretaro, Mexico, of an efficient attic-type passive system, called "tapanco", consisting of an inert air chamber that functions as a thermal buffer. A case was evaluated by applying measurement methodologies with thermo-hygrometers, complemented with thermography and thermo-wind simulation. The findings of adequate hygrometric indices, fostered by the system, make it a relevant alternative for a passive solution in future bioclimatic architectural design, to reduce adverse energy and climatic indices.

Keywords

vernacular architecture, bioclimatic architecture, global warming, energy efficiency.

RESUMO

Hoje, as consequências climáticas das emissões de gases de efeito estufa (GEE) são evidentes e estamos a caminho de atingir 2,7°C de aquecimento global até 2100. A dependência energética das edificações é uma das principais causas, pois elas representaram 50% do consumo global de energia apenas para aquecimento em 2021, tornando-se necessário implementar sistemas passivos bioclimáticos de climatização. Este trabalho documenta a utilização de um eficiente sistema passivo tipo sótão, chamado "tapanco", em moradias tradicionais de Querétaro, México. O sistema consiste em uma câmara de ar inerte que atua como amortecedor térmico. Foi avaliado um caso utilizando metodologias de medição com termo-higrômetros, complementadas por termografia e simulação termo-eólica. Os resultados dos índices higrométricos adequados proporcionados pelo sistema fazem dele uma solução passiva alternativa relevante como solução passiva no futuro projeto arquitetônico bioclimático, visando reduzir os índices energéticos e climáticos adversos.

Palavras-chave

arquitetura tradicional, arquitetura bioclimática, aquecimento global, eficiência energética.

INTRODUCCIÓN

Los graves efectos climáticos actuales pueden aminorarse significativamente abatiendo las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (en adelante, GEI), las que, debido a la dependencia energética humana, son causantes del calentamiento global, el cual debiera mantenerse en 1.5 °C para evitar la debacle climática hacia el año 2100 (United Nations Environment Programme, 2021).

En su ciclo de vida, muchas edificaciones han sido altamente demandantes de energía y poco funcionales térmicamente. Esto se debe principalmente a las pésimas propiedades térmicas de sus materiales y por un diseño arquitectónico y aislamiento inadecuados. La causa de ello es que la construcción está normalizada globalmente, sin considerar los climas locales ni las implicaciones energéticas (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022). Lo anterior conlleva a que la climatización electro-mecánica sea la solución más buscada por el sector residencial, representando el mayor consumo energético (Aguilera et al., 2018). Un dato a destacar es que, en 2021, solo la calefacción representó el 50% del consumo de energía global (Global Crisis Response Group, 2022). En la actualidad, es precisamente la eficiencia energética de los edificios el principal problema a resolver en este sector, debido a que la climatización interior es el factor que representa el mayor consumo de energía en el mundo. De ahí que plantear una propuesta de solución mediante el uso de un sistema bioclimático pasivo es el tema central de este estudio.

Si queremos llegar a una meta en la que la eficiencia energética sea el principio fundamental que rijan la construcción de edificaciones residenciales, esta debería llevarse a cabo mediante formas de construir que eviten la climatización mecánica. Esto se puede lograr por medio de diseños mejorados que consideren el clima local. Del mismo modo, es necesario proponer el uso de materiales de baja energía embebida, al igual que incluir estrategias bioclimáticas pasivas y soluciones basadas en la naturaleza que permitan adaptar los edificios al clima futuro. La implementación de estas propuestas tiene por objetivo producir la disminución de los requerimientos energéticos (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022), a la vez que permita el confort y garantice el bienestar humano.

Por otro lado, es evidente que los paradigmas arquitectónicos actuales se encuentran obsoletos y, por lo mismo, deben ser cuestionados a fin de hacer un giro hacia otro tipo de soluciones ya probadas, como son las arquitecturas vernáculas. Estas, basadas en el conocimiento ancestral producto de siglos de observación y experimentación, históricamente han demostrado eficiencia en su adaptabilidad física, a través de la utilización de materiales naturales y estrategias bioclimáticas, lo cual representa una poderosa alternativa para la eficiencia energética (en adelante, EE).

Las viviendas vernáculas utilizan estrategias pasivas para garantizar el confort higrotérmico con casi nula demanda energética, pues no recurren a sistemas electro-mecánicos, aun cuando carecen de electricidad. Se construyen bajo escasez y meticulosa gestión de recursos, representando un patrimonio ambiental sostenible al servicio de la edificación actual. Los países en vías de desarrollo conservan muestras de estos hábitats que pueden representar sistemas modelo de adaptabilidad (Rapoport, 2003).

En Querétaro, se han documentado construcciones vernáculas en diversas regiones climáticas (Figura 1), las que utilizan el sistema bioclimático pasivo denominado "tapanco", que consiste en una cámara de aire inerte que funciona como amortiguador termo-acústico, propiciando condiciones higrotérmicas interiores adecuadas, en climas diversos.

De esta manera, el objetivo de investigación de este trabajo consiste en documentar el uso en las viviendas vernáculas de Querétaro del sistema pasivo bioclimático denominado tapanco y evaluar su eficiencia higrotérmica mediante el análisis de un caso ubicado en una zona climática templada extrema, utilizando para ello metodologías de medición de parámetros internos-externos. Se realizaron primeramente mediciones con higrómetros; en segundo término se llevó a cabo un análisis con fotografías termográficas y finalmente se desarrolló un modelaje y simulación termo-eólica. Se parte de la hipótesis de asociar el confort interno con la regulación térmica y humedad relativa, extrapolando el desempeño térmico a condiciones extremas mediante simulación en función del diseño y los materiales.



Figura 1. Vivienda vernácula rural y urbana de Querétaro. Fuente: Elaboración de los autores.

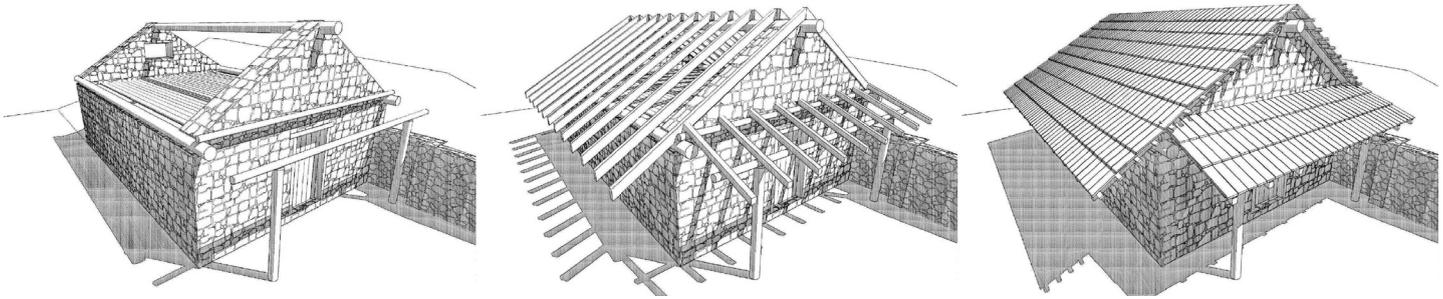


Figura 2. Estructuración tapanco de madera y tejamanil. Fuente: Elaboración de los autores.

Los resultados permiten verificar la idoneidad del tapanco para producir confort higrométrico interior, considerándolo como alternativa de diseño para modelos arquitectónicos que sean térmica y energéticamente eficientes. Una vez trasladado científicamente este conocimiento a los requerimientos arquitectónicos actuales, resultará muy útil para enfrentar los climas futuros.

No es objeto del presente estudio precisar los índices de disminución del gasto energético con el uso del sistema. Sin embargo, podemos afirmar que, de acuerdo con los trabajos de Martín-Consuegra et al. (2014) y Suárez et al. (2018), que tanto la implementación de estrategias bioclimáticas pasivas, como los desvanes inhabitables o “techos frescos ventilados”, principalmente en cubiertas inclinadas, inciden significativamente en la mejora de la EE.

ANTECEDENTES

El tapanco vernáculo en Querétaro.

El ático es una estrategia bioclimática pasiva utilizada por siglos, la cual consiste en una cámara de aislamiento térmico. En la arquitectura vernácula queretana se ha utilizado un elemento similar, el «tapanco», cuya denominación proviene del náhuatl «tapantli» (techo) y el sufijo “co” (en), y que es un tipo de desván usado para almacenar objetos y secar semillas o plantas, que consiste en la división en altura de una habitación mediante un tablado horizontal, conformando un entrepiso que no tiene función habitable, a diferencia del ático (Figura 2).

Este entrepiso funciona como amortiguador termo-acústico al optimizar los valores de transmitancia térmica del techo, “retardando” el paso de la temperatura exterior, con tiempo suficiente para mantener el interior estable hasta el reinicio del ciclo térmico, aminorando también los ruidos por lluvia o granizo. Resulta útil en clima templado o cálido, utilizándose una ventila en el tímpano para remover el aire inerte. En Querétaro se han documentado quince sitios con evidencias de este elemento, en regiones climáticas diversas, destacando la localidad de clima templado extremo, el Ejido “La Barranca” en el municipio de Pinal de

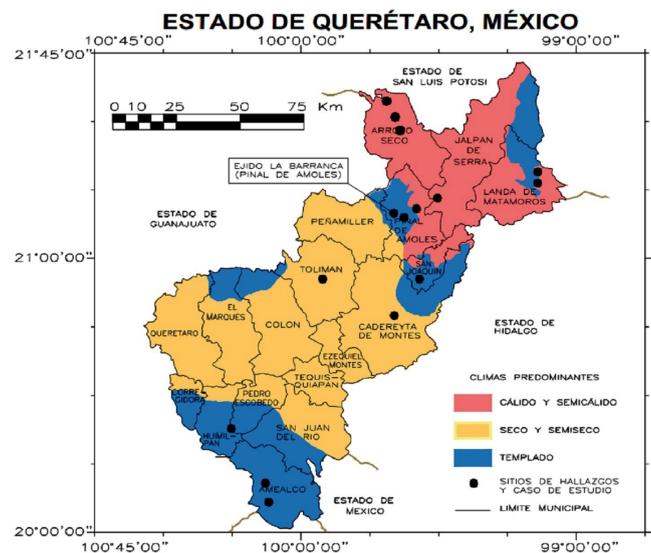


Figura 3. División política y climática de Querétaro. Ubicación de sitios con hallazgos y caso de estudio. Fuente: Elaboración de los autores con datos de INEGI, 2017.

Amoles, en donde se realizaron las mediciones (Figura 3).

La conformación arquitectónica del tapanco vernáculo rural cubre la crujía totalmente, basándose en una estructura tipo armadura y puntales, elaborada con pequeñas vigas, barros y morillos, y está recubierta con pequeñas tejas de madera denominadas “tejamanil”, las cuales son de origen local y están elaboradas manualmente (Figura 4).

En las viviendas tradicionales de zonas más urbanas existen grandes tapancos (Figura 5) que utilizan también estructura tipo armadura de mayor envergadura, recubierta con tejado de barro, las que descansan sobre muros de calicanto de una vara de espesor (80 cm).

Estas construcciones vernáculas presentan otras estrategias pasivas que coadyuvan para su eficiencia térmica, las que no son tema de análisis del presente estudio, pero es interesante mencionar, tales como: la sabia combinación de materiales locales con buena inercia térmica; la utilización de “muros térmicos” semienterrados; la orientación



Figura 4. Tapancos en áreas rurales de Querétaro. Fuente: Elaboración de los autores.



Figura 5. Tapancos en áreas urbanas de Querétaro. Fuente: Elaboración de los autores.

franca oriente-poniente de las crujías; el aprovechamiento de la vegetación endémica para aminorar asoleamiento y humidificar, etc.

Debido a la descomposición de la vivienda vernácula para dar paso a nuevas formas de habitar con nociones actuales de "evolución" (Juárez, 2022), en Querétaro el tapanco ha caído en desuso casi totalmente, derruyéndose incluso lo existente, debido a la ignorancia sobre sus beneficios higrotérmicos y al dar entrada a los materiales industriales, siendo inaplazable la documentación sobre esta estrategia.

ESTADO DEL ARTE

La grave problemática ambiental actual ha obligado a establecer políticas de EE en muchos países, relativas a mediciones y certificaciones energéticas como herramientas para minimizar los consumos energéticos y las emisiones de GEI (Fernandez et al., 2020). Esta políticas han establecido requisitos mínimos para envolventes y sistemas mecánicos para confort térmico. Existen muchas normas energéticas, sin embargo, estas no son aplicadas en todos los países, por lo que muchas construcciones las toman como base, de manera "voluntaria". Más del 80% de las iniciativas planteadas a nivel global consisten en métodos centrados solamente en la relación demanda-consumo y no en la EE (Reus-Netto et al., 2019).

Disminuir el consumo energético sin afectar el confort requiere la implementación de sistemas arquitectónicos

bioclimáticos, principalmente en edificios residenciales (Manzano et al., 2015, citado en Fernandez et al., 2020), los cuales deben ser evaluados y monitoreados higrotérmicamente. La Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas difunde principios de arquitectura bioclimática, eficiencia energética y uso de materiales de bajo impacto para lograr estas metas.

Existen trabajos relacionados con evaluación energética, requerimientos de aislamiento, implementación de estrategias pasivas y su relevancia en la EE, como los desarrollados por Aguilera et al. (2018), Mercado et al. (2018), Reus-Netto et al. (2019) y Fernandez et al. (2020). Especialmente hacemos referencia a estudios de Martín-Consuegra et al. (2014), Suárez et al. (2018) y Calderon (2019), relativos al análisis de la eficiencia térmica y energética de cámaras de aire en techos.

Respecto de la sostenibilidad, funcionalidad térmica y uso de estrategias pasivas en la vivienda vernácula, existen estudios como los de Herrera y Medina (2018), Mandrini (2022) y Juárez (2022). También los trabajos de Mercado et al. (2018), Ganem-Karlen (2018) y Alamino y Kuchen (2021) refieren sobre la importancia de las herramientas de simulación termo-energética, la termografía infrarroja y otras, como instrumentos para la evaluación higrotérmica. En Querétaro, prácticamente no se han desarrollado estudios técnico-arquitectónicos de vivienda vernácula bajo metodologías científicas, sino que han desarrollado mayormente investigaciones serias con enfoque

antropológico, las que ayudan a comprender el fenómeno de los entornos vernaculares.

MARCO TEÓRICO

VIVIENDA VERNÁCULA, SOSTENIBILIDAD Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

La arquitectura vernácula, cuyo comportamiento térmico se logra sin recurrir a sistemas electro-mecánicos y casi nula demanda energética, aporta en lo ambiental, lo económico y la calidad de vida, acorde con una sostenibilidad integral (Mandrini, 2022). Esta manera de edificar nace desde un conocimiento ancestral y cúmulo de experiencias de adaptabilidad climática, con referentes empíricos sostenibles como: conservación del conocimiento; uso de materiales locales; participación comunitaria; diversidad de soluciones (Lárraga et al., 2014). Surge en los pueblos autóctonos como respuesta a sus necesidades de habitar aprovechando su entorno y clima local, logrando autosuficiencia y confort. Los recursos y tecnologías limitados le permitieron lograr soluciones eficientes, armonizando el vínculo trabajo-vida familiar en interacción con el medio (Juárez, 2022).

Estos entornos vernáculos son pequeños hábitats racionalmente ecológicos y agrícolas, casi autosuficientes en la producción, manejo y consumo de recursos, que contribuyen a la identidad y valores socioculturales comunitarios, desempeñando así un importante papel en la economía, sociedad y manejo ambiental (Herrera & Medina, 2018). Las edificaciones que los conforman son energéticamente eficientes en todo su ciclo de vida, con casi nula demanda en la extracción, producción y traslado de materiales locales, naturales y con excelentes propiedades térmicas. En su demolición, estas construcciones se reintegran totalmente al medio natural o se reciclan. Además, utilizan estrategias bioclimáticas que no requieren electricidad para climatizar ni para iluminar y cuentan con pocos equipos eléctricos.

CONFORT, ESTRATEGIAS BIOCLIMÁTICAS PASIVAS Y EVALUACIÓN HIGROTÉRMICA

El confort es condición fundamental del hábitat y la sostenibilidad arquitectónica, ya que responde a la necesidad de cobijo. Incorporar soluciones constructivas sostenibles propicia el confort térmico interior con pocas implicaciones energéticas, siendo pertinente analizar modos de vida tradicionales que busquen soluciones bioclimáticas (Calderon, 2019).

El confort térmico no solo depende de parámetros ambientales, sino que también de otros elementos del entorno y de la percepción del sujeto, además de aspectos socioculturales (Mandrini, 2022). El comportamiento de los usuarios, al interactuar con los sistemas electro-mecánicos,

impacta en el rendimiento de los edificios, afectando el uso de la energía (Mercado et al., 2018). La sensación física de los sujetos influye en su bienestar, su eficiencia y su confort. Con variación continua del ambiente, ellos toman acciones conscientes o inconscientes para recuperar el equilibrio térmico y estar confortables (Rincón-Martínez et al., 2022), acudiendo a sistemas mecánicos que implican altos consumos energéticos, variables en función del clima y la envolvente (Reus-Netto et al., 2019).

Las estrategias pasivas incorporadas al diseño arquitectónico (en adelante, EPDA) contribuyen a la eficiencia energética y adecuan el edificio a las condiciones ambientales, mejorando el confort higrotérmico y reduciendo la demanda energética. La ponderación de dichas estrategias depende del clima local, pudiendo recurrir a diversas soluciones, tales como: el aislamiento térmico de techos, muros y pisos; colores externos; sombreado y proporción de ventanas; sistemas solares pasivos; alturas y nivel de hermeticidad entre otras. Estas se implementan para reducir la demanda energética, existiendo estudios que lo demuestran (Aguilera et al., 2018; Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017, p. 2; Martín-Consuegra et al., 2014; Mercado et al., 2018; citados en Fernandez et al., 2020).

Las medidas para EE en edificios incluyen: normativa, monitoreo y evaluación, considerando nuevos edificios, edificios energéticamente eficientes y edificios existentes (Schneider, 2015, citado en Ganem-Karlen, 2018). Asimismo, requieren técnicas confiables y rápidas de diagnóstico. Antes de edificar, es recomendable realizar una simulación térmica que emule las condiciones de confort, de acuerdo con materiales y clima, teniendo en cuenta, para la humedad relativa (HR), la siguiente relación para climas no extremos: a temperaturas altas, humedades relativas bajas y viceversa, (Ceja, 2012).

En la arquitectura vernácula, las formas se dan en respuesta al efecto combinado entre la temperatura, la humedad y el aire (Atmaca & Gedik, 2019; Bassoud et al., 2021; Chang et al., 2021; Manavvi & Rajasekar, 2020; 2021; Yan et al., 2020; Zhang et al., 2018; citados en Rincón-Martínez, 2022). La geometría también está condicionada por los materiales y la necesidad de implementar estrategias bioclimáticas pasivas para lograr confort, como se observará en el caso analizado.

METODOLOGÍA

Debido a las pocas evidencias existentes, el caso se seleccionó porque se ubica en una zona de clima templado extremo y por la conservación casi íntegra de materiales, diseño y tapanco. Se incluyen tres tipos de mediciones analíticas: inspección termográfica; medición de parámetros internos-externos utilizando termo-higrómetros; simulación térmica y eólica, con lo cual se busca la complementariedad y realización de una comparativa para obtener resultados más fidedignos.

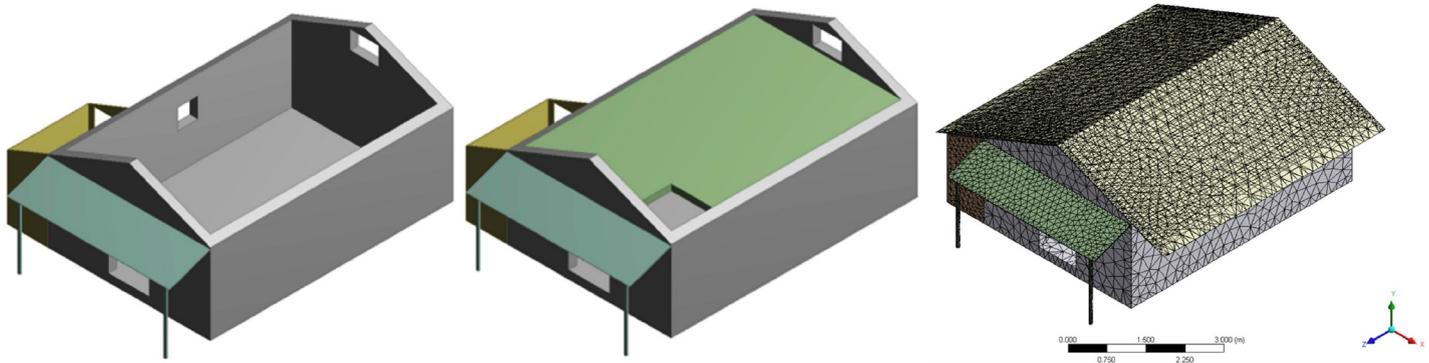


Figura 6. Modelo y mallado para ANSYS. Fuente: Elaboración de los autores.

INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

Se elaboró el mapeo exterior mediante una inspección termográfica, a fin de diferenciar el comportamiento cualitativo de los materiales y contrastarlos con la simulación, a fin de observar variaciones térmicas superficiales e identificar defectos causantes de ellas, como por ejemplo: fallos estructurales, humedades, falta de aislamiento y puentes térmicos. Se tomaron imágenes a distancia de 4 a 5 m, en fecha 5 de noviembre de 2011, alrededor de las 12:00 horas, empleando una cámara *ThermaCAM E45* de *Flir Systems* y el software *QuickReport* de la misma firma. Para desarrollar una termografía cuantitativa que arrojará datos más fidedignos, se introdujo un valor de emisividad de 0.85, que ronda la media presentada por los materiales típicamente empleados en construcción.

MEDICIONES CON TERMO-HIGRÓMETROS

Se realizaron mediciones internas-externas de temperatura y humedad relativa (HR), utilizando termo-higrómetros marca *Thermotracker*, con monitoreo continuo *in situ* durante tres meses, de julio a septiembre, reportando datos cada quince minutos para obtener medias de comportamiento diario. Los sensores internos se instalaron en las siguientes ubicaciones: uno en la media del espacio habitable, entre tapanco y piso, alejado de la ventana; y el otro, en la media espacial del tapanco, entre tablado y techo. Se colocó un sensor externo de referencia a media altura entre el alerón (parte saliente del techo) y el piso, para proteger el dispositivo de la intemperie y la radiación solar directa. Se registraron datos del ciclo trimestral y se interpretaron con el software *Thermotracker Pro*.

SIMULACIONES TERMO-EÓLICAS

Se desarrolló la simulación mediante la técnica de elemento finito con el programa *ANSYS*, para validar la información termográfica obtenida. Se elaboró el modelo en *Solid Works*, considerando los elementos constitutivos: materiales, tapanco, pórtico y ventana. Dicho modelo

se exportó a *Design Geometría* realizando el mallado del volumen de control para el análisis *ANSYS* (figura 6).

Los datos de conductividad térmica introducidos al programa *ANSYS*, correspondientes a los materiales, fueron: 0.28 W/m °C para madera, 0.72 W/m °C para piedra y 60.5 W/m °C para lámina de acero. Los valores de elemento finito se traspolaron a situaciones extremas, con temperatura invernal de 5 °C, veraniega de 50°C y radiación solar de 1,050 W/m², arrojada por la estación meteorológica correspondiente al área de estudio, en fecha y hora elegidas.

Uno de los factores para que exista transferencia calorífica es la convección, la que depende de la velocidad del aire, por lo cual se realizó una simulación eólica en *ANSYS*. Partiendo del modelo térmico, con una mallado CFD, se introdujo una velocidad de 5.8 m/s, que fue la media encontrada.

Resulta relevante señalar, por otro lado, que los usuarios manifestaron enfáticamente que la vivienda es fresca en verano y, principalmente cálida en los inviernos extremos, no requiriendo implementos para confort interior.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS HIGROTÉRMICO DE CASO DE ESTUDIO: EJIDO LA BARRANCA, MUNICIPIO DE PINAL DE AMOLES

Las coordenadas geográficas del Ejido La Barranca son 21° 07' 36.2" N, 99° 41' 08.3" W. Tiene un clima templado subhúmedo con lluvias veraniegas; humedades altas y temperaturas muy bajas (14°C promedio), incluso bajo cero al rondar los 3,000 msnm, siendo una de las localidades más altas del país.

Sus construcciones combinan sabiamente diseño y materiales endémicos, madera y piedra, juntada con arcilla en muros de 55 cm de espesor que soportan la techumbre de armadura a "dos aguas" y el tablado a baja altura (1.85 m). Se conforma así el tapanco de forma triangular con



Figura 7. Crujía evaluada. Exterior e interior habitable y tapanco. Fuente: Elaboración de los autores.

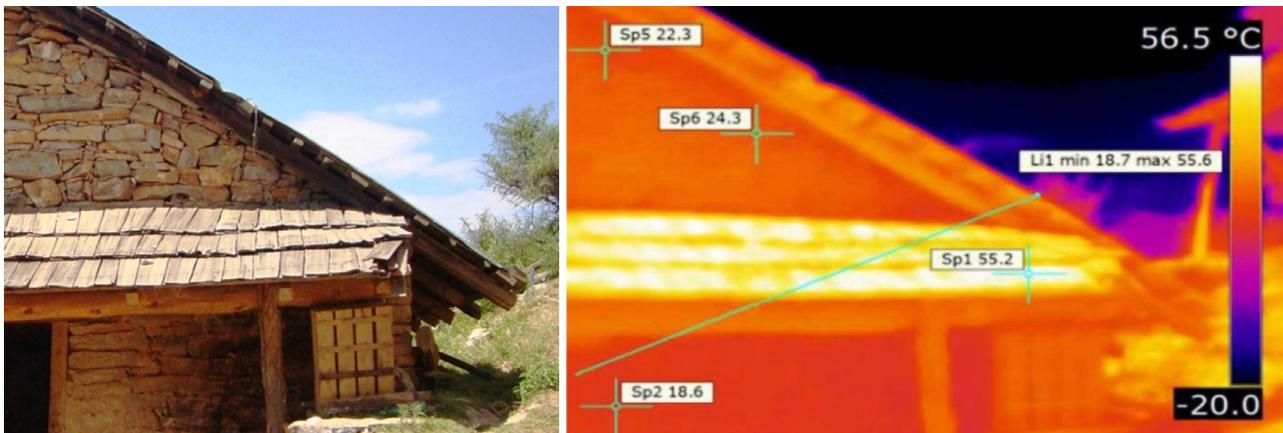


Figura 8. Mapa térmico parte frontal de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

pendiente aproximada del 60%, necesaria para desalojar lluvia y agua-nieve. El techo cubierto originalmente con “tejamanil”, por restricciones forestales y con más de 75 años de vida útil, se ha recubierto con lámina galvanizada, sin que afecte su termicidad. La crujía es multifuncional con dimensiones de 5x7 m (Figura 7).

INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

La figura 8 muestra que el mapa térmico frontal; el punto Sp1, que es el techo del pórtico, registra el valor más alto con 55.2 °C. El tímpano de piedra, correspondiente al punto Sp5, registra 22.3 °C. Por su parte, el punto Sp2, ubicado bajo el pórtico, es el valor más bajo con 18.6 °C. Esto refleja que las condiciones térmicas son adecuadas para ese espacio, el que actúa como amortiguador térmico.

En la figura 9, la techumbre del pórtico, es decir, punto Sp2, presenta 53.6°C, que corresponde al valor más alto. Por otro lado, el valor más bajo es el piso, correspondiente al punto Sp8, con 14.3°C. Finalmente, el punto Sp5, que es la banca de madera expuesta al sol, presenta 41.5°C.

En la figura 10a y figura 10b, se observa el techo exterior. En esta, la cumbrera o punto Sp1 presenta 51.6°C, que es el valor más alto. En el punto Sp4, que corresponde a la estructura de madera, se registran 27.5 °C. En el caso

del muro de piedra sombreado, que es el punto Sp5, se registra una temperatura de 12.7 °C, la cual es el valor más bajo, con lo que se comprueba la eficiencia térmica de los alerones. Lo descrito anteriormente se hace más notorio en la figura 10c que muestra la diferencia térmica entre la parte soleada del tímpano y la sombreada por el alerón.

La figura 11 corresponde al techo interior visto desde el tapanco. La temperatura más alta de 40.8°C corresponde a un hueco (puente térmico). Los largueros, Sp2, registran 27.4°C; una viga, Sp5, tiene 22.9°C; el muro de piedra registra la mínima de 14.7°C.

MEDICIÓN DE PARÁMETROS INTERNOS CON HIGRÓMETROS

En la figura 12 se aprecia en color negro el comportamiento interno de la crujía, que mantuvo una temperatura entre 13 y 16°C. Por su parte, en gris, se observa el comportamiento externo que presentó entre 8 y 24°C. La línea punteada indica el comportamiento del tapanco con temperaturas máximas de 30°C y mínimas de 7.5°C, demostrando que funciona como isla de calor al mantener temperaturas estables debajo de este elemento, es decir, como amortiguador térmico. El interior presentó entre 45 y

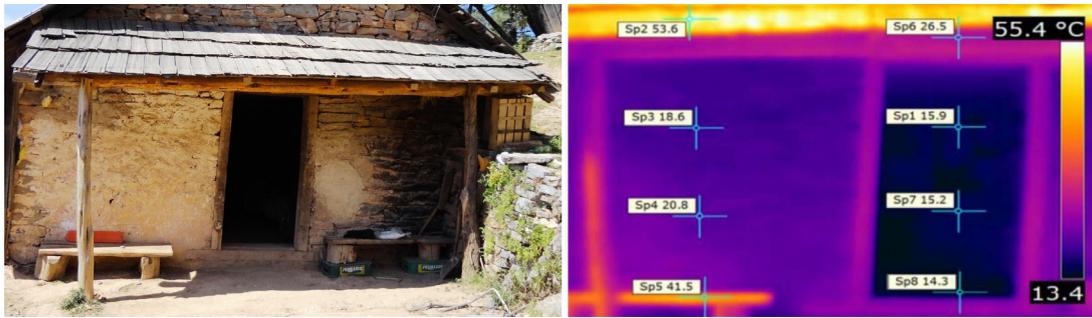


Figura 9. Mapa térmico pórtico de acceso de la vivienda. Fuente: Elaboración de los autores.

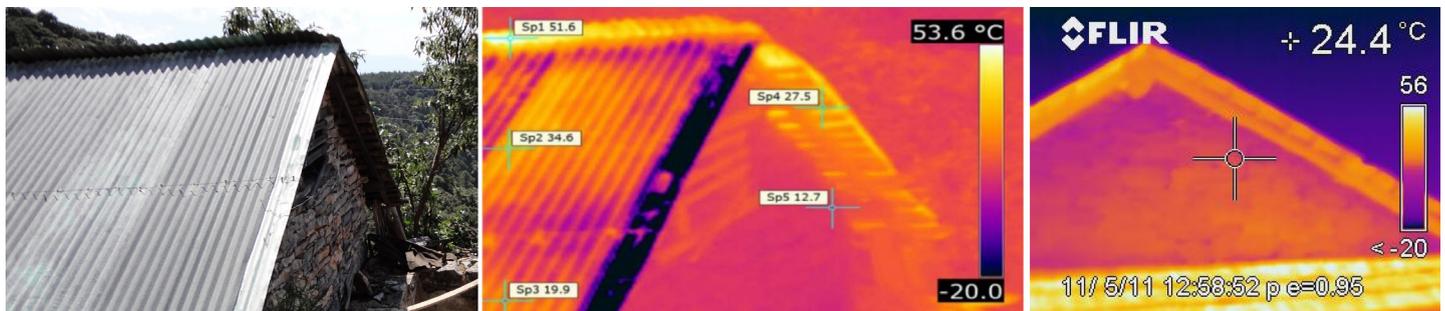


Figura 10. Mapa térmico techo exterior de la vivienda y frontón. Fuente: Elaboración de los autores.

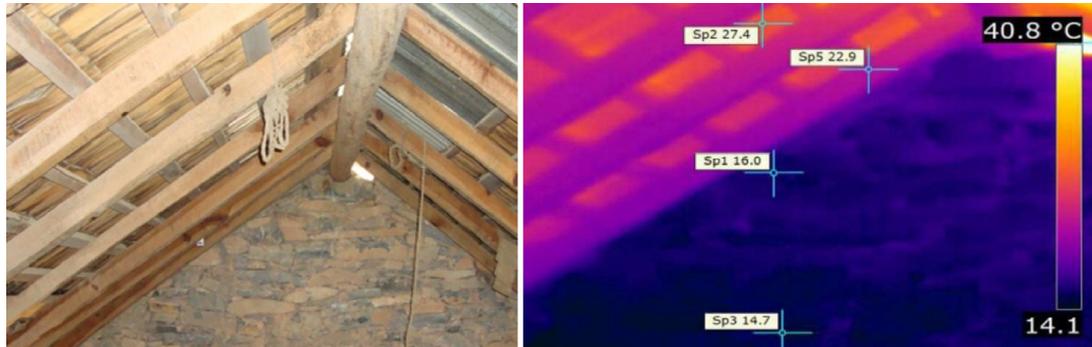


Figura 11. Mapa térmico interior del tapanco. Fuente: Elaboración de los autores.

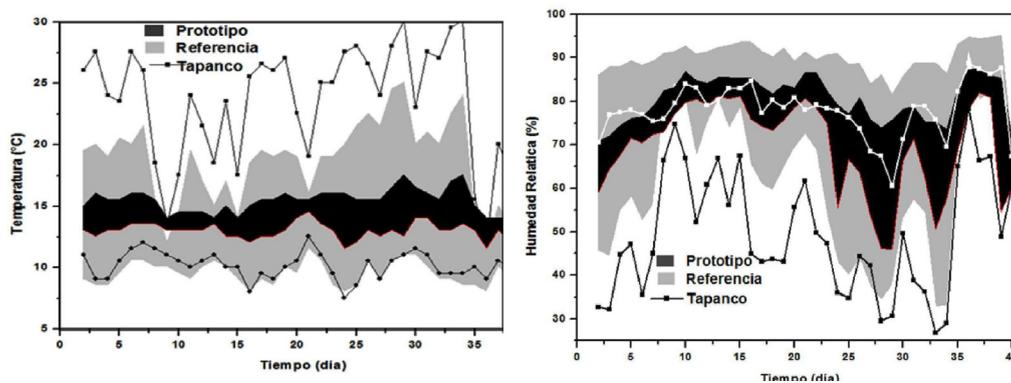


Figura 12. Comportamiento higrotérmico interior. Fuente: Elaboración de los autores.

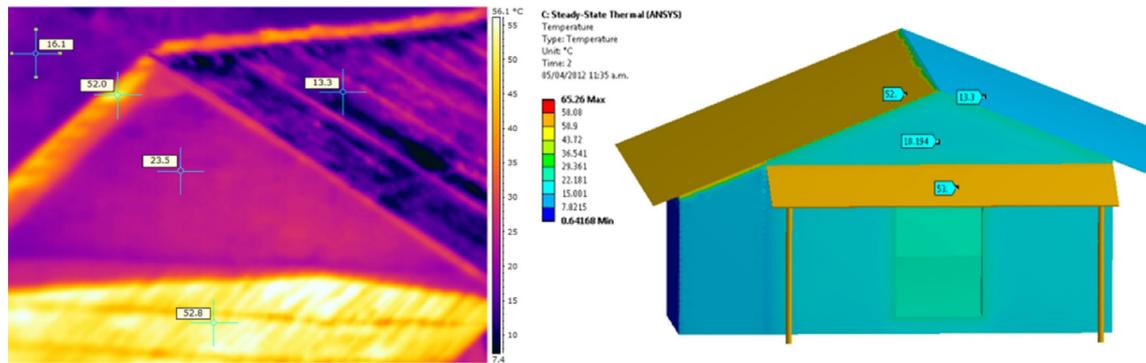


Figura 13. Comparativa termografía y simulación ANSYS exterior. Fuente: Elaboración de los autores.

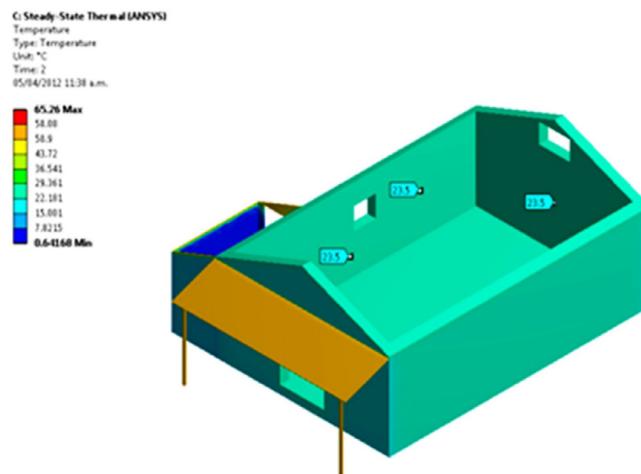


Figura 14. Simulación comportamiento térmico interior. Fuente: Elaboración de los autores.

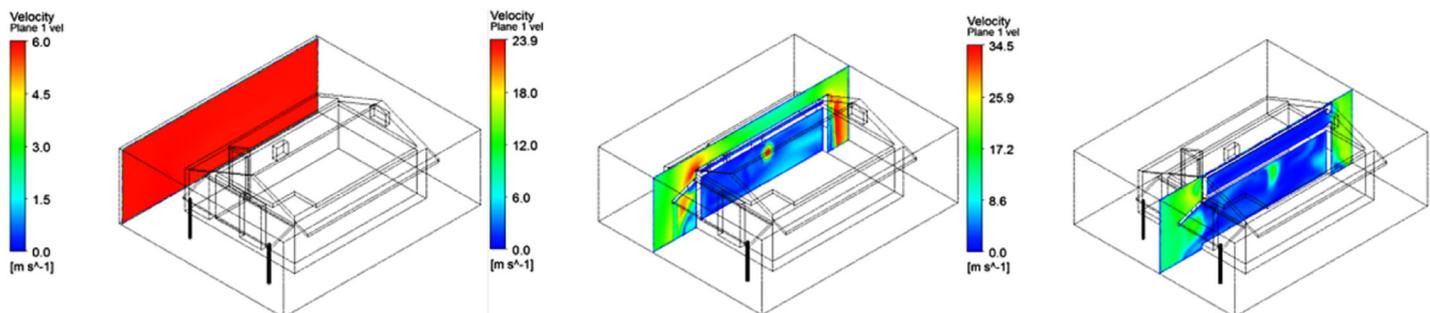


Figura 15. Simulación comportamiento velocidad del aire. Fuente: Elaboración de los autores.

85% de HR, mientras que, al mismo tiempo, el dispositivo externo registró entre 30 y 95% de HR. De acuerdo con estos datos, se observa que el tapanco muestra un dato esperado: HR baja al concentrar calor, pues, con excepción de climas tropicales, estas variables juegan un rol inversamente proporcional.

SIMULACIÓN TÉRMICA Y EÓLICA DE ELEMENTO FINITO.

Hecha la traspolación a situaciones extremas, los resultados en ANSYS muestran concordancia con los de la termografía

(figura 13), pues ambas técnicas presentan temperaturas exteriores similares: sobre 52°C en las cubiertas soleadas, 13°C en las sombreadas y de 18-23°C en el tímpano sombreado.

Las mediciones interiores, que resultan de la técnica de elemento finito, arrojaron una temperatura de 22.5°C ± 7.3°C, considerada de confort (figura 14) y semejante a la del análisis con termo-higrómetros.

La simulación eólica, mostrada en la figura 15, demuestra que cuando se tiene la máxima velocidad exterior, la

interior es baja, considerándose un resultado preliminar relativo a la hermeticidad de la construcción. Este resultado convendrá verificarlo posteriormente mediante análisis más minuciosos.

El aire es direccionado por los costados y por la parte superior de la casa como se muestra en el "streamline" de la figura 16.

CONCLUSIÓN

La termografía permitió observar el comportamiento térmico de los materiales y elementos con los que está realizada la vivienda. La madera y la piedra conservan bajas temperaturas, entre 12 y 16°C, mientras que la techumbre presenta índices superiores a 50°C. Se identificó también el comportamiento de otros elementos no planteados como objetos del estudio como los alerones, los que, si bien se utilizan para desalojo pluvial, cumplen también una función térmica, ya que cubren de la radiación gran parte de los muros manteniéndolos a temperatura baja que será proyectada al interior (Figura 8 y Figura 10).

Otro elemento térmico es el pórtico, que mantiene bajo de sí temperaturas menores a 20°C cuando su techumbre presenta valores sobre 50°C. Este conforma un espacio confortable dado que amortigua la radiación directa sobre la puerta, la cual, a su vez, actúa como puente térmico (Figura 9). La orientación franca O-P de la crujía combinada con el techo inclinado mantienen sin asolear la mitad del mismo, con temperaturas que rondan los 30°C, mientras que la expuesta presenta valores mayores a 50°C (Figura 10), verificando la conveniencia de utilizar esta geometría.

La aplicación de las tres técnicas de medición (inspección termográfica, mediciones termo-higrómetricas y simulación termo-eólica) permitió tener una visión más amplia del comportamiento del prototipo, concluyendo que la integralidad diseño-materiales-tapanco contribuye significativamente al confort interior. La comparativa de resultados refleja una buena concordancia entre los índices higrométricos de las técnicas, al arrojar promedios en el área habitable de 20°C de temperatura y 65% de HR.

Consideramos comprobada entonces la hipótesis planteada, en tanto que el tapanco indiscutiblemente representa el principal elemento de diseño bioclimático pasivo en el caso analizado, debido a que regula significativamente los factores higrotérmicos y, dados los índices obtenidos en este estudio, propicia condiciones idóneas para el confort humano, en coincidencia con los parámetros respectivos señalados por Olgyay (1998). De hecho, hay condiciones de confort incluso en situaciones extremas como a las que ha sido sometido el modelo en la simulación y que llegan a presentarse en el sitio. Comparativamente, las construcciones industrializadas difícilmente presentan estas condiciones confortables

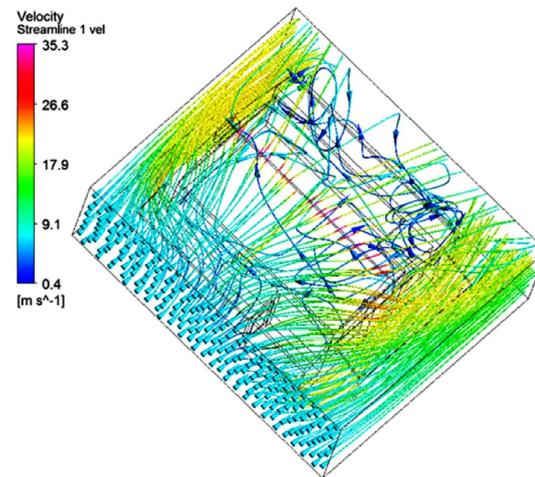


Figura 16. Streamline del viento. Fuente: Elaboración de los autores.

y saludables por el inadecuado índice térmico de los materiales, junto con un diseño que no considera el clima local ni aísla la envolvente, por lo cual se hace necesario el uso de climatización mecánica, lo que implica alta demanda energética y de emisiones de GEI (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022).

Por su parte, la simulación eólica permitió obtener hallazgos preliminares de hermeticidad de la crujía, lo cual se debe a un diseño aerodinámico que desvía el impacto directo del viento (Figura 16), así como por los materiales y el junteo de la piedra con arcilla. Sin embargo, consideramos que este fenómeno deberá estudiarse a mayor profundidad en investigaciones posteriores.

En conclusión, creemos que es imprescindible considerar en el diseño arquitectónico las propiedades y comportamiento de los materiales, el asoleamiento y la implementación de estrategias bioclimáticas pasivas, ya que son elementos fundamentales que influyen en las condiciones de confort higrotérmico. Asimismo, se hace necesario realizar en lo posible simulaciones higrotérmicas previas que consideren las condiciones particulares de cada proyecto. Todas las variables anteriores, al ser analizadas de manera científica, permitirán lograr la calidad ambiental interior que ejerce influencia sobre la salud, actitudes y rendimiento humanos, permitiendo comprender también los problemas del diseño espacial (Alamino & Kuchen, 2021).

El análisis del tapanco y otras estrategias bioclimáticas de la arquitectura vernácula, así como su sostenibilidad, son temas ineludibles en la investigación. Bajo planteamientos científicos, representa una base teórica muy práctica para replantear paradigmas y modelos conceptuales de la arquitectura presente y futura, la que debe ser eminentemente pasiva y coadyuvante a la EE.

Resulta impostergable el análisis profundo y científico de estas manifestaciones vernaculares que son fuente de

conocimiento arquitectónico milenario y que hoy significan una solución si no única, muy eficiente y pertinente, a la luz de los resultados obtenidos en el presente trabajo. Consideramos que este tema, con premura, debe promoverse ya como una línea de investigación sistemática y constante en la Academia, debido a la rápida extinción de muchas de estas muestras vivas de conocimiento ancestral.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilera, P., Viñas, C., Rodríguez, A. & Varela, S. (2018). Análisis de la influencia, en la demanda de climatización, de estrategias pasivas en viviendas con grandes superficies acristaladas, mediante un código de simulación. La casa Farnsworth. *Anales de Edificación*, 4(3), 34-43 DOI: <https://doi.org/10.20868/ade.2018.3798>

Alamino Naranjo, Y. & Kuchen, E. (2021). Indicadores para evaluar el rendimiento de usuarios de oficina en clima templado cálido. *Informes de la Construcción*, 73(564), e420. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.83476>

Calderon, F. (2019). Evaluación del mejoramiento del confort térmico con la incorporación de materiales sostenibles en viviendas de autoconstrucción en Bogotá, Colombia. *Hábitat Sustentable*, 9(2), 30-41. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2019.09.02.03>

Ceja, F. (2012). *Evaluación de prototipos de vivienda sustentable y de bajo costo*. [Tesis de maestría, Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico en Electroquímica de Querétaro (CIDETEQ)].

Fernandez, A., Garzón, B. & Elsinger, D. (2020). Incidencia de las estrategias pasivas de diseño arquitectónico en la etiqueta de eficiencia energética en Argentina. *Hábitat Sustentable*, 10(1), 56-67. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2020.10.01.05>

Ganem-Karlen, C. (2018). Termografía infrarroja para el diagnóstico térmico confiable con alta replicabilidad y bajo costo de viviendas en Mendoza, Argentina. *Hábitat Sustentable*, 8(2), 80-89. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.02.06>

Global Crisis Response Group. (2022). Global impact of war in Ukraine: Energy Crisis. Brief No. 3. Recuperado de: https://unsdg.un.org/sites/default/files/2022-08/GCRG_3rd-Brief_Aug3_2022_.pdf

Herrera Rivas, F. B. & Medina Márquez, M. G. (2018). La cultura, continuidad y transmisión. Del territorio a la vivienda vernácula. En: *DINÁMICAS URBANAS Y PERSPECTIVAS REGIONALES DE LOS ESTUDIOS CULTURALES Y DE GÉNERO*. Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Investigaciones Económicas, México. Recuperado de: <http://ru.iiec.unam.mx/4417/1/3-101-Herrera-Medina.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Querétaro 2017*. Recuperado de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/

[anuarios_2017/702825092108.pdf](#)

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022. Mitigation of Climate Change*. Recuperado de: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/downloads/report/IPCC_AR6_WGIII_FullReport.pdf

Juárez, J. (2022). De la vivienda tradicional, a la vivienda popular rural en el centro occidente del estado de Puebla, México. *Revista INVI*, 37(106), 262-283. DOI: <https://doi.org/10.5354/0718-8358.2022.66515>

Lárraga, R., Aguilar, M., Reyes, H. & Fortanelli, J. (2014). La sostenibilidad de la vivienda tradicional: una revisión del estado de la cuestión en el mundo. *Revista de Arquitectura*, 16(1), 126-133. DOI: <https://doi.org/10.14718/RevArq.2014.16.14>

Mandrini, M. (2022). Sustentabilidad, confort térmico y arquitectura vernácula en políticas habitacionales rurales. Caso noroeste cordobés, Argentina. *AUS [Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad]*, (32), 4-11. DOI: <https://doi.org/10.4206/aus.2022.n32-02>

Martín-Consuegra, F., Oteiza, I., Alonso, C., Cuervo-Vilches, T. & Frutos, B. (2014). Análisis y propuesta de mejoras para la eficiencia energética del edificio principal del Instituto c.c. Eduardo Torroja-CSIC. *Informes de la Construcción*, 66(536), e043. DOI: <https://doi.org/10.3989/ic.14.125>

Mercado, M., Barea-Paci, G., Esteves, A. & Filippín, C. (2018). Efecto de la ventilación natural en el consumo energético de un edificio bioclimático. Análisis y estudio mediante energy plus. *Hábitat Sustentable*, 8(1), 54-67. DOI: <https://doi.org/10.22320/07190700.2018.08.01.05>

Olgay, V. (1998). *Arquitectura y Clima. Manual de Diseño Bioclimático para Arquitectos y Urbanistas*. Gustavo Gili S.A.

Rapoport, A. (2003). *Cultura, Arquitectura y Diseño*. UPC Editions.

Reus-Netto, G., Mercader-Moyano, P. & Czajkowski, J. (2019). Methodological Approach for the Development of a Simplified Residential Building Energy Estimation in Temperate Climate. *Sustainability*, 11(15), 4040. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11154040>

Rincón-Martínez, J. C., García-Gómez, C. & González-Trevizo, M. (2022). Estimación del rango de confort higrotérmico para exteriores en dos bioclimas extremos de México. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 23(02), 1-14. DOI: <https://doi.org/10.22201/ifi.25940732e.2022.23.2.014>

Suárez, R., Escandón, R., López-Pérez, R., Leon-Rodríguez, A., Klein, T. & Silvester, S. (2018). Impact of Climate Change: Environmental Assessment of Passive Solutions in a Single-Family Home in Southern Spain. *Sustainability*, 10(8), 2914. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10082914>

United Nations Environment Programme. (2021). *Emissions Gap Report 2021: The Heat Is On – A World of Climate Promises Not Yet Delivered*. Nairobi. Recuperado de: <https://www.unep.org/es/resources/emissions-gap-report-2021>

VIABILIDAD DEL MODELO DE CONFORT TÉRMICO ADAPTATIVO BAJO CONDICIONES DE CLIMA CÁLIDO SUBHÚMEDO: AHORRO ENERGÉTICO EN REFRIGERACIÓN EN CAMPECHE, MÉXICO

FEASIBILITY OF THE ADAPTIVE THERMAL COMFORT MODEL UNDER WARM SUB-HUMID CLIMATE CONDITIONS: COOLING ENERGY SAVINGS IN CAMPECHE, MEXICO

VIABILIDADE DO MODELO DE CONFORTO TÉRMICO ADAPTATIVO EM CONDIÇÕES DE CLIMA QUENTE SUBÚMIDO: ECONOMIA DE ENERGIA NA REFRIGERAÇÃO EM CAMPECHE, MÉXICO

Oscar May-Tzuc

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-7681-8210>
oscajmay@uacam.mx

Mario Antonio Jiménez-Torres

Departamento de Ingeniería y proyectos, Universidad Internacional Iberoamericana, San Francisco de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0002-8331-1888>
mario.jimenez@unini.edu.mx

Andrea del Rosario Cruz y Cruz

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0001-8861-1276>
andrcruz@uacam.mx

Román Canul-Turriza

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0003-2081-9913>
roacanul@uacam.mx

Juan Edgar Andrade-Durán

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0002-7370-1209>
jeandrad@uacam.mx

Felipe Noh-Pat

Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Campeche, San Francisco de Campeche, México
<https://orcid.org/0000-0003-1981-8323>
felipnoh@uacam.mx



RESUMEN

El enfoque convencional para alcanzar el confort térmico generalmente se centra en modificar la temperatura de consigna en edificios totalmente climatizados. Sin embargo, el enfoque del confort térmico adaptativo es una alternativa que considera la interacción entre los edificios, el clima local y los usuarios para permitir mejoras significativas en el ahorro de energía. El trabajo analiza la viabilidad de implementar estrategias de confort térmico adaptativo, comparando modelos adaptativos basados en la norma ASHRAE 55-2020 y un modelo regional para la tipología climática tropical de México, contrastando los resultados respecto del enfoque estático. Se analizó térmicamente 13 locaciones del Estado de Campeche obteniendo que las estrategias de ventilación son aplicables en todo el Estado y que ambos modelos aseguran mejoras en el consumo de energía. Además, los resultados sugieren que es necesario desarrollar más modelos adaptativos locales para proponer estrategias con mejor potencial de impacto en la región.

Palabras clave

confort térmico adaptativo, clima cálido subhúmedo, ahorro energético

ABSTRACT

The conventional approach to achieve thermal comfort generally focuses on modifying the setpoint temperature in fully air-conditioned buildings. However, the adaptive thermal comfort approach is an alternative that considers the interaction between buildings, the local climate, and the users to allow significant improvements in energy savings. This paper analyzes the feasibility of implementing adaptive thermal comfort strategies, comparing adaptive models based on the ASHRAE 55-2020 Standard and a regional model for the tropical climate typology of Mexico, and contrasting the results with the static approach. Thirteen locations in the State of Campeche were thermally analyzed, seeing that the ventilation strategies are applicable throughout the State and that both models ensure improvements in energy consumption. In addition, the results suggest that it is necessary to develop more local adaptive models to propose strategies with better potential impact in the region.

Keywords

adaptive thermal comfort, hot sub-humid climate, energy savings.

RESUMO

A abordagem convencional para alcançar o conforto térmico geralmente se concentra em modificar a temperatura de referência em edifícios totalmente climatizados. No entanto, a abordagem do conforto térmico adaptativo é uma alternativa que considera a interação entre os edifícios, o clima local e os usuários, a fim de permitir melhorias significativas na economia de energia. Este trabalho analisa a viabilidade de implementar estratégias de conforto térmico adaptativo, comparando modelos adaptativos baseados na norma ASHRAE 55-2020 e um modelo regional para a tipologia climática tropical do México, contrastando os resultados com a abordagem estática. Foram analisados termicamente 13 locais no estado de Campeche, concluindo-se que as estratégias de ventilação são aplicáveis em todo o estado e que ambos os modelos garantem melhorias no consumo de energia. Além disso, os resultados sugerem a necessidade de desenvolver mais modelos adaptativos locais para propor estratégias com maior potencial de impacto na região.

Palavras-chave

conforto térmico adaptativo, clima quente subúmido, economia de energia.

INTRODUCCIÓN

Actualmente, el sector de edificaciones es el segundo mayor consumidor de energía del mundo, abarcando cerca del 40% del consumo energético y generando poco más del 30% de las emisiones globales (Pérez-Fargallo et al., 2020). Una de las principales razones de esto son los altos índices de desconfort térmico al interior de recintos, cuya consecuencia es que 50% de la energía en edificios sea destinado para solventar procesos de climatización de espacios (Jimenez-Torres et al., 2023). Estos patrones se acrecientan en ciudades con climas cálidos o tropicales, las cuales, en la última década, han tenido un aumento constante en su población, propiciando, en consecuencia, una mayor demanda en el uso de aire acondicionado.

Bajo este escenario, la temperatura de consigna en los equipos de aire acondicionado juega un papel importante en el confort térmico y en los altos consumos energéticos. Por un lado, esta temperatura generalmente es colocada a un valor fijo (en ocasiones restringida), lo que produce que no haya una adecuada satisfacción térmica para todos los ocupantes de los recintos. Además, cuanto mayor sea la diferencia entre la temperatura de consigna y la temperatura ambiente, el consumo de energía eléctrica se incrementa. A partir de esta situación, diversos estudios han mostrado que al aumentar la temperatura de consigna o temperatura objetivo es posible reducir el consumo energético hasta un 30%. Incluso en regiones de clima tropical al establecer una temperatura superior a 25.5°C, se han observado reducciones significativas en el uso de la energía (Hoyt et al., 2015). Sin embargo, es importante enfatizar que dichos estudios han sido desarrolladas bajo lo que actualmente se conoce como el enfoque tradicional, basado en el índice de Voto Medio Estimado (PMV, por sus siglas en inglés) y que es también conocido como modelo de balance térmico o modelo estático (Sala et al., 1999), el cual tiene entre sus principales inconvenientes el limitar la interacción de los usuarios con el ambiente.

En la última década ha tomado gran importancia un nuevo enfoque en la búsqueda del confort para los ocupantes denominado confort térmico adaptativo (CTA). Su principal idea es replicar el comportamiento natural del humano, el cual es capaz de adaptarse fisiológica y psicológicamente hasta determinado punto al aumento de temperatura. El modelo adaptativo se basa en diversas investigaciones respecto de las relaciones entre la temperatura aceptable del aire al interior del recinto y la temperatura del aire exterior, estableciendo que la temperatura de confort depende de las condiciones ambientales (Tsolkas et al., 2023). Se han realizado diversos estudios bajo este enfoque con el propósito de analizar el potencial ahorro energético, inclusive considerando escenarios de cambio climático. Salcido et al. (2016) exhibieron un potencial de ahorro entre el 50 – 60% al utilizar el estrategias adaptativas. Otros

investigadores (Sánchez-García et al., 2019; Sánchez-García et al., 2023) han establecido en diversos estudios que, al implementar la estrategia de confort adaptativo, se tienen ahorros en energía superiores al 30% inclusive bajo escenarios de cambio climático.

No obstante, el enfoque adaptativo también ha sido objeto de debate en los últimos años ya que, si bien presenta avances importantes al incorporar variables de adaptación, la formulación del modelo posee sesgos. Entre ellos está la inexactitud para ser implementada en diversas construcciones al ser diseñado con base en datos de edificios de oficina (Yau & Chew, 2012). Además, los modelos de CTA con mayor promoción global carecen de análisis en regiones de climas tropicales, dejando dudas de su viabilidad en locaciones de Latinoamérica (Rodríguez & D'Alessandro, 2019). Esto ha dado pauta al cuestionamiento de si estos modelos pueden llegar a promover un uso más intensivo de la energía en lugar de aminorarlo, siendo una de las alternativas más recomendadas el desarrollo de modelos adaptativos locales que se ajusten a las necesidades de la población donde se desea impactar.

Por lo tanto, el presente trabajo aborda la posibilidad de reducir la demanda en uso de equipos de aire acondicionado para comunidades con clima cálido-húmedo, situadas en el sur de México, a partir del enfoque de confort adaptativo. El caso de México es interesante debido a que el sector residencial es de los principales consumidores de energía, destinando más del 20% en procesos de climatización (SENER, 2021). Además, las locaciones donde predomina el clima cálido-húmedo representan el 30% de las viviendas del país y los registros indican que en ella se duplica los requerimientos energéticos, por lo que el análisis y búsqueda de técnicas de eficiencia energética es imperativo.

El trabajo toma como caso de estudio el Estado de Campeche, México. Se analiza la implementación del modelo de CTA promovido por la normativa ASHRAE 55-2020 (ASHRAE, 2020) y un modelo regional ajustado para el clima tropical de México (Oropeza-Perez et al., 2017).

CARACTERÍSTICAS DE LA REGION DE CAMPECHE

El Estado de Campeche, México, corresponde a uno de los tres Estados del país ubicados en la región peninsular sureste. Colinda al norte con el Golfo de México, al este con Quintana Roo, Yucatán y Belice; al oeste con Tabasco y al Sur con Guatemala. Su extensión territorial es de 57,484.9 km² con una población de poco menos de 1 millón de habitantes distribuida entre 13 municipios (Figura 1). El 99.95% del territorio presenta un clima cálido húmedo con lluvias en verano. En la cuestión energética, está catalogado entre los Estados con tarifa eléctrica correspondiente a temperaturas entre 30°C y 31°C durante el verano. No obstante, los últimos registros de estaciones meteorológicas indican que

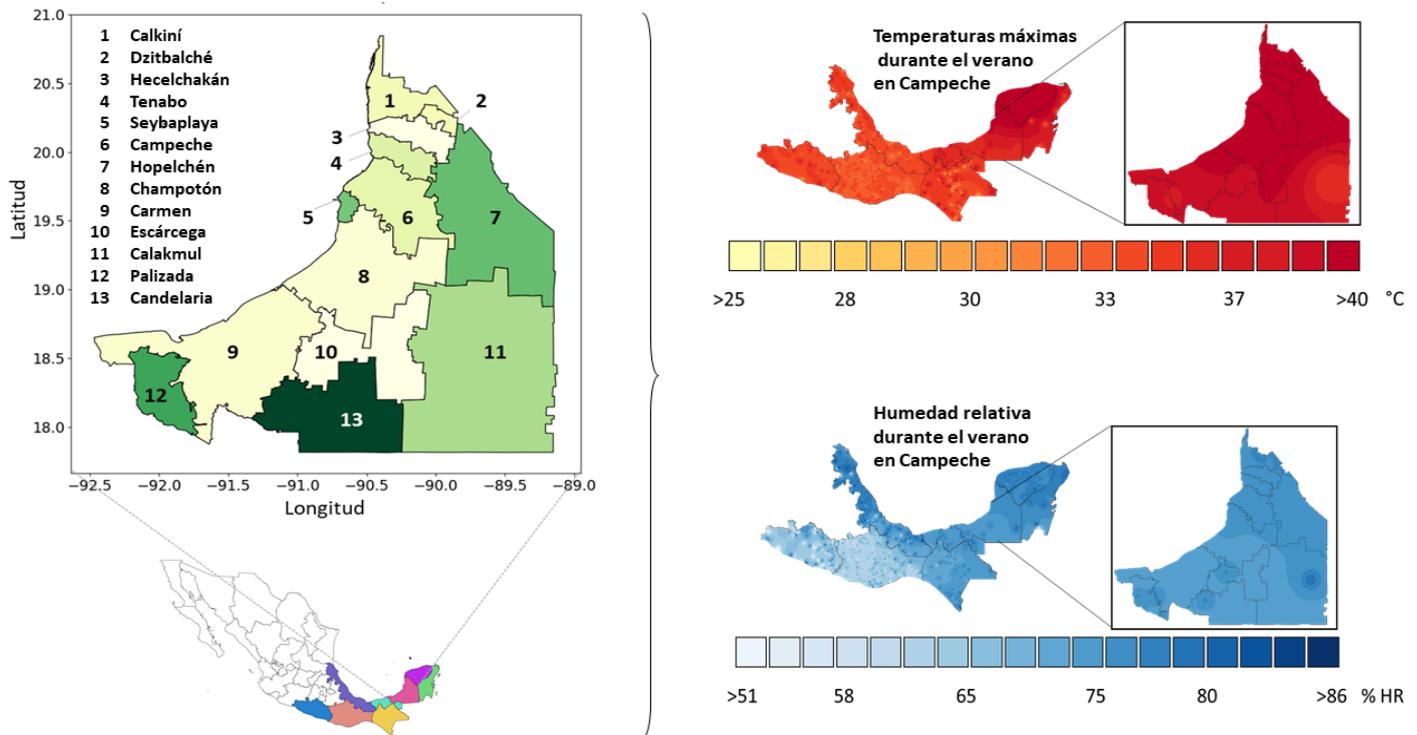


Figura 1. Distribución geográfica y características climáticas del Estado de Campeche, México. Fuente: Elaboración de los autores

las temperaturas al interior del Estado supera los 37°C (INEGI, 2022), propiciando un alto consumo eléctrico para la satisfacer la necesidad del confort térmico en las viviendas. Lo anterior es un indicativo de que esta región puede ser potencialmente beneficiada tanto en ahorro de energía como en confort térmico al aplicar un enfoque adaptativo.

METODOLOGÍA

El estudio se dividió en tres etapas: (i) obtención de la información climática y geoestadística del Estado de Campeche; (ii) aplicación de los modelos de CTA en los municipios del Estado para obtener sus temperaturas de confort; (iii) el cómputo del potencial de horas de enfriamiento y calefacción para cada municipio, así como la viabilidad del enfoque de CTA respecto del modelo estático.

DATOS CLIMATICOS Y GEOSTADISTICOS

La información meteorológica fue obtenida a través del software Meteonorm V7, desde cual se descargaron los 13 ficheros climáticos del Estado de Campeche correspondientes al año 2022, en intervalos de una hora. En relación con los datos geoestadísticos de población y extensión territorial, así como los ficheros de mapas

de la entidad, estos correspondieron al último censo poblacional realizado en 2020, cuya información es de acceso libre en el portal del Sistema Nacional de Estadística y Geografía¹.

ENFOQUE DEL CONFORT TERMICO ADAPTATIVO

El CTA se basa en la idea de que la temperatura al interior de un edificio (T_c) puede ser estimada a partir de la temperatura ambiente del exterior (T_{out}).

Tanto en las actualizaciones oficiales de diversas normativas internacionales como en adaptaciones regionales del enfoque, esta relación se expresa mediante una regresión lineal utilizando datos recopilados en estudios de campo (Carlucci et al., 2018):

$$T_c = mT_{out} + b \quad (\text{Ecuación 1})$$

donde la pendiente m es un valor proporcional al grado de adaptación de las condiciones climáticas de la región y la abscisa b corresponde al valor teórico de confort (basado en mediciones) a una temperatura exterior de 0°C (Ecuación 1).

El trabajo pretende analizar dos modelos de CTA para Campeche. El primero corresponde al modelo promovido por la normativa ASHRAE 55-2020 (ASHRAE, 2020), el que, si bien no corresponde a una normativa internacional, representa la de mayor adopción alrededor del mundo. Este modelo de CTA fue generado a partir de datos medidos en 160 edificios localizados en países de cuatro continentes, cuestión que ha promovido su uso como un estándar en gran parte del mundo. La normativa indica que un umbral de temperatura de confort a un 80% de confiabilidad se obtiene a partir de las siguientes ecuaciones lineales (Ecuación 2 y Ecuación 3) (Carlucci et al., 2018):

$$\text{Límite superior (aceptabilidad 80\%)} = 0.31 T_{pma(out)} + 21.3 \text{ °C} \quad (10 \leq T_{pma(out)} \leq 33.5) \quad (\text{Ecuación 2})$$

$$\text{Límite inferior (aceptabilidad 80\%)} = 0.31 T_{pma(out)} + 14.3 \text{ °C} \quad (10 \leq T_{pma(out)} \leq 33.5) \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde $T_{pma(out)}$ representa la temperatura media exterior predominante. Cuando el $T_{pma(out)}$ se encuentra por encima o por debajo de dicho umbral, es necesaria la implementación de estrategias de enfriamiento o calefacción al interior del edificio para alcanzar el confort de los ocupantes.

El segundo modelo de CTA evaluado es el desarrollado por Oropeza-Perez et al. (2017). Este se distingue por ser el primer modelo regional de CTA diseñado para México, el cual divide al país en cuatro tipos de climas (árido, templado, cálido seco y cálido húmedo). El modelo se desarrolló a partir de 74 encuestas distribuidas de forma proporcional en las cuatro zonas climáticas. Todo el territorio del Estado de Campeche se clasifica en clima cálido húmedo. De acuerdo con esto, el CTA está dado por la ecuación 4:

$$T_c = 0.38 T_{pma(out)} + 15.7 \text{ °C} \quad (\text{Ecuación 4})$$

A fin de homogeneizar la descripción de este modelo con lo expresado por la normativa ASHRAE 55-2020, se definieron los límites superior (Ecuación 5) e inferior (Ecuación 6) añadiendo $\pm 3.5 \text{ °C}$:

$$\text{Límite superior (aceptabilidad 80\%)} = 0.38 T_{pma(out)} + 18.2 \text{ °C} \quad (10 \leq T_{pma(out)} \leq 33.5) \quad (\text{Ecuación 5})$$

$$\text{Límite inferior (aceptabilidad 80\%)} = 0.38 T_{pma(out)} + 13.2 \text{ °C} \quad (10 \leq T_{pma(out)} \leq 33.5) \quad (\text{Ecuación 6})$$

Para ambos enfoques resalta el concepto del $T_{pma(out)}$. Su importancia radica en que el CTA se basa en la premisa de que la temperatura al interior de las edificaciones no depende exclusivamente del día en curso, sino que está influenciada por la temperatura ambiente de los días previos; donde el $T_{pma(out)}$ representa dichos efectos. En versiones anteriores de la normativa ASHRAE 55-2017, se consideraba al $T_{pma(out)}$ como valor obtenido a través de los promedios mensuales. A partir de las últimas dos modificaciones, esta se vincula a los días previos al día de interés, cuya ecuación está dada por la ecuación 7:

$$T_{pma(out)} = (1-\alpha)[T_{e(d-1)} + \alpha T_{e(d-2)} + \alpha^2 T_{e(d-3)} + \alpha^3 T_{e(d-4)} + \dots] \quad (\text{Ecuación 7})$$

Donde α es un valor ponderado que varía entre 0 y 1, mientras que $T_{e(d-1)}$ representa el número de días pasados a considerar que puedan impactar en la temperatura interna del edificio. Para el presente trabajo se emplearon siete días previos, así como un α de 0.8 que corresponde a aquellas regiones con clima tropical como es el caso del Estado de Campeche de acuerdo con la normativa ASHRAE 55-2020.

POTENCIAL DE HORAS DE ENFRIAMIENTO Y CALEFACCION

Para identificar el potencial de enfriamiento y calefacción durante la implementación del CTA, se emplearon los métodos de Horas Grado de Enfriamiento (CDH, *cooling degree hours*) (Ecuación 8) y Horas Grado de Calefacción (HDH, *heating degree hours*) (Ecuación 9). Ambos miden la influencia de los cambios de temperatura sobre el desempeño energético del edificio. El CDH está definido como la suma acumulativa de restar al promedio de la temperatura ambiente de cada hora (T_a) una temperatura de consigna (T_r). Donde h indica el número total de horas analizadas y el apostrofe (+) indica que solo son efectivos los resultados positivos durante la sumatoria. De manera homóloga, el HDH indica la suma acumulativa de restar a la temperatura de consigna (T_r), el promedio de la temperatura ambiente de cada hora (T_a) (Jimenez-Torres et al., 2023):

$$CDH = \begin{cases} \sum_h^{8760} (T_a - T_{r,EC})^+ & \text{enfoque estático} \\ \sum_h^{8760} (T_a - T_{r,DC})^+ & \text{enfoque dinámico} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 8})$$

$$HDH = \begin{cases} \sum_h^{8760} (T_{r,EH} + T_a)^+ & \text{enfoque estático} \\ \sum_h^{8760} (T_{r,DH} + T_a)^+ & \text{enfoque dinámico} \end{cases} \quad (\text{Ecuación 9})$$

De forma convencional, la temperatura de consigna es asignado a un valor estático. Para el CDH, está dado por la temperatura estática de enfriamiento ($=25 \text{ °C}$), y para el

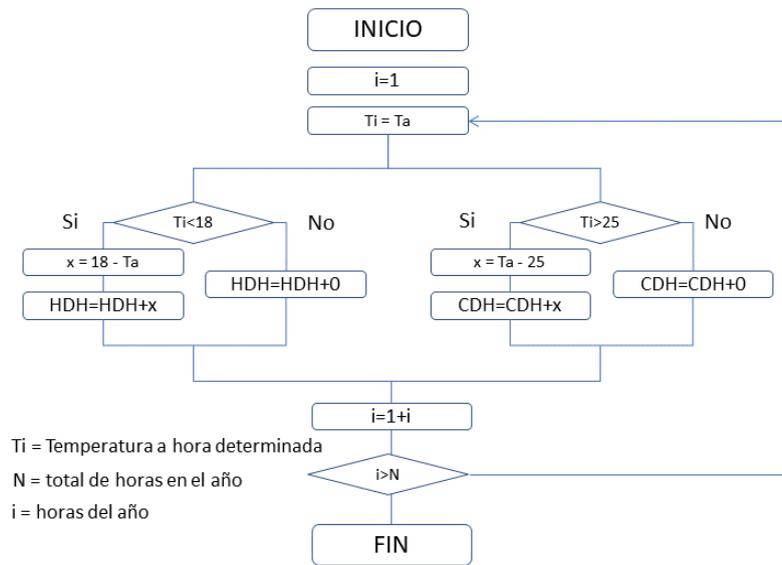


Figura 2. Diagrama de flujo para la obtención del CDH y HDH estáticos. Fuente: Elaboración de los autores

HDH está dado por la temperatura estática de calefacción (=18°C). Ambos valores se encuentran dentro del rango históricamente descrito en diversas normativas, como el caso de la ANSI/ASHRAE 169-2020 (ANSI/ASHRAE, 2021). La Figura 2 ilustra el algoritmo utilizado para el computo del CDH y HDH estáticos.

Para el enfoque adaptativo, la temperatura de consigna se considera dinámica y está dada por el valor de la temperatura de confort en el límite superior de aceptabilidad al 80% (y límite inferior de aceptabilidad al 80% para el CDH y HDH, respectivamente). En el presente trabajo se pretende comparar tanto el modelo adaptativo de la normativa ASHRAE 55-2020 y el modelo regional desarrollado por Oropeza-Perez et al. (2017) respecto del modelo estático para determinar la viabilidad del enfoque adaptativo.

INDICADORES DE VIABILIDAD DEL ENFOQUE ADAPTATIVO

La viabilidad del CTA para la región es medida mediante el cotejo de las horas anuales (h_i) en el que cada uno de los municipios se encuentra dentro del umbral de confort a una aceptabilidad del 80%. Esto es conocido como el porcentaje anual de potencial aplicación de ventilación natural (PNV) y está dado por Bienvenido-Huertas et al. (2021):

$$PNV = \frac{100 \sum_h^{8760} h_i}{8760} \quad (\text{Ecuación 10})$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

ANÁLISIS DE HORAS GRADO DE ENFRIAMIENTO

La Figura 3 ilustra la representación espacial a lo largo del territorio de Campeche sobre la demanda de horas de refrigeración anuales considerando el enfoque estático (Figura 3a), enfoque dinámico desarrollado por Oropeza-Perez et al. (2017) (Figura 3b) y el dinámico basado en la normativa ASHRAE 55-2020 (Figura 3c). Para los tres casos queda claro que los municipios localizados al norte del estado son los que requieren una mayor demanda de refrigeración, a pesar de que toda la entidad posee el mismo tipo de clima. Esto puede ser explicado debido a que en los municipios al norte del Estado se presentan los niveles de precipitación más bajos a lo largo del año, los mismos que rondan entre los 700 y 800 mm, mientras que en los municipios del sur se alcanzan precipitaciones de 1500 hasta 2000 mm (INEGI, 2022). Además, aunque los datos del INEGI reportan que más del 77% del estado está cubierto por selva y pastizal, el tipo de suelo es variante en la región. Las zonas donde se reportan mayores niveles de CDH se ubican en suelo cárstico con abundancia de superficie rocosa. A medida que se dirige al sur, la fisiografía dominante corresponde a lomeríos, lo que coincide con la reducción de la demanda para refrigeración. Finalmente, las latitudes más bajas, con menor demanda de CDH, corresponden a la zona pantanosa del Estado.

De la Figura 3 se infiere que el enfoque estático es el que demuestra mayor demanda de CDH en el año, de forma homogénea, en la mayor parte del territorio. A excepción del municipio de Candelaria, todo el Estado se encuentra con un CDH casi constantes que va de los

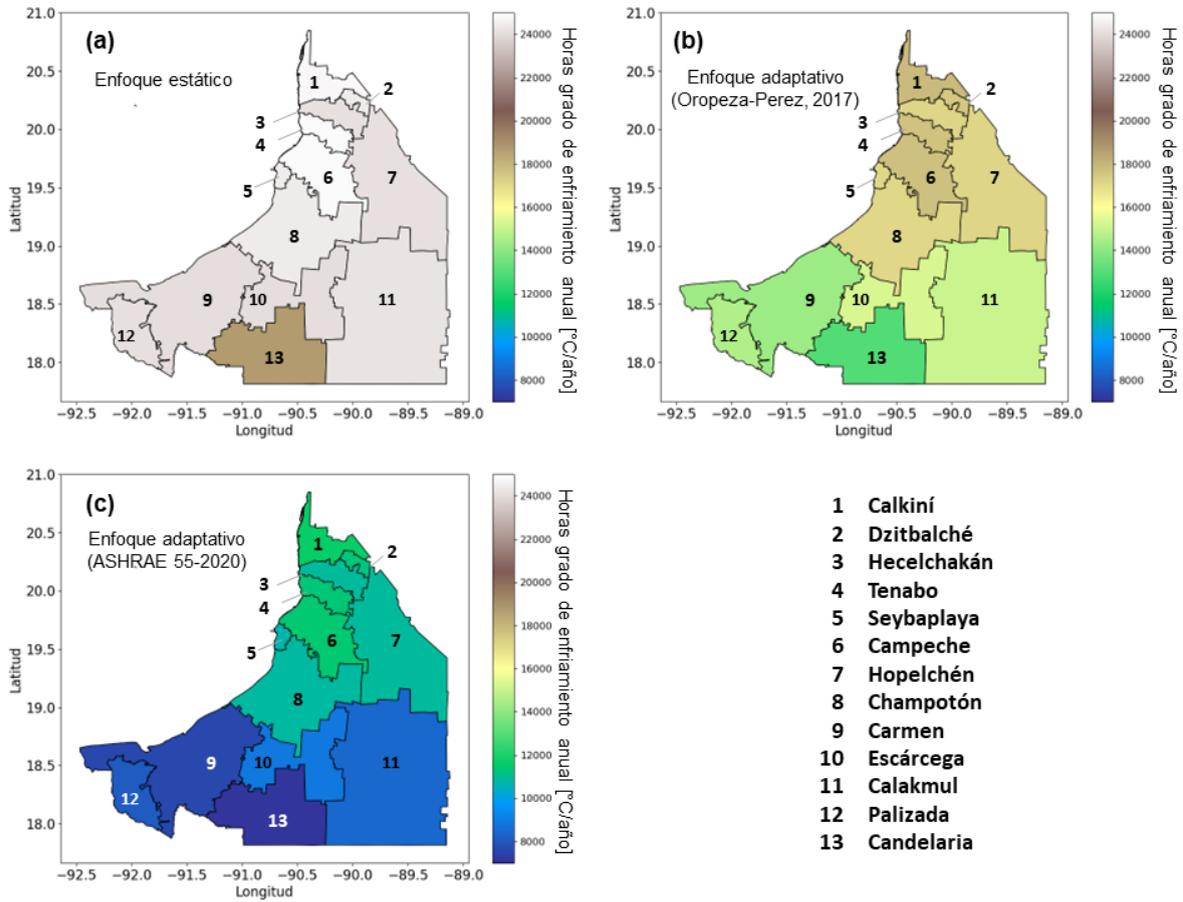


Figura 3. Horas grado de enfriamiento para los municipios de Campeche: (a) modelo estático; (b) modelo adaptativo regional; (c) modelo adaptativo ASHRAE 55-2020. Fuente: Elaboración de los autores.

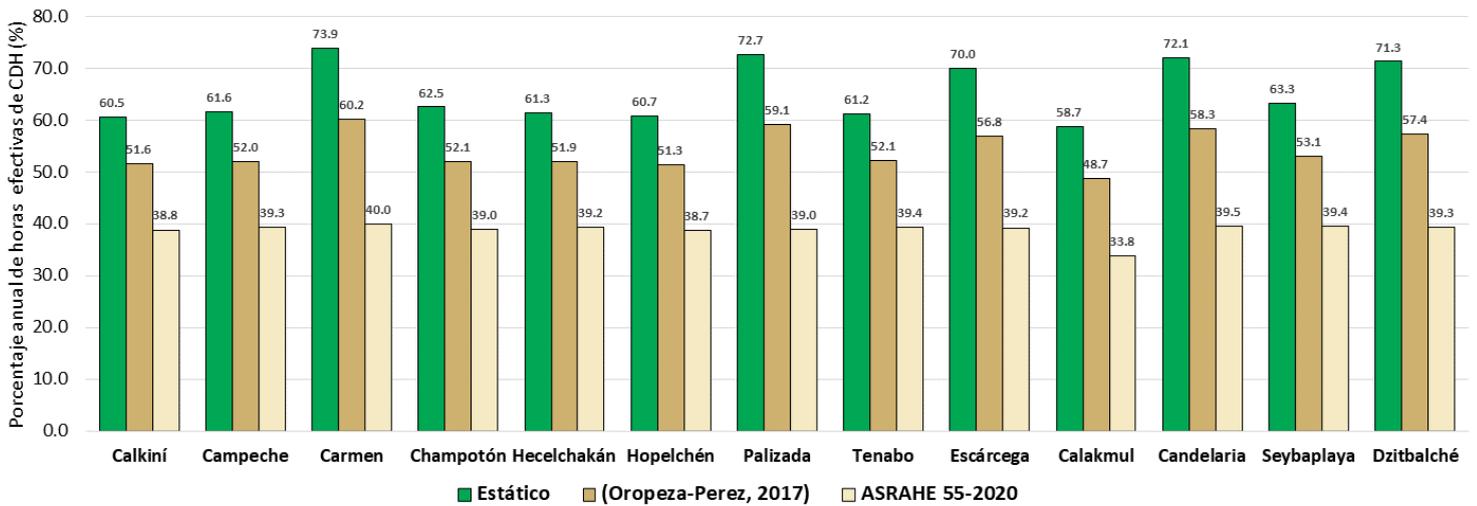


Figura 4. Contraste anual para los municipios de Campeche del porcentaje de horas-año requeridas para refrigeración empleando el enfoque estático y el enfoque de confort adaptativo. Fuente: Elaboración de los autores.

24,000 a los 24,800°C/hora-año. Comparando estos valores con los de la Figura 3b y Figura 3c, se visualiza que el enfoque adaptativo propicia menor uso de energía para refrigeración en todos los municipios de la entidad. No obstante, existen diferencias notables entre ambos modelos de CTA. El modelo de la ASHRAE indica que es posible reducir entre un 53 y 62% el índice de CDH, mientras que el modelo regional, si bien exhibe beneficios, estos se reducen a la mitad, disminuyendo entre 28 y 31%, respecto del enfoque estático. Esto puede deberse a que el modelo de la ASHRAE 55-2020 está diseñado bajo análisis en climas menos calurosos, implicando una razón de cambio para los ocupantes menos drástica ($m=0.31$). Lo anterior puede llevar a que en regiones de clima tropical, como Campeche, haya un límite crítico para cumplir en teoría con el modelo, pero en la práctica aumenta la incomodidad de los ocupantes. Por su parte, el modelo regional indica que las poblaciones en climas cálidos no tienen amplia tolerancia al calor ($b=18.3$), así como una menor adaptación climática a los cambios bruscos de temperatura que se dan en la región.

Otro punto importante para analizar es cómo impacta la integración del enfoque adaptativo en las horas de operación de los equipos de aire acondicionado. La Figura 4 presenta el porcentaje anual de horas de uso de equipo de climatización para enfriar recintos. El enfoque

estático muestra un 60 % de uso de aire acondicionado durante el año, siendo los municipios del sur (Carmen, Palizada, Escárcega y Candelaria) los que más emplean climatización. Esto implica que, a pesar de que su consumo anual es menor que los municipios del norte, son los de mayor tiempo fuera de la zona de confort. Por su parte, al usar el modelo adaptativo regional, es posible disminuir entre 10% y 8% las horas efectivas de CDH; reduciendo en la mayor parte de los municipios las horas operativas por debajo del 55%, mientras que el modelo ASHRAE sugiere que es posible disminuir por debajo del 40% las horas de CDH anuales. No obstante, es importante considerar lo discutido con anterioridad ya que de acuerdo a Humphreys et al. (2007) una mala implementación del enfoque adaptativo puede ser contraproducente pues alentaría a los ocupantes a utilizar más energía para aliviar el estrés térmico. Esto demuestra la valía del modelo regional al representar de forma más clara las características del Estado, al mismo que tiempo de indica que el enfoque adaptativo es una opción adecuada para la reducción del consumo energético de climatización.

ANÁLISIS DE HORAS GRADO DE CALEFACCION

Para los HDH, su análisis no implica la necesidad de acciones de calefacción en el Estado (temperaturas en la

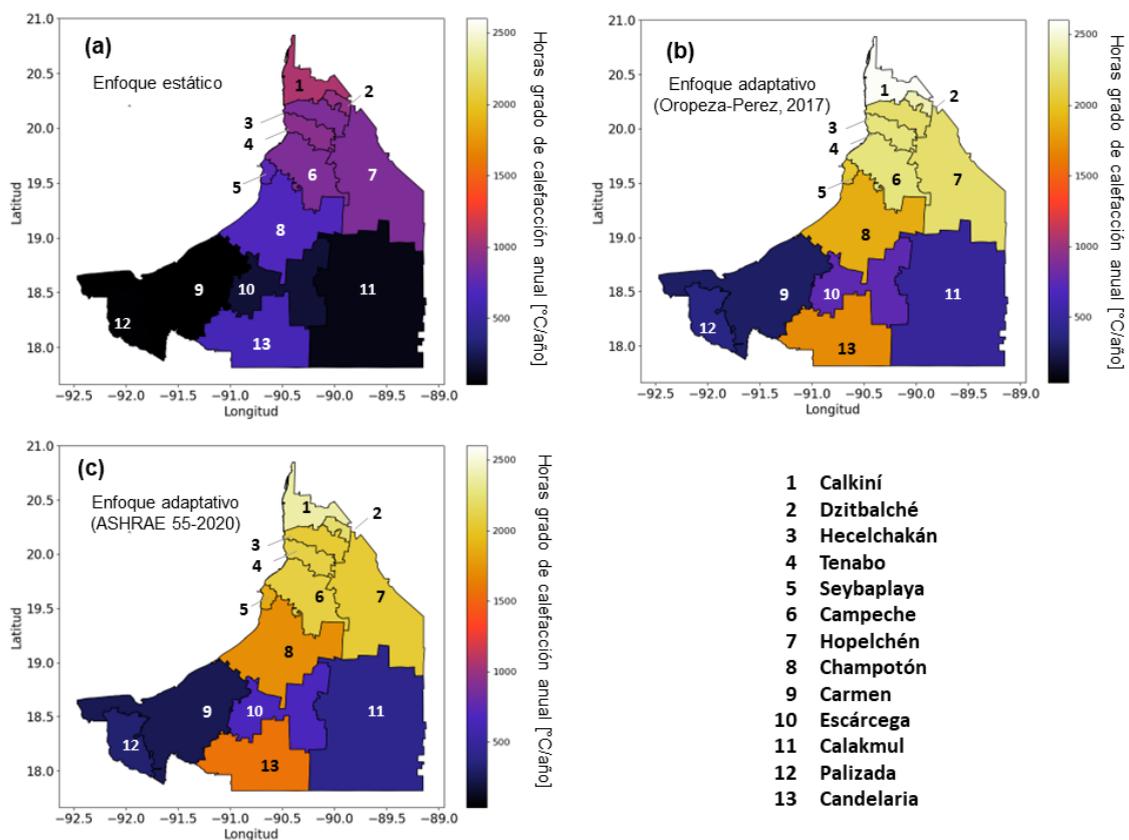


Figura 5. Horas grado de calefacción para los municipios de Campeche: (a) modelo estático; (b) modelo adaptativo regional; (c) modelo adaptativo ASHRAE 55-2020. Fuente: Elaboración de los autores.

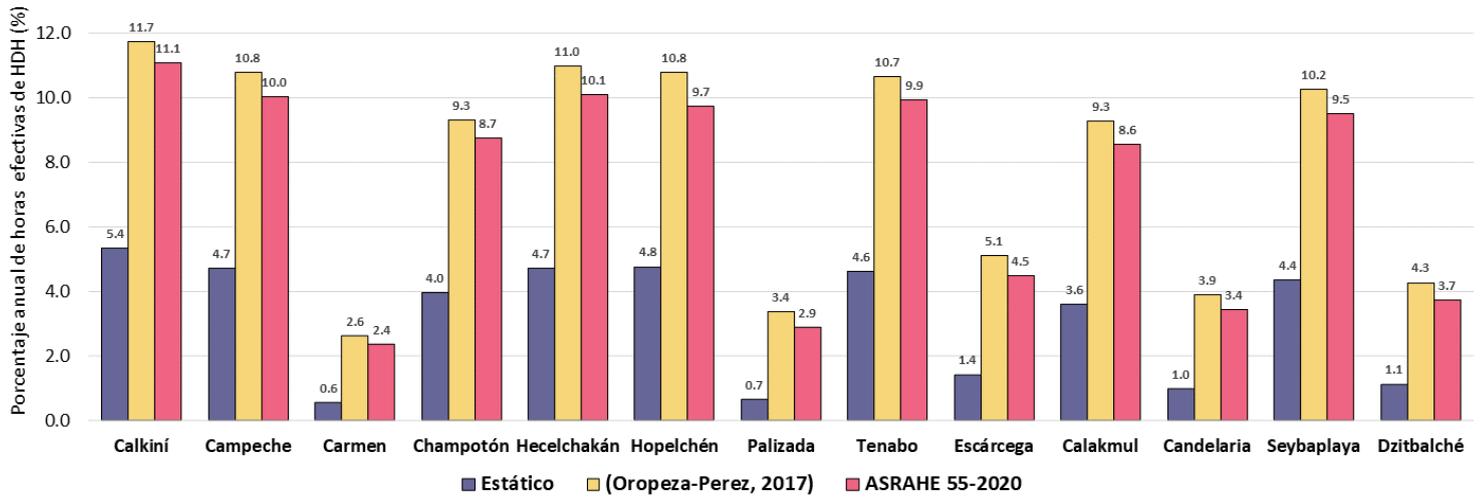


Figura 6. Contraste anual para los municipios de Campeche del porcentaje de horas-año requeridas para calefacción empleando el enfoque estático y de confort adaptativo. Fuente: Elaboración de los autores.

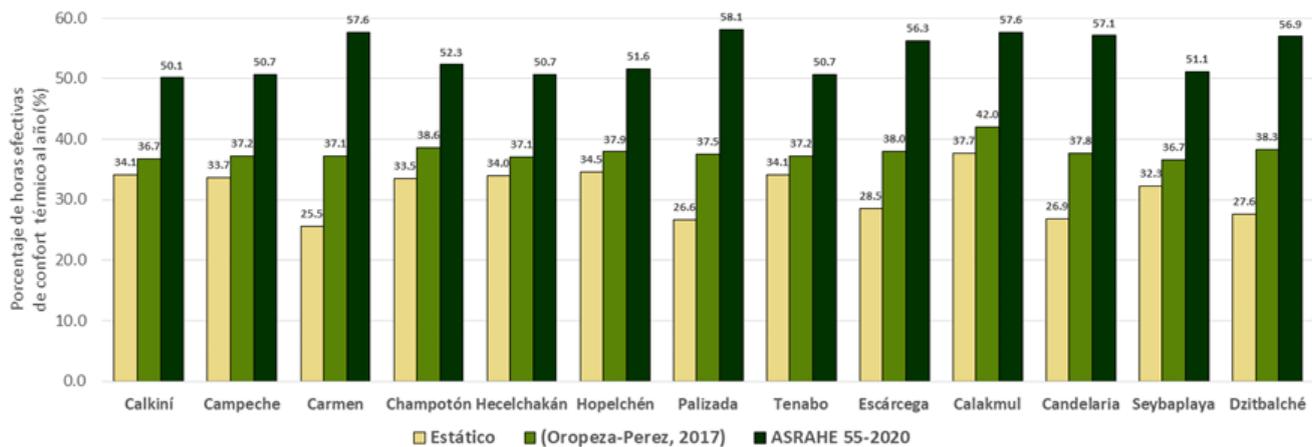


Figura 7. Contraste anual para los municipios de Campeche del porcentaje de horas-año requeridas para calefacción empleando el enfoque estático y el enfoque de confort adaptativo. Fuente: Elaboración de los autores.

región difícilmente son inferiores a los 18°C), pero sí es un indicativo del tiempo en el que la población puede estar en temperaturas por debajo de la zona de confort.

De acuerdo con la Figura 5, hay un fenómeno similar al caso del CDH donde los municipios del Carmen, Palizada, Candelaria y Escárcega (ubicados al sur) presentan los menores índices de desconfort en el año. Los resultados del enfoque estático muestran que los requisitos de HDH para el Estado son mínimos, coincidiendo con las condiciones de clima tropical de Campeche. No obstante, recordando que para nuestro caso el HDH indica el nivel desconfort de los ocupantes, es necesario cotejar con los resultados adaptativos. Basado en las Figuras 5b y 5c, el enfoque adaptativo infiere que las necesidades de HDH son mayores. Es importante resaltar que en comparación al caso de CDH donde el modelo del ASHRAE varía hasta en 20% del modelo regional, la diferencia de HDH

entre ambos es mínima, lo que se puede corroborar en la escala de colores de la Figura 5. En promedio ambos modelos difieren 9.8% entre sí, por lo que en este caso sí coinciden en la estimación del calor. Cabe destacar que esta diferencia puede deberse por la percepción de frío en regiones de clima tropical, en donde la población comienza a entrar en desconfort cuando se encuentra frente a temperaturas más elevadas respecto a regiones templadas.

Por otra parte, se realizó el análisis respecto de las horas anuales que la población está por debajo de la zona de confort (Figura 6). La diferencia entre las horas efectivas para ambos modelos adaptativos varía apenas entre 0.2% y 0.9%, siendo en los municipios con menor porcentaje de HDH donde se encontraban las menores diferencias. En todos los casos el modelo adaptativo apenas superó el 10% de horas anuales lo cual se traduce en poco menos

Tabla 1. Diferencias del porcentaje de horas de CDH, HDH y confort térmico anual de cada modelo adaptativo respecto al enfoque estático para el Estado de Campeche. Fuente: Elaboración de los autores.

Municipio	Modelo (Oropeza-Perez et al., 2017)			Modelo ASHRAE 55-2020		
	CDH	HDH	Confort	CDH	HDH	Confort
Calkiní	9.0	6.4	2.6	21.7	5.7	16.0
Campeche	9.6	6.1	3.5	22.2	5.3	16.9
Carmen	13.7	2.1	11.6	33.9	1.8	32.1
Champutón	10.4	5.3	5.1	23.6	4.8	18.8
Hecelchakán	9.4	6.3	3.1	22.1	5.4	16.7
Hopelchén	9.4	6.0	3.4	22.0	5.0	17.0
Palizada	13.6	2.7	10.9	33.7	2.2	31.5
Tenabo	9.1	6.0	3.1	21.8	5.3	16.5
Escárcega	13.2	3.7	9.5	30.8	3.1	27.8
Calakmul	10.0	5.7	4.3	24.8	5.0	19.9
Candelaria	13.8	2.9	10.8	32.6	2.5	30.2
Seybaplaya	10.2	5.9	4.3	23.9	5.1	18.8
Dzitbalché	13.9	3.1	10.8	32.0	2.6	29.4
Promedio	11.2	4.8	6.4	26.5	4.1	22.4
Desv. Estándar	2.1	1.6	3.6	5.1	1.4	6.5

de 40 días del año, siendo la mayor parte de tiempo en horas nocturnas.

POTENCIAL DE APLICACIÓN DE VENTILACION NATURAL

El fin último del análisis es identificar el nivel de impacto positivo que tiene la implementación de estrategias adaptativas en los 13 municipios de Campeche. De acuerdo con lo expuesto en la Figura 7, la implementación de ambos modelos adaptativos demuestra ventajas respecto del enfoque estático. En el caso del modelo ASHRAE 55-2020, se identificó que su uso estaría asociado a la posibilidad de aplicar ventilación natural en al menos el 50% del año en todos los municipios del Estado, con posibilidad de ser aprovechado en hasta más del 57 % en municipios como Palizada, Carmen y Calakmul. En el caso del modelo regional, existen beneficios moderados con porcentaje de aprovechamiento de ventilación natural en promedio del 38% en todo el territorio.

La Tabla 1 permite ver que el enfoque adaptativo de la normativa y el enfoque regional mejoran un 16 % y 6.4 % la perspectiva de aplicación de ventilación natural, respectivamente. Es interesante analizar los efectos que presenta el modelo regional. Por un lado, los municipios correspondientes al norte del estado (Campeche, Calkiní, Hecelchakán y Tenabo) poseen apenas mejoras de entre 2.4 y 3.5 % respecto del modelo tradicional. En contra

parte, los mejores resultados ocurren en los municipios del sur.

En el caso del modelo ASHRAE, se pueden encontrar resultados similares a lo señalado en el párrafo anterior, lo cual deja claro que las estrategias de ventilación natural basadas en el enfoque adaptativo no benefician del mismo modo a toda la entidad federativa. En el caso del modelo ASHRAE, queda en duda su efectividad, específicamente en el caso de los CDH, al considerar que puede estar sobreestimando la tolerancia de la población a las condiciones de calor extremo de la región. Por otra parte, el modelo regional demostró que, si bien se puede ajustar a las condiciones del clima, también deja claro la necesidad de desarrollar modelos de confort locales que tomen en cuenta la subdivisión regional de las entidades del país para poder plantear estrategias acordes a la realidad del sureste mexicano.

Los resultados pueden ser utilizados para realizar otros análisis como identificar el porcentaje y grado de impacto sobre la población al implementar estrategias de ventilación natural mediante el enfoque adaptativo (Figura 8). En el caso del modelo ASHRAE, se aprecia que el rango de impacto se encuentra entre el 50% y 60%. En este caso, los datos se pueden dividir en cuatro estratos, donde el caso de 54-56% se omitió al carecer de valores. De acuerdo con los datos poblacionales de cada municipio el 48% de los habitantes de Campeche tienen la posibilidad de aplicar estrategias de ventilación

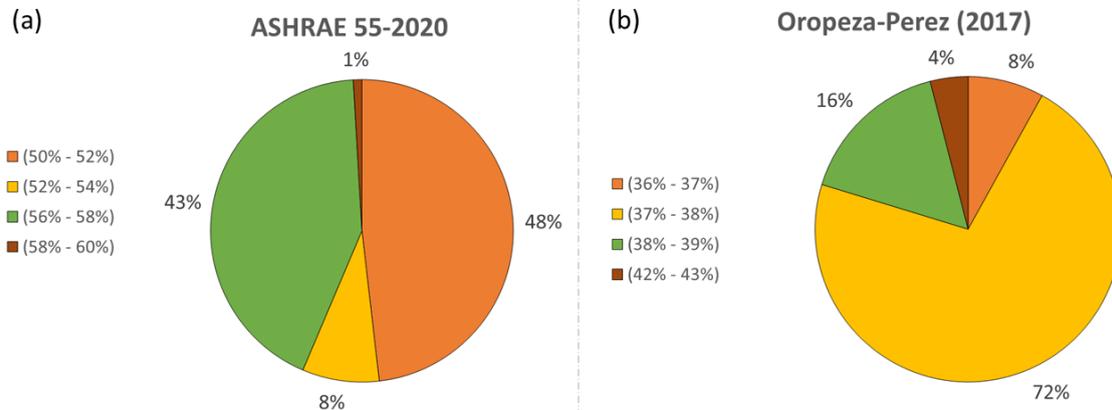


Figura 8. Fracción de población en el Estado de Campeche sobre la que impacta el porcentaje de horas efectivas de CTA (a) análisis basado en modelo ASHRAE 55-2020; (b) análisis basado en modelo de regional. Fuente: Elaboración de los autores.

natural, poco menos del 52% del año. Dichos resultados coinciden con el hecho de que la zona más densamente poblada corresponde a los municipios de Campeche y Seybaplaya. Por otra parte, el 43% de la población tiene la posibilidad de implementar el enfoque adaptativo para alcanzar niveles de confort térmico entre el 56% y 58% anual. Lo anterior debido a la mayor distribución demográfica en los municipios del sur donde la estabilidad térmica es mayor. Para el caso del modelo local, los resultados se encuentran más concentrados. En este caso, con el fin de brindar una mejor apreciación se dividió en cuatro estratos con intervalos 1%. De acuerdo con los resultados de este modelo, el 88% de la población se encuentra en un intervalo entre el 37 y 39 % de posibilidad de ventilación natural. Esto indica que el modelo impacta en un gran porcentaje de los habitantes. Además, estos valores están por encima de lo que se puede alcanzar con el enfoque estático. De esta manera, el modelo regional demuestra que, aunque en menor medida, el enfoque adaptativo sí favorece la reducción del consumo energético entre los habitantes del Estado y abre el cuestionamiento sobre la viabilidad de implementar el modelo convencional de la ASHRAE en la región.

Finalmente, el enfoque adaptativo posee ventajas tanto desde la perspectiva del confort como del ahorro energético. Para el caso de Campeche, que es una entidad federativa joven y con una población reducida y creciente, el desarrollo de este tipo de enfoques brinda la posibilidad de un crecimiento urbano con mejores estrategias de diseño y planteamiento. Sin embargo, es imperativo el desarrollo de estudios más focalizados en los diversos municipios con el fin de poder hacer estimaciones más concretas y ajustadas con la realidad de la región.

CONCLUSIÓN

El presente estudio se centró en analizar la implementación del enfoque de confort térmico adaptativo como estrategia para mejorar la sensación térmica y el ahorro energético en edificios del estado de Campeche. Mediante la revisión de los 13 ficheros climáticos de cada uno de los municipios del Estado se determinó el potencial de horas de enfriamiento, calefacción y viabilidad del enfoque adaptativo para la región. Para tal efecto se analizó el modelo presentado por la normativa ASHRAE 55-2020 y un modelo regional desarrollado para climas tropicales en México. Dichos modelos fueron contrastados con el enfoque convencional de confort térmico estático para determinar las ventajas y diferencias entre ambos.

Los resultados mostraron que ambos modelos adaptativos pueden contribuir a reducir el uso de equipo de climatización en los 13 municipios del Estado. Sin embargo, se encontraron diferencias significativas en el potencial de ambos modelos, las cuales se atribuyeron a que el modelo basado en la norma ASHRAE 55-2020, a pesar de que es ampliamente usado, puede tener sesgos al no estar diseñado con variables características del clima tropical. De acuerdo con los resultados, el modelo regional promedió una reducción de 11.2% en las horas anuales de climatización mientras que el enfoque basado en la normativa obtuvo 15.4% y 16.0 % respectivamente.

En relación con la viabilidad de implementación, el enfoque adaptativo regional demostró capacidad de mejorar entre un 2.6% y 11.6% el confort térmico al interior de los edificios, mientras que el enfoque de la ASHRAE indicó mejoras entre un 16% y 32%. Por su parte, los resultados del modelo regional demuestran que, aunque en menor medida, el enfoque adaptativo sí favorece la reducción del consumo energético entre los habitantes del Estado, y abre el cuestionamiento sobre la

viabilidad de implementar el modelo convencional de la ASHRAE en la región.

Finalmente, el trabajo da pie al desarrollo de posteriores estudios enfocados a: (i) generar modelos específicos para los diversos municipios o subregiones del estado con el fin hacer estimaciones ajustadas al contexto del sureste del país, (ii) estudiar el comportamiento adaptativo en los diversos tipos de construcciones que se edifican en la región.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo forma parte del proyecto 014/UAC/2023 y realizado con el apoyo de la Red Temática 722RT0135 "Red Iberoamericana de Pobreza Energética y Bienestar Ambiental (RIPEBA), financiado por la Convocatoria de Redes Temáticas del Programa CYTED".

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSI/ASHRAE. (2021). ANSI/ASHRAE Standard 169-2020 - *Climatic Design Building Standards*. Recuperado de: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/169_2020_a_20211029.pdf

ASHRAE. (2020). *ASHRAE Standard 55-2020 - Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Recuperado de: https://www.ashrae.org/file%20library/technical%20resources/standards%20and%20guidelines/standards%20addenda/55_2020_a_20210430.pdf

Bienvenido-Huertas, D., Pulido-Arcas, J. A., Rubio-Bellido, C. & Pérez-Fargallo, A. (2021). Feasibility of adaptive thermal comfort for energy savings in cooling and heating: A study on Europe and the Mediterranean basin. *Urban Climate*, 36, 100807. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2021.100807>

Carlucci, S., Bai, L., De Dear, R. & Yang, L. (2018). Review of adaptive thermal comfort models in built environmental regulatory documents. *Building and Environment*, 137, 73-89. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2018.03.053>

Hoyt, T., Arens, E. & Zhang, H. (2015). Extending air temperature setpoints: Simulated energy savings and design considerations for new and retrofit buildings. *Building and Environment*, 88, 89-96. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.010>

Humphreys, M. S., Nicol, J. M. & Raja, I. A. (2007). Field Studies of Indoor Thermal Comfort and the Progress of the Adaptive Approach. *Advances in Building Energy Research*, 1(1), 55-88. DOI: <https://doi.org/10.1080/17512549.2007.9687269>

INEGI. 2022. *Aspectos Geográficos: Campeche 2021*. Aguascalientes.

Jimenez-Torres, M., Bienvenido-Huertas, D., May Tzuc, O., Bassam, A., Ricalde Castellanos, L. J. & Flota-Bañuelos, M. (2023). Assessment of climate change's impact on energy demand in Mexican buildings: Projection in single-family houses based on Representative Concentration Pathways. *Energy for Sustainable Development*, 72, 185-201. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2022.12.012>

Oropeza-Perez, I., Petzold-Rodriguez, A. H. & Bonilla-Lopez, C. (2017). Adaptive thermal comfort in the main Mexican climate conditions with and without passive cooling. *Energy and Buildings*, 145, 251-258. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.04.031>

Pérez-Fargallo, A., Bienvenido-Huertas, D., Rubio-Bellido, C. & Trebilcock, M. (2020). Energy poverty risk mapping methodology considering the user's thermal adaptability: The case of Chile. *Energy for Sustainable Development*, 58, 63-77. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esd.2020.07.009>

Rodríguez, C. M. & D'Alessandro, M. (2019). Indoor thermal comfort review: The tropics as the next frontier. *Urban Climate*, 29, 100488. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.uclim.2019.100488>

Sala, M., Gallo, C. & Sayigh, A. A. M. (1999). *Architecture - Comfort and Energy*. Elsevier.

Salcido, J. C., Raheem, A. A. & Issa, R. R. A. (2016). From simulation to monitoring: Evaluating the potential of mixed-mode ventilation (MMV) systems for integrating natural ventilation in office buildings through a comprehensive literature review. *Energy and Buildings*, 127, 1008-1018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.054>

Sánchez-García, D., Bienvenido-Huertas, D., Pulido-Arcas, J. A. & Rubio-Bellido, C. (2023). Extending the use of adaptive thermal comfort to air-conditioning: The case study of a local Japanese comfort model in present and future scenarios. *Energy and Buildings*, 285, 112901. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.112901>

Sánchez-García, D., Rubio-Bellido, C., Martín del Río, J. J. & Pérez-Fargallo, A. (2019). Towards the Quantification of Energy Demand and Consumption through the Adaptive Comfort Approach in Mixed Mode Office Buildings Considering Climate Change. *Energy and Buildings* 187, 173-85. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.002>

SENER, Secretaria Nacional de Energía. (2021). Comisión Nacional Para el uso Eficiente de la Energía. *Infografía Confort Térmico*. Recuperado de: <https://www.gob.mx/conuee/acciones-y-programas/estadisticas-energeticas-en-las-viviendas-mexicanas>

Tsolkas, C., Spiliotis, E., Sarmas, E., Marinakis, V. & Doukas, H. (2023). Dynamic energy management with thermal comfort forecasting. *Building and Environment*, 237, 110341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110341>

Yau, Y. H. & Chew, B. P. (2012). A review on predicted mean vote and adaptive thermal comfort models. *Building Services Engineering Research and Technology*, 35(1), 23-35. DOI: <https://doi.org/10.1177/0143624412465200>

Hotel Tierra Patagonia

Cuzco Fegers, 2014

Mirador del Sarmiento

y el macizo del Paine

BARRIA, 2013

